

<https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-2-0242>

THERMOCHRONOLOGY OF MINGLING DYKES IN WEST SANGILEN (SOUTH-EAST TUVA, RUSSIA): EVIDENCE OF THE COLLAPSE OF THE COLLISIONAL SYSTEM IN THE NORTH-WESTERN EDGE OF THE TUVA-MONGOLIA MASSIF

V. G. Vladimirov^{1,2}, I. V. Karmysheva^{1,2}, V. A. Yakovlev^{1,2},
A. V. Travin^{1,2,3}, A. A. Tsygankov^{4,5}, G. N. Burmakina⁴

¹V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

³Tomsk State University, Tomsk, Russia

⁴Geological Institute, Siberian Branch of RAS, Ulan-Ude, Russia

⁵Buryat State University, Ulan-Ude, Russia

Abstract: In West Sangilen (South-East Tuva, Russia), there are outcrops of metamorphic and magmatic complexes of early Caledonides, which are related to the period of long-term collisional and post-collisional events in the north-western edge of the Tuva-Mongolian massif. The evolution of orogenic structures in West Sangilen is an example of the collapse of folded structures in case of changes in tectonic regimes from compression and transpression (collision period) to intra- and marginal continental transform-shear extension (post-collision period). Numerous geologic features give evidence of changes in the kinematics and characteristics of deformations, as well as in the conditions of metamorphism and magmatism in the study region. However, thinning of the crust during the collapse of the collisional orogenic structure has not been supported by any direct data. Indicators of such events are the complexes of combined dykes, which are abundant in West Sangilen, especially in the area between the Erzin and Naryn rivers and on the right bank of the Erzin river. The most representative object is a combined basite-granite dyke at the foot of the Tavit-Dag mountain. Its position is controlled by the strike-slip fault system. The thermochronological analysis of mingling rocks shows different ages of the closure of isotope systems: 494.8±5.4 Ma (U/Pb, zircon, basites), 489.7±7 Ma (U/Pb, zircon, granitoids), 471.2±1.9 Ma (Ar/Ar, amphibole, basites), and 462.5±1.0 Ma (Ar/Ar, biotite, basites). Taking into account the parameters of the closure of isotope systems (~800–900 °C, zircon, U/Pb; ~500 °C, amphibole, Ar/Ar; ~300 °C, biotite, Ar/Ar), the cooling curve of the mingling dyke is estimated. It corresponds to lowering of the temperature by 600 °C (900 °C → 500 °C → 300 °C) in the period from 500 (494.8±5.4) Ma to 461 (462.5±1.0) Ma. It is shown that the recent thermal events did not affect the mingling dyke located on the Tavit-Dag site. The sequential changes in the age of the closure of isotope systems are indicative of thinning of the crust in the study region

RESEARCH ARTICLE

Recommended by E.V. Sklyarov

Received: September 27, 2016

Revised: February 22, 2017

Accepted: February 24, 2017

For citation: Vladimirov V.G., Karmysheva I.V., Yakovlev V.A., Travin A.V., Tsygankov A.A., Burmakina G.N., 2017. Thermochronology of mingling dykes in West Sangilen (South-East Tuva, Russia): evidence of the collapse of the collisional system in the north-western edge of the Tuva-Mongolia massif. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (2), 283–310. doi:10.5800/GT-2017-8-2-0242.

Для цитирования: Владимирова В.Г., Кармышева И.В., Яковлев В.А., Травин А.В., Цыганков А.А., Бурмакина Г.Н. Термохронология минглинг-даек Западного Сангилена (Юго-Восточная Тува): свидетельства развала коллизионной системы на северо-западной окраине Тувино-Монгольского массива // *Геодинамика и тектонофизика*. 2017. Т. 8. № 2. С. 283–310. doi:10.5800/GT-2017-8-2-0242.

during the post-collisional collapse of the orogenic structure. According to the geological and thermochronological data, the mingling dykes on the Tavit-Dag site were moved from the deep crust (~27 km) to a more shallow level (10 km) at a rate of about 0.5 km per 1.0 Ma. This process lasted for about 32 Ma, and the temperature was decreasing by 18.6 °C per 1.0 Ma.

Key words: thermochronology; mingling; collision; strike-slip extension; tectonic denudation; Sangilen; Tuva-Mongolia massif; Central Asian folded belt

ТЕРМОХРОНОЛОГИЯ МИНГЛИНГ-ДАЕК ЗАПАДНОГО САНГИЛЕНА (ЮГО-ВОСТОЧНАЯ ТУВА): СВИДЕТЕЛЬСТВА РАЗВАЛА КОЛЛИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ НА СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ОКРАИНЕ ТУВИНО-МОНГОЛЬСКОГО МАССИВА

В. Г. Владимиров^{1,2}, И. В. Кармышева^{1,2}, В. А. Яковлев^{1,2},
А. В. Травин^{1,2,3}, А. А. Цыганков^{4,5}, Г. Н. Бурмакина⁴

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Томский государственный университет, Томск, Россия

⁴ Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

⁵ Бурятский государственный университет, Улан-Удэ, Россия

Аннотация: В пределах Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува) обнажены метаморфические и магматические комплексы ранних каледонид, относящихся к периоду длительных коллизионных и постколлизионных событий на северо-западной окраине Тувино-Монгольского массива. Эволюция орогенных структур в пределах Западного Сангилен может служить примером развала складчатых сооружений при смене режимов сжатия и транспрессии (период коллизии) режимом внутри- и окраинно-континентального трансформно-сдвигового растяжения (постколлизионный период). Существуют многочисленные геологические свидетельства, указывающие на происходившие при этом изменения в кинематике и характере деформаций, а также в условиях метаморфизма и магматизма региона. Однако данных, прямо подтверждающих утонение земной коры в процессе развала коллизионной орогенной структуры, до настоящего времени не было. В качестве индикаторов этих событий на Западном Сангилене могут выступать комплексы комбинированных даек, широко распространенные в междуречье рек Эрзин и Нарын и на правом берегу реки Эрзин. Наиболее представительным объектом является комбинированная базит-гранитная дайка у подножия г. Тавыт-Даг, положение которой контролируется системой трещинных нарушений сдвигового генезиса. Термохронологические исследования пород минглинга показали различный возраст закрытия изотопных систем: 494.8±5.4 млн лет (U/Pb, циркон, базиты), 489.7±7 млн лет (U/Pb, циркон, гранитоиды), 471.2±1.9 млн лет (Ar/Ar, амфибол, базиты) и 462.5±1 млн лет (Ar/Ar, биотит, базиты). С учетом параметров закрытия изотопных систем (~800–900 °C, циркон, U/Pb; ~500 °C, амфибол, Ar/Ar; ~300 °C, биотит, Ar/Ar) оценена кривая остывания минглинг-дайки. Она отвечает понижению температур на 600 °C (900 °C → 500 °C → 300 °C) в период с 500 (494.8±5.4) до 461 (462.5±1) млн лет. Показано, что поздние термальные события не затронули минглинг-дайку участка Тавыт-Даг. Последовательное изменение возраста закрытия изотопных систем отражает утонение земной коры в регионе в процессе постколлизионного развала орогенной структуры. На основе геологических и термохронологических данных показано, что выведение минглинг-дайки участка Тавыт-Даг с глубинных уровней земной коры (~27 км) на уровень, отвечающий 10 км, происходило со скоростью около 0.5 км / 1 млн лет и длилось ~32 млн лет при динамике понижения температуры 18.6 °C за 1 млн лет.

Ключевые слова: термохронология; минглинг; коллизия; сдвиговое растяжение; тектоническая денудация; Сангилен; Тувино-Монгольский массив; Центрально-Азиатский складчатый пояс

1. ВВЕДЕНИЕ

Палеозойские коллизионные горно-складчатые сооружения характеризуются длительной историей развития, завершающейся, как правило, разру-

шением горной системы, изостазией и утонением земной коры. Коллапс коллизионных систем чаще всего происходит на фоне смены режимов сжатия и транспрессии (период коллизии) режимом внутри- и окраинно-континентального трансформно-сдви-

гового растяжения (постколлизийный период). Как правило, можно обнаружить многочисленные геологические свидетельства, указывающие на происходившие при этом изменения в кинематике и характере деформаций, условиях и параметрах метаморфизма, коренной смене магматизма. Однако данные, позволяющие оценить динамику утонения земной коры в процессе развала коллизийной орогенной структуры, до настоящего времени немногочисленны.

Суть проблемы состоит в сложности выбора объекта – его становление должно быть однозначно привязано к наиболее ранним этапам коллапса коллизийной системы (что должно стать начальной точкой отсчета), а характеристики объекта должны отражать максимально длительный период постколлизийной истории.

Для решения подобной задачи авторами были выбраны комбинированные (минглинг) дайки Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува), характеризующие постколлизийные события на северо-западной окраине Тувино-Монгольского массива (ТММ).

При использовании мультиминеральных (циркон, роговая обманка, биотит) и мультисистемных (U/Pb, Ar/Ar) изотопных исследований комбинированные дайки могут быть идеальными объектами:

- Появление минглинг-даек, как правило, связано с этапами растяжения в регионе, что позволяет, опираясь на геолого-структурные и изотопно-геохронологические методы, обосновать их место в эволюции коллизийного горно-складчатого сооружения.

- Комбинированные дайки представляют собой механическую смесь контрастных по составу расплавов, что позволяет анализировать как гранитоидные, так и базитовые магматические породы, тем самым расширив диапазон изотопных систем и минералов при решении задач термохронологии.

- Размер минглинг-даек не превышает первые метры, и, как следствие, длительность их становления ничтожно мала по геологическим меркам. Иными словами, все анализируемые изотопными методами минералы (циркон, амфиболы, слюды) кристаллизовались условно одновременно и в одном месте. Однако температуры закрытия и, соответственно, возраст закрытия изотопных систем отдельных минералов будут различны, что отражает внутрикоровые термальные изменения. Комбинированные дайки можно считать природными термохронологическими датчиками.

В качестве непосредственного объекта изучения выбрана комбинированная (минглинг) дайка на участке Тавыт-Даг в эндоконтакте Матутского

гранитоидного массива в пределах Эрзинской тектонической зоны (координаты: N50.29689 E95.26916).

2. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ

Горно-складчатые сооружения Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува) относятся к коллизийным структурам краевой части Тувино-Монгольского массива (ТММ) Центрально-Азиатского складчатого пояса [Kuzmichev et al., 2001; Kuzmichev, 2004; Vladimirov et al., 2005; и др.] (рис. 1, рис. 2).

За последние 20 лет различными авторами опубликован значительный объем данных геолого-структурных, петрологических и изотопно-геохронологических исследований, посвященных эволюции данного региона. Результаты термохронологических исследований приведены в таблице 1.

Опираясь на опубликованные (табл. 1) и авторские материалы, можно выделить три основных периода (рис. 3, табл. 2), отражающих последовательную смену в пределах Западного Сангилен геодинамических обстановок в краевой части ТММ: раннеколлизийный (режим сжатия) → коллизийный (режим сжатия) → постколлизийный (режим растяжения).

Раннеколлизийный период (570–535 млн лет) характеризуется обстановками сжатия, компенсированными субдукционно-аккреционными процессами при косоугольной коллизии Таннуольской островодужной системы с Тувино-Монгольским микроконтинентом.

Начало активных горообразовательных процессов можно связать с «запиранием» субдукции в условиях продолжающегося сжатия и началом «жесткого» коллизийного взаимодействия островной дуги с микроконтинентом в период 535–495 млн лет (табл. 2). Последовательное утолщение коры за счет прекращения субдукции (удвоение коры и изостатический подъем), а также вовлечения аккреционных, окраинно- и внутриконтинентальных осадочных комплексов в пликративные и надвиговые структуры оказалось достаточным для проявления в основании горно-складчатого сооружения метаморфизма ставролит-кианитового типа. Комплекс геологических данных позволяет предполагать, что возраст кианитового метаморфизма (M1) не может быть моложе возрастного рубежа 515 млн лет – времени заложения Эрзинской и Кокмолгаргинской тектонических зон. С этим же возрастным рубежом можно связать повышение уровня метаморфизма до амфиболитовой фации, а в пределах проницаемых тектонических зон – до гранулитов и локально – в зонах

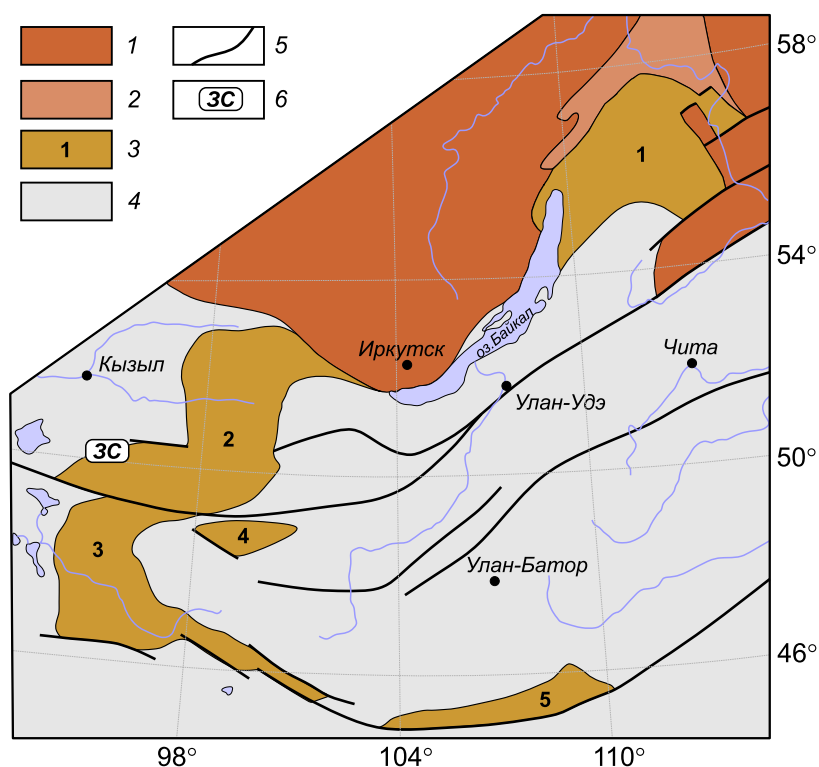


Рис. 1. Положение Западного Сангилен в структурах южного обрамления Сибирской платформы (по [Kuzmichev et al., 2001; Kuzmichev, 2004] с упрощениями).

1 – Сибирский кратон; 2 – пассивные окраины; 3 – докембрийские террейны (1 – Байкало-Муйский пояс, 2 – Тувино-Монгольский массив, 3 – Дзабханский массив, 4 – Тарбагатайский массив, 5 – Центрально-Монгольский массив); 4 – палеозойды Центрально-Азиатского складчатого пояса; 5 – разломы; 6 – положение Западного Сангилен.

Fig. 1. Location of West Sangilen in the structures of the southern frame of the Siberian platform (after [Kuzmichev et al., 2001; Kuzmichev, 2004], simplified).

1 – Siberian craton; 2 – passive margins; 3 – Precambrian terranes (1 – Baikal-Muya belt, 2 – Tuva-Mongolia massif, 3 – Dzabkhan massif, 4 – Tarbagatay massif, 5 – Central Mongolian massif); 4 – paleozooids of the Central Asian folded belt; 5 – faults; 6 – position of West Sangilen.

растяжения и инъектирования базитов до гранулитов НТ/ЛР типа (M2*, табл. 2, рис. 4).

Рубеж 495 млн лет в пределах Западно-Сангиленского фрагмента коллизионной области ТММ характеризуется коренной сменой геодинамических обстановок и тектонических режимов. Происходит переход синколлизионной транспрессии горно-складчатого сооружения в режим его постколлизионной трансенсии. Следует отметить, что инициация левосторонних субгоризонтальных тектонических движений (рис. 5) происходила не постепенно, а, по геологическим меркам, практически мгновенно. Индикатором этих событий служат глубинные сейсмостектониты, которые «запечатаны» жильными гранитоидами и габбро-гранитными комбинированными дайками, в том числе минглинг-дайкой участка Тавыт-Даг.

Длительный (495–430 млн лет) постколлизионный период трансформно-сдвигового окраинно-континентального растяжения характеризуется

активным базитовым и гранитоидным магматизмом вплоть до рубежа 460 млн лет (табл. 2). Однако коллапс Западно-Сангиленского горно-складчатого сооружения и утонение земной коры на краю Тувино-Монгольского массива продолжался дольше – не менее 60 млн лет (495–430 млн лет) (табл. 2, рис. 3).

3. КОМБИНИРОВАННЫЕ ДАЙКИ УЧАСТКА ТАВЫТ-ДАГ

Комбинированные дайки Западного Сангилен представляют собой отдельные тела и рои даек (сетчатые интрузии), как правило, субширотной ориентировки. Большинство из них приурочено к Эрзинской тектонической зоне, где минглинг-дайки прорывают мигматиты, гранулиты и параавтохтонные гранитоиды эрзинского метаморфического комплекса, граниты Матутского и Баянкольского массивов [Karmysheva et al., 2015; Vladimirov et al., 2016a, 2016b].

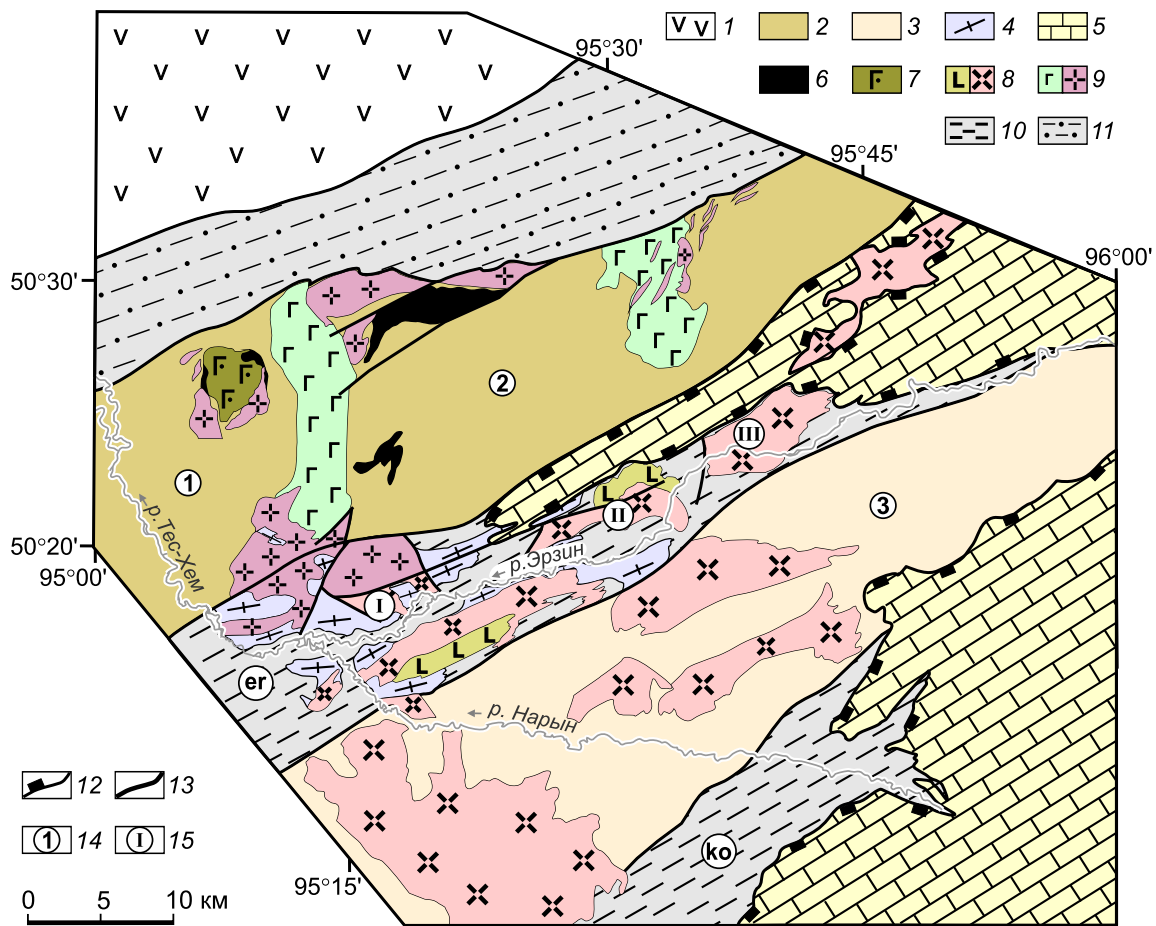


Рис. 2. Геологическая схема Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува) (по [Vladimirov et al., 2005; Karmysheva et al., 2017] с изменениями).

1 – образования Таннуольской островной дуги; метаморфические комплексы (2–4): 2 – мугурский, 3 – нижеэрзинский, 4 – эрзинский; 5 – карбонатно-терригенный чехол (сангиленская серия); магматические комплексы и серии (6–9): 6 – актоврацкий дунит-гарцбургитовый комплекс, 7 – правотарлашкинский анортозит-габброноритовый комплекс, 8 – баянкольский габбро-монцодиорит-граносиенит (гранодиорит)-гранит-лейкогранитный комплекс, 9 – башкымугурский габбро-монцодиорит-гранит-лейкогранитный комплекс; 10 – бластомилониты тектонических зон: (er) Эрзинская, (ko) Кокмолгаргинская; 11 – Агардагский сутурный шов; 12 – границы тектонических покровов; 13 – разломы; 14 – тектонические блоки (1–3): 1 – Тарлашкинский, 2 – Мугуро-Чинчилигский, 3 – Эрзин-Нарынский; 15 – гранитоидные массивы (I–III): I – Матутский гнейсогранитный массив, II – Баянкольский габбро-монцодиорит-гранодиорит-гранитный массив, III – Нижнеулорский гранитный массив.

Fig. 2. Geological scheme of West Sangilen (South-East Tuva, Russia) (after [Vladimirov et al., 2005; Karmysheva et al., 2017], modified).

1 – formations of the Tannuola island arc; metamorphic complexes (2–4): 2 – Mugur, 3 – Nizhny Erzin, 4 – Erzin; 5 – carbonate-terrigenous cover (Sangilen series); magmatic complexes and series (6–9): 6 – Aktovrak dunit-harzburgite complex, 7 – Pravy Tarlashkin anorthosite-gabbronorite complex, 8 – Bayankol gabbro-monzodiorite-granosyenite (granodiorite)-granite-leucogranite complex, 9 – Bashkymugur gabbro-montsodiorite-granite-leucogranite complex; 10 – blastomylonites of tectonic zones: (er) Erzin, (ko) Kokmolgarga; 11 – Agardag suture; 12 – boundaries of tectonic nappes; 13 – faults; 14 – tectonic blocks (1–3): 1 – Tarlashkin, 2 – Mugur-Chinchilig, 3 – Erzin-Naryn; 15 – granitoid massifs (I–III): I – Matut gneiss-granite massif, II – Bayankol gabbro-monzodiorite-granodiorite granite massif, III – Nizhny Ulor granite massif.

3.1. СТРУКТУРНО-ТЕКСТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОД

Минглинг-дайка участка Тавыт-Даг наиболее крупная среди серии габброидных жильных тел, прорывающих гранитоиды на западном фланге Матутского массива (рис. 6). Мелкие тела комбинированных габбро-гранитных интрузий чаще всего здесь представляют «слепые» сигмоидальные

или ячменевидные жилы ~15×50 см. Это указывает на то, что смесь контрастных по составу расплавов пассивно заполняла эшелонированные трещины раскрытия сдвигового типа. Это позволяет уверенно говорить, что источник расплавов находился в непосредственной близости от них.

Минглинг-дайка, выбранная для термохронологического анализа, также представляет собой

Т а б л и ц а 1. Данные изотопных геохронологических исследований магматических и метаморфических пород Западного Сангилен (ЮВ Тува)*
 Table 1. Data based on the isotopic geochronological studies of magmatic and metamorphic rocks of West Sangilen (South-East Tuva, Russia)*

| № | Публикация | Геологическая привязка / комплекс | Анализируемая порода | Минерал | Возраст, млн лет | Ошибки, млн лет | Система / метод |
|----|----------------------------|---|------------------------------|-------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| 1 | [Izokh et al., 2001a] | Агардагский щелочно-базальтоидный комплекс. Щелочные габброиды, Дайка камптонитов | Лампрофиды | Bt | 441.3 | 1.1 | Ar/Ar, Step |
| 2 | [Lebedev et al., 1991] | Мугурский метаморфический комплекс. Авто- и параавтохтонные гнейсограниты | Grt-Crd гнейсограниты | Zrn | 442.0 | 21.0 | U/Pb |
| 3 | [Izokh et al., 2001a] | Агардагский щелочно-базальтоидный комплекс. Щелочные габброиды, Дайка камптонитов | Лампрофиды | Amp | 447.6 | 1.7 | Ar/Ar, Step |
| 4 | [Kozakov et al., 2001] | Таннуольский кварцдиорит-гранодиорит-гранитный комплекс | Qz-Bt-Hbl диориты | Zrn | 457.0 | 2.9 | U/Pb |
| 5 | [Travin et al., 2006] | Мугурский метаморфический комплекс, участок Тарлашкинхемский | Анд сланец | Bt | 462.1 | 3.4 | Ar/Ar, Step |
| 6 | Данная публикация | Комбинированная дайка, участок Тавыт-Даг | Гранит | Bt | 462.5 | 1.0 | Ar/Ar, Step |
| 7 | [Varabash et al., 2007] | Мугурский метаморфический комплекс | Grt-Bt сланцы | Bt | 462.9 | 3.2 | Ar/Ar, Step |
| 8 | [Varabash et al., 2007] | Мугурский метаморфический комплекс | Grt-Bt сланцы | Bt | 463.6 | 3.2 | Ar/Ar, Step |
| 9 | [Petrova, 2001] | Башкымугурский габбро-монцодиоритовый комплекс | Кварцевый монцодиорит | Pl, Amp, Орх, Срх, Bt, порода | 464.0 | 5.0 | Rb/Sr |
| 10 | [Petrova, Kostitsyn, 2001] | Дайка кварцевых диоритов в мугурском метаморфическом комплексе | Кварцевые диориты | Порода | 464.0 | 5.0 | Rb/Sr |
| 11 | [Udin et al., 2002] | Мугурский метаморфический комплекс, участок Ак-Даг | Gr-Bt сланец | Bt | 464.0 | 1.0 | Ar/Ar, LA |
| 12 | [Kozakov et al., 1999b] | Башкымугурский габбро-монцодиоритовый комплекс | Qz-Нур монцодиорит | Zrn | 464.6 | 5.7 | U/Pb |
| 13 | [Travin et al., 2006] | Мугурский метаморфический комплекс, участок Тарлашкинхемский | Mu-St сланец | Ms | 464.7 | 2.6 | Ar/Ar, Step |
| 14 | [Izokh et al., 2001b] | Башкымугурский габбро-монцодиоритовый комплекс | Qz монцодиорит | Bt | 465.0 | 1.2 | Ar/Ar, Step |
| 15 | [Travin et al., 2006] | Мугурский метаморфический комплекс, участок Тарлашкинхемский | Анд сланец | Bt | 465.2 | 2.6 | Ar/Ar, Step |
| 16 | [Petrova, 2001] | Комбинированная дайка | Гранитоиды и базиты | Порода | 467.0 | 21.0 | Rb/Sr |
| 17 | [Travin et al., 2006] | Мугурский метаморфический комплекс, участок Тарлашкинхемский | Нур сланец | Bt | 467.2 | 2.5 | Ar/Ar, Step |
| 18 | [Petrova, Kostitsyn, 1997] | Эрзинский метаморфический комплекс | Crd-содержащие Grt-Bt гнейсы | Порода | 468.0 | 6.0 | Rb/Sr |

Таблица 1 (продолжение)
Table 1 (continued)

| № | Публикация | Геологическая привязка / комплекс | Анализируемая порода | Минерал | Возраст, млн лет | Ошибка, млн лет | Система / метод |
|----|----------------------------|--|----------------------------------|--------------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| 19 | [Travin et al., 2006] | Эрзинский метаморфический комплекс, зона контактового метаморфизма Баянкольского массива | Grt-And сланец | Bt | 468.1 | 5.4 | Ar/Ar, Step |
| 20 | [Travin et al., 2006] | Мугурский метаморфический комплекс, участок Тарлашкинхемский | Mu-St сланец | Bt | 468.4 | 2.4 | Ar/Ar, Step |
| 21 | [Petrova, Kostitsyn, 1997] | Комбинированная дайка | Аляскиты | Порода | 468.6 | 12.0 | Rb/Sr |
| 22 | [Travin et al., 2006] | Мугурский метаморфический комплекс, участок Тарлашкинхемский | Sil сланец | Bt | 468.9 | 3.1 | Ar/Ar, Step |
| 23 | [Petrova, 2001] | Эрзинский метаморфический комплекс | Мигматиты | Pl, Fsp, Grt, Bt, порода | 469.0 | 8.0 | Rb/Sr |
| 24 | [Petrova, 2001] | Мугурский метаморфический комплекс | Grt-Ku сланцы | Bt, Ms, Pl, порода | 471.0 | 4.0 | Rb/Sr |
| 25 | [Travin et al., 2006] | Мугурский метаморфический комплекс, участок Тарлашкинхемский | Mu-St сланец | Bt | 471.0 | 2.6 | Ar/Ar, Step |
| 26 | [Petrova, Kostitsyn, 2001] | Ухадагский гранитный комплекс | Граниты | Порода | 471.0 | 10.0 | Rb/Sr |
| 27 | Данная публикация | Комбинированная дайка, участок Тавыт-Даг | Габбро | Amp | 471.2 | 1.9 | Ar/Ar, Step |
| 28 | [Petrova, Kostitsyn, 2001] | Матутский гранитоидный комплекс | Гранит | Порода | 472.0 | 6.0 | Rb/Sr |
| 29 | [Travin et al., 2006] | Эрзинский метаморфический комплекс, зона контактового метаморфизма Баянкольского массива | Grt-And сланец | Bt | 472.8 | 5.6 | Ar/Ar, Step |
| 30 | [Petrova, Kostitsyn, 2001] | Байдагский меланогранит-гранит-лейкогранитный комплекс | Гранит | Порода | 473.0 | 7.0 | Rb/Sr |
| 31 | [Petrova, 2001] | Тесхемский субщелочной граносиенит-гранит-лейкогранитный комплекс | Гранит | Порода | 473.0 | 7.0 | Rb/Sr |
| 32 | [Petrova, 2001] | Мугурский метаморфический комплекс. Орто- и парапороды | Мигматитовая лейко- и меланосома | Pl, Bt, порода | 474.0 | 3.0 | Rb/Sr |
| 33 | [Petrova, 2001] | Нижнеулорский лейкогранит-гранитный комплекс | Плагиограниты | Порода | 474.0 | 3.0 | Rb/Sr |
| 34 | [Petrova, Kostitsyn, 2001] | Баянкольский массив габбро-диорит-гранодиорит-гранитного состава | Гранит | Порода | 476.0 | 8.0 | Rb/Sr |
| 35 | [Petrova, Kostitsyn, 2001] | Нижнеулорский лейкогранит-гранитный комплекс | Плагиограниты | Pl, Fsp, Bt, порода | 476.0 | 6.0 | Rb/Sr |
| 36 | [Mongush et al., 2014] | Чон-Саирский офиолитовый массив | Плагиограниты | Zrn | 477.0 | 5.0 | U/Pb, SHRIMP II |

Таблица 1 (продолжение)
Table 1 (continued)

| № | Публикация | Геологическая привязка / комплекс | Анализируемая порода | Минерал | Возраст, млн лет | Ошибка, млн лет | Система / метод |
|----|----------------------------|--|----------------------------|---------|------------------|-----------------|-----------------|
| 37 | [Travin et al., 2006] | Мугурский метаморфический комплекс | Grt-Ky-St сланец | Bt | 478.7 | 6.2 | Ar/Ar, Step |
| 38 | [Kozakov et al., 2001] | Тесемский субщелочной граносиенит-гранит-лейкогранитный комплекс | Лейкокрацовые граносиениты | Zrn | 480.0 | 5.4 | U/Pb |
| 39 | [Vladimirov et al., 2005] | Нижнеулуорский лейкогранит-гранитный комплекс | Плагиограниты | Bt | 480.7 | 1.8 | Ar/Ar |
| 40 | [Travin et al., 2006] | Мугурский метаморфический комплекс | Grt-Ky-St сланец | Ms | 482.9 | 6.1 | Ar/Ar, Step |
| 41 | [Petrova, Kostitsyn, 2001] | Эрзинский габбро-монциодоритовый комплекс | Лейкокрацовые граниты | Порода | 486.0 | 10.0 | Rb/Sr |
| 42 | [Izokh et al., 2001b] | Баянкольский массив габбро-диорит-гранодиорит-гранитного состава | Меланогаббро-норит | Amf | 489.0 | 3.0 | Ar/Ar, Step |
| 43 | Данная публикация | Магутский гранитоидный комплекс, участок Тавыт-Даг | Гранит | Bt | 489.0 | 18.0 | Ar/Ar, Step |
| 44 | [Kozakov et al., 2001] | Чжаргалантский гранит-лейкогранитный комплекс. Дайка | Amf граниты | Zrn | 489.0 | 3.1 | U/Pb |
| 45 | [Kozakov et al., 1999b] | Чжаргалантский гранит-лейкогранитный комплекс. Дайка | Лейкокрацовые граниты | Zrn | 489.4 | 2.6 | U/Pb |
| 46 | [Burmakina et al., 2016] | Комбинированная дайка, участок Тавыт-Даг | Гранит | Zrn | 489.7 | 7.0 | U/Pb, LA-ICP-MS |
| 47 | [Petrova, Kostitsyn, 2001] | Эрзинский габбро-монциодоритовый комплекс | Кварцевые монциодориты | Порода | 490.0 | 9.5 | Rb/Sr |
| 48 | [Kozakov et al., 1999b] | Эрзинский габбро-монциодоритовый комплекс | Нур кварцевый диорит | Zrn | 491.6 | 9.5 | U/Pb |
| 49 | [Kozakov et al., 2001] | Эрзинский метаморфический комплекс. Дайка | Нур трондземит | Zrn | 494.0 | 11.0 | U/Pb |
| 50 | [Burmakina et al., 2016] | Комбинированная дайка, участок Тавыт-Даг | Монцогаббродиорит | Zrn | 494.8 | 5.4 | U/Pb, LA-ICP-MS |
| 51 | [Kozakov et al., 2001] | Баянкольский массив габбро-диорит-гранодиорит-гранитного состава | Гиперстеновый диорит | Zrn | 496.5 | 3.6 | U/Pb |
| 52 | [Travin et al., 2006] | Мугурский метаморфический комплекс, участок Тарлашкинхемский | Mu-St сланец | Hbl | 500.4 | 7.3 | Ar/Ar, Step |
| 53 | [Kozakov et al., 1999a] | Баянкольский массив габбро-диорит-гранодиорит-гранитного состава | Bt гранодиорит | Zrn | 507.0 | 14.0 | U/Pb |
| 54 | [Travin et al., 2006] | Мугурский метаморфический комплекс, участок Тарлашкинхемский | Sl сланец | Hbl | 507.5 | 10.7 | Ar/Ar, Step |
| 55 | [Burmakina et al., 2016] | Магутский гранитоидный комплекс, участок Тавыт-Даг | Гранит | Zrn | 509.0 | 4.0 | U/Pb, LA-ICP-MS |

Таблица 1 (окончание)
Table 1 (end)

| № | Публикация | Геологическая привязка / комплекс | Анализируемая порода | Минерал | Возраст, млн лет | Ошибка, млн лет | Система / метод |
|----|--------------------------|---|------------------------|---------|------------------|-----------------|-----------------|
| 56 | [Travin et al., 2006] | Мугурский метаморфический комплекс | Grt-Ky-St сланец | Amp | 511.1 | 6.1 | Ar/Ar, Step |
| 57 | [Travin et al., 2006] | Мугурский метаморфический комплекс | Grt-Ky-St сланец | Amp | 511.6 | 4.9 | Ar/Ar, Step |
| 58 | [Travin et al., 2006] | Мугурский метаморфический комплекс, участок Ак-Даг | Mu-St сланец | Amp | 513.1 | 5.0 | Ar/Ar, Step |
| 59 | [Kozakov et al., 1999a] | Орто-Адырский комплекс. Вт и двуслюдяные тоналиты, гранодиориты | Вт тоналиты | Zrn | 521.0 | 12.0 | U/Pb |
| 60 | [Izokh et al., 2001b] | Правогарлашкинский троктолит-анортозит-габбровый комплекс | Ol габбро | Amp | 524.0 | 9.0 | Ar/Ar, Step |
| 61 | [Kozakov et al., 1999a] | Орто-Адырский [мугурский] комплекс. Вт и двуслюдяные тоналиты, гранодиориты | Лейкокраповые тоналиты | Zrn | 536.0 | 5.7 | U/Pb |
| 62 | [Pfähnder et al., 1999] | Агардагская шовная зона. Офиолиты | Дайка | Zrn | 569.0 | 1.1 | U/Pb |
| 63 | [Burtakina et al., 2016] | Комбинированная дайка, участок Сайзырал | Лейкогранит | Zrn | 775.0 | | U/Pb, LA-ICP-MS |
| 64 | [Burtakina et al., 2016] | Комбинированная дайка, участок Сайзырал | Лейкогранит | Zrn | 850.0 | | U/Pb, LA-ICP-MS |
| 65 | [Lebedev et al., 1991] | Мугурский метаморфический комплекс | Grt-Bt гранитогнейсы | Zrn | 1130.0 | 16.0 | U/Pb |

Примечание * – сокращения минералов здесь и в тексте приведены по [Whitney, Evans, 2010].

Note * - the names of minerals in this table and the text are abbreviated according to [Whitney, Evans, 2010].

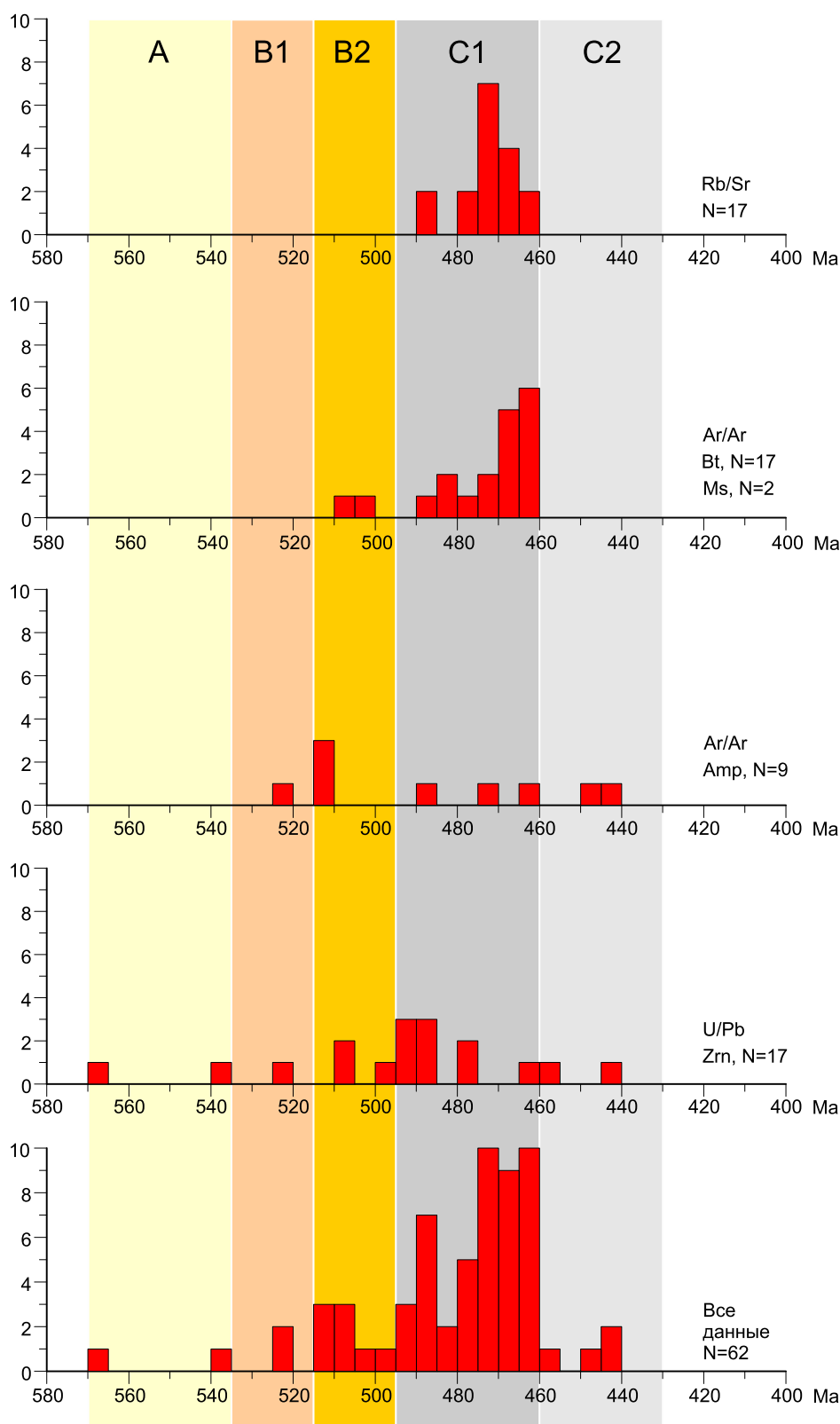


Рис. 3. Гистограммы изотопно-геохронологических данных (см. табл. 1), отражающих основные рубежи эволюции Западно-Сангиленского коллизионного горно-складчатого сооружения (табл. 2).

A – аккреционно-субдукционный период (570–535 Ma); B – коллизионный период (B1 – ранняя стадия, 535–515 Ma; B2 – поздняя стадия, 515–495 Ma); C – постколлизионный период (C1 – ранняя стадия, 495–460 Ma; C2 – поздняя стадия, 460–430 Ma).

Fig. 3. Histograms of the isotope-geochronological data (see Table 1) showing the main stages in the evolution of West Sangilen collisional mountain-folded structure (Table 2).

A – accretion-subduction period (570–535 Ma); B – collision period: B1 – early stage (535–515 Ma), B2 – late stage (515–495 Ma); C – post-collision period: C1 – early stage (495–460 Ma), C2 – late stage (460–430 Ma).

Т а б л и ц а 2. Эволюция ранних каледонид Западного Сангилен (по [Vladimirov et al., 2005] с упрощениями и изменениями)
 Table 2. Evolution of the early caledonides of West Sangilen (after [Vladimirov et al., 2005], simplified and modified)

| ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ОБСТАНОВКИ И ПЕРИОДЫ | РУБЕЖИ, млн лет | ТЕКТОНИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ | МЕТАМОРФИЗМ * локальный (в т.ч. контактовый) | МАГМАТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ | |
|---|--------------------|--|---|---|--|
| Растяжение (транстенсия) | 430 | доминирование деформаций сдвигового генезиса: дальнейшее растяжение и утончение земной коры | | трахидолеритовая агардагский щелочно-базальтоидный кокмолагаргинский (таннуольский) диорит-тоналит-гранитный | |
| | | | | | |
| | 460 | смена кинематики деформаций от взбросовой на левосдвиговую, активная фрагментация и трансформно-сдвиговое растяжение земной коры | M3 гранулиты HT/LP типа | башкымугурский габбро-монциодоритовый кызылдагский гранит-лейкогранитный минглинг-дайки (?) | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| 480 | | M3 эпидот-амфиболитовая фаза умеренных давлений (Bt-Mu-And-Sil ассоциации) | нижнеулорский адамеллит-гранитный байдагский меланогранит-гранит-лейкогранитный чжаргалантский гранит-лейкогранитный | | |
| | | | | | |
| 495 | | | тесхемский субщелочной граносиенит-гранит- лейкогранитный МИНГЛИНГ-ДАЙКИ | | |
| Коллизийный период | 510 | заложение проникающих тектонических зон и формирование Сангиленской сдвиговой системы (Эрзинская и Кокмолагаргинская) внутриконтинентального типа | M2 «фронтальне» гранулиты и M2* гранулиты HT/LP типа | хорумугуский гранит-лейкогранитный | |
| | | | M2 амфиболитовая фаза умеренных давлений (And-Sil-Fsp ассоциации) | матугский субщелочной гранит-лейкогранитный эрзинский габбро-монциодоритовый баянкольский субщелочной граносиенит-гранит-лейкогранитный | |
| | 515 | | M1 прогрессивный от зелено- сланцевой до верхов эпидот-амфиболитовой фазы повышенных давлений (St-Ku ассоциации) | правотарлашкинский троктолит-анортосит-габбровый | |
| Косоугловое сжатие (транспрессия) | 535 | интенсивный рост горно- складчатого сооружения («запирание» субдукции и удвоение коры, надвиги и складчатость) | | плагмограниты-трондьеимиты ортоагардский тоналит-плагмогранитный | |
| | | | | | |
| 570 | | пликативные структуры, надвиги, заложение и формирование структур Агардагской сuture и ее обрамления | | карашатский перидотит-пироксенит-габбровый акдовурагский дунит-гарцбургитовый солчерский дунит-гарцбургитовый кускунугский островодужно-толеитовый | |

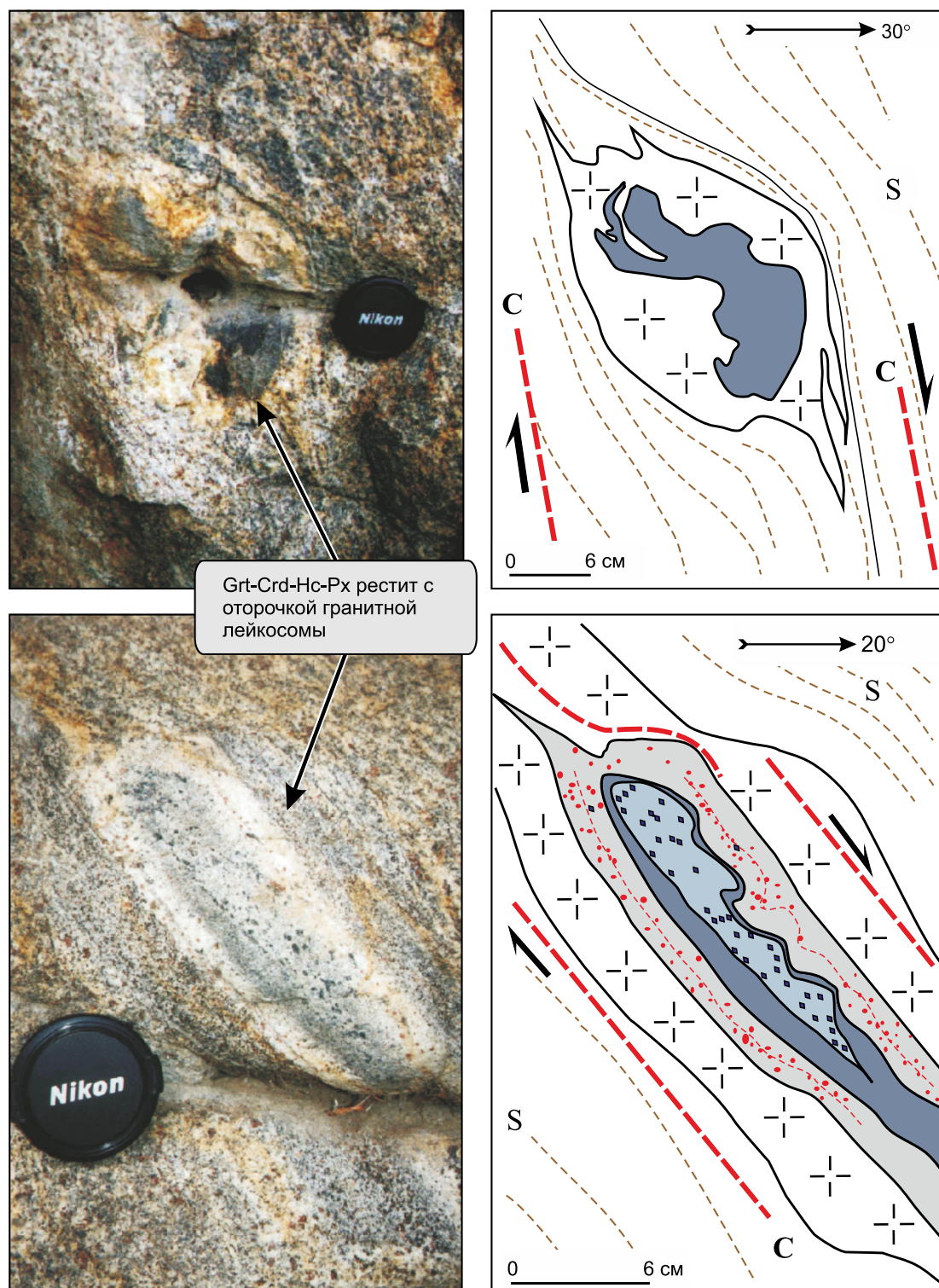


Рис. 4. Синкинематический диатексис и будинирование высокоглиноземистых горизонтов в метаморфических породах эрзинского комплекса (восточный контакт Матутского гранитоидного массива).

Вертикальный срез обнажения, перпендикулярный плоскостям скалывания и параллельный минеральной линейности растяжения в породе. Кинематические индикаторы C/S-типа указывают на взбросовую кинематику деформаций. Минеральная зональность внутри будин является результатом метаморфических преобразований и свидетельствует о синхронности протекания тектонических и метаморфических процессов.

Fig. 4. Synkinematic diatexis and boudinage of high-aluminum horizons in the metamorphic rocks of the Erzin complex (the eastern contact of the Matut granitoid massif).

The vertical section of the outcrop is perpendicular to the shearing planes and parallel to the mineral linearity of extension in the rock. Kinematic C/S indicators show reverse faulting. The mineral zonation inside the boudins results from metamorphic transformations and gives evidence of the synchronic occurrence of tectonic and metamorphic processes.

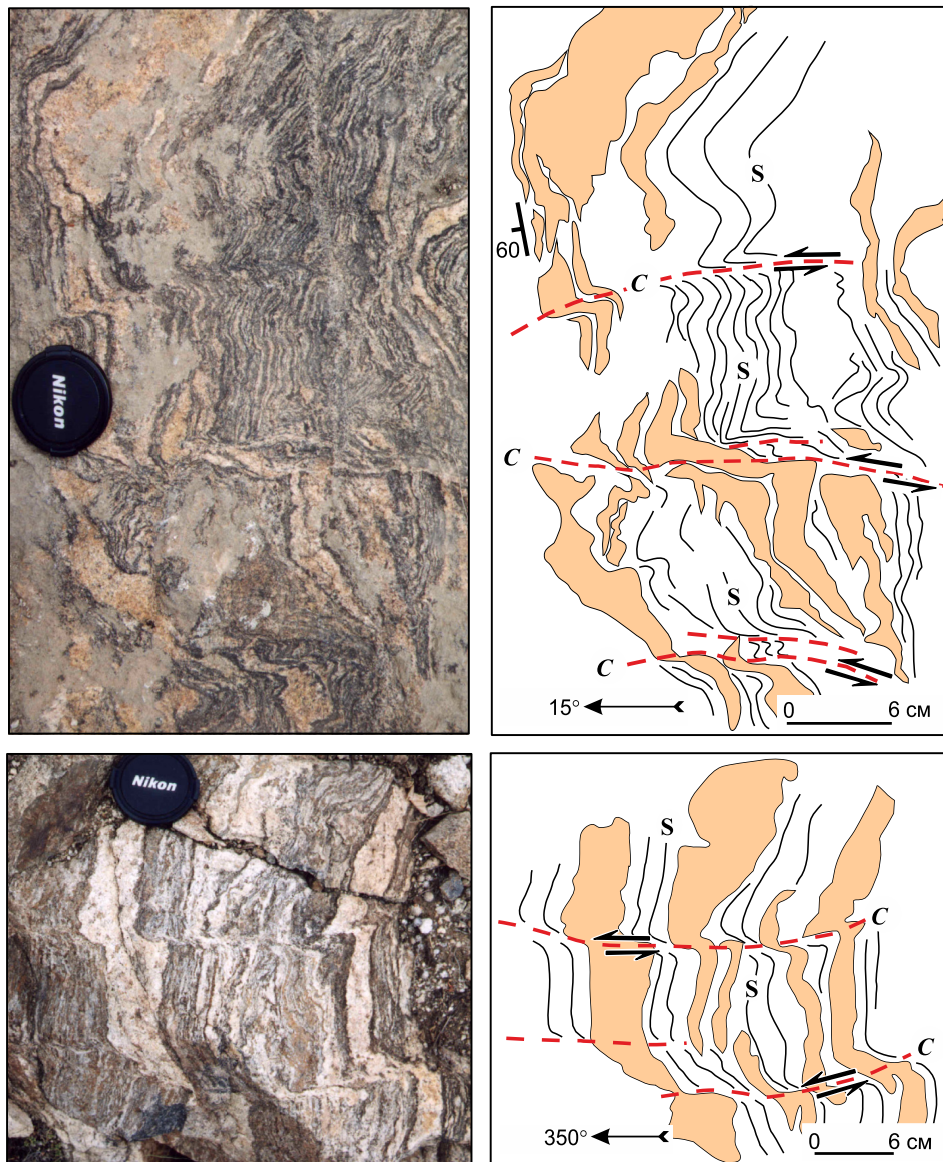


Рис. 5. Поздние наложенные левосдвиговые деформации в мигматитах эрзинского метаморфического комплекса.

Фрагменты опорного обнажения на правом берегу реки Эрзин вблизи одноименного поселка. Горизонтальный срез обнажения, перпендикулярный плоскостям скальвания и параллельный минеральной линейности растяжения в породе. Кинематические индикаторы C/C'/S-типа указывают на левостороннюю кинематику деформаций.

Fig. 5. Recent superimposed left-lateral strike-slip deformation in migmatites of the Erzin metamorphic complex.

Fragments of the reference outcrop on the right bank of the Erzin river near the settlement of the same name. The horizontal section of the outcrop is perpendicular to the shearing planes and parallel to the mineral linearity of extension in the rock. Kinematic C/C'/S indicators show left-lateral kinematics of deformations.

«слепое» жильное тело (рис. 6). Наиболее крупный скальный выход (рис. 6, 7) позволяет говорить, что это плитообразное в своей центральной части тело, круто падающее на север под углом 70° (рис. 7). В западном направлении дайка начинает выклиниваться и расщепляться на габброидные жилы (рис. 8, Г.7, 8).

Признаки механического смешения контрастных расплавов многочисленны, особенно в осевой и верхней части тела (рис. 8). Здесь можно наблю-

дать перистые и пламенивидные контакты (рис. 8, А.1, В.5), элементы всплывания или выдавливания основного расплава (рис. 8, А.2), сочетание фрагментации габброидов и пассивного заполнения пространства кислым расплавом (рис. 8, Б.3, 4).

Наличие элементов выдавливания основного расплава (рис. 8, А.2) и структур волочения (рис. 8, В.6) указывает, что заполнение трещин растяжения комбинированным расплавом происходило синхронно с деформациями. На это же указывают

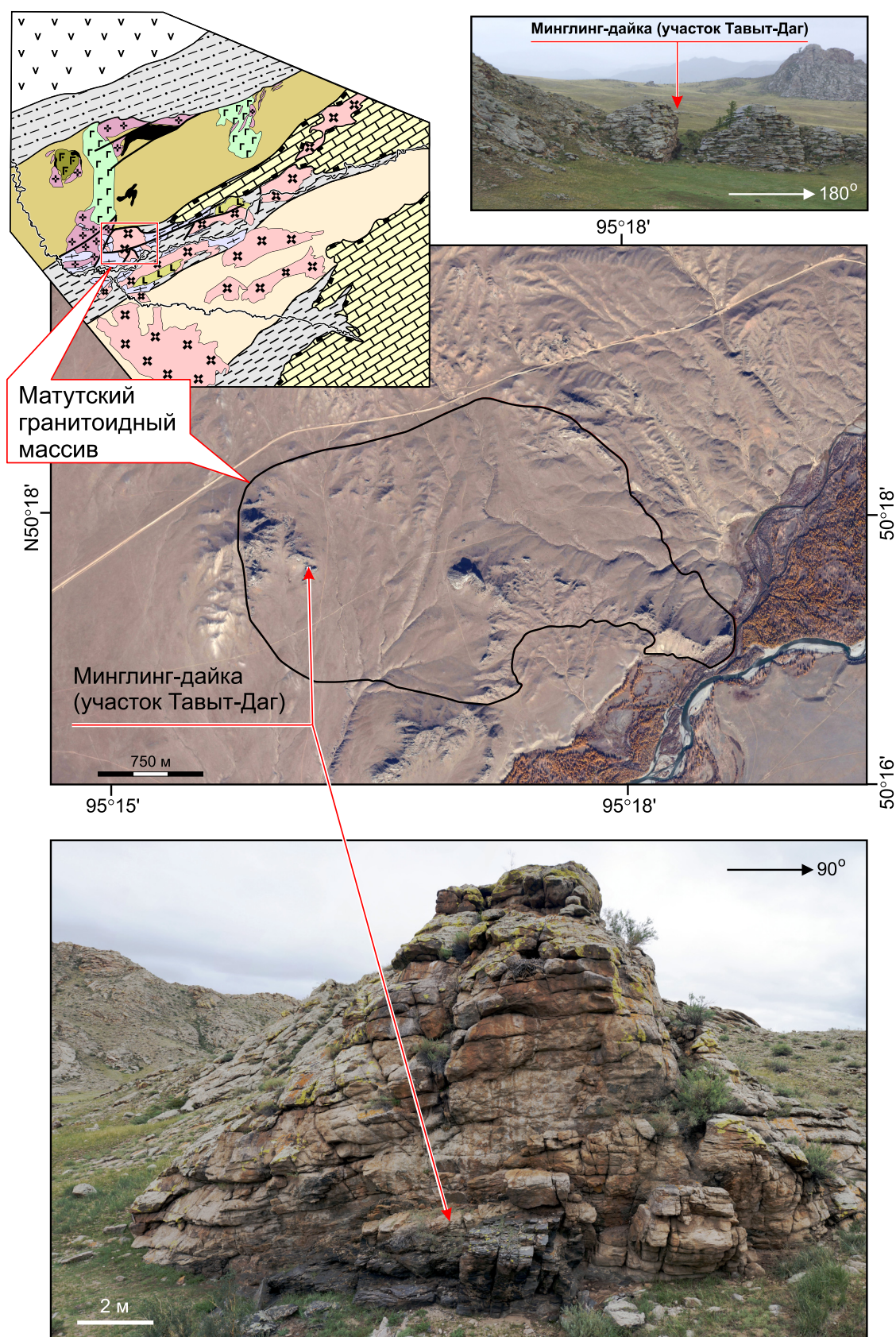


Рис. 6. Положение минглинг-дайки участка Тавыт-Даг в эндоконтактовой зоне Матутского гранитоидного массива. На врезках сверху и внизу показан общий вид обнажения. Координаты обнажения: N50.29689 E95.26916. Контуры Матутского гранитоидного массива показаны на снимках сервиса Microsoft Bing Maps.

Fig. 6. Position of the mingling dyke of the Tavyt-Dag site in the endocontact zone of the Matut granitic massif. The insets give the general view of the outcrop (N50.29689, E95.26916). The Matut granitoid massif is marked on the images provided by Microsoft Bing Maps.

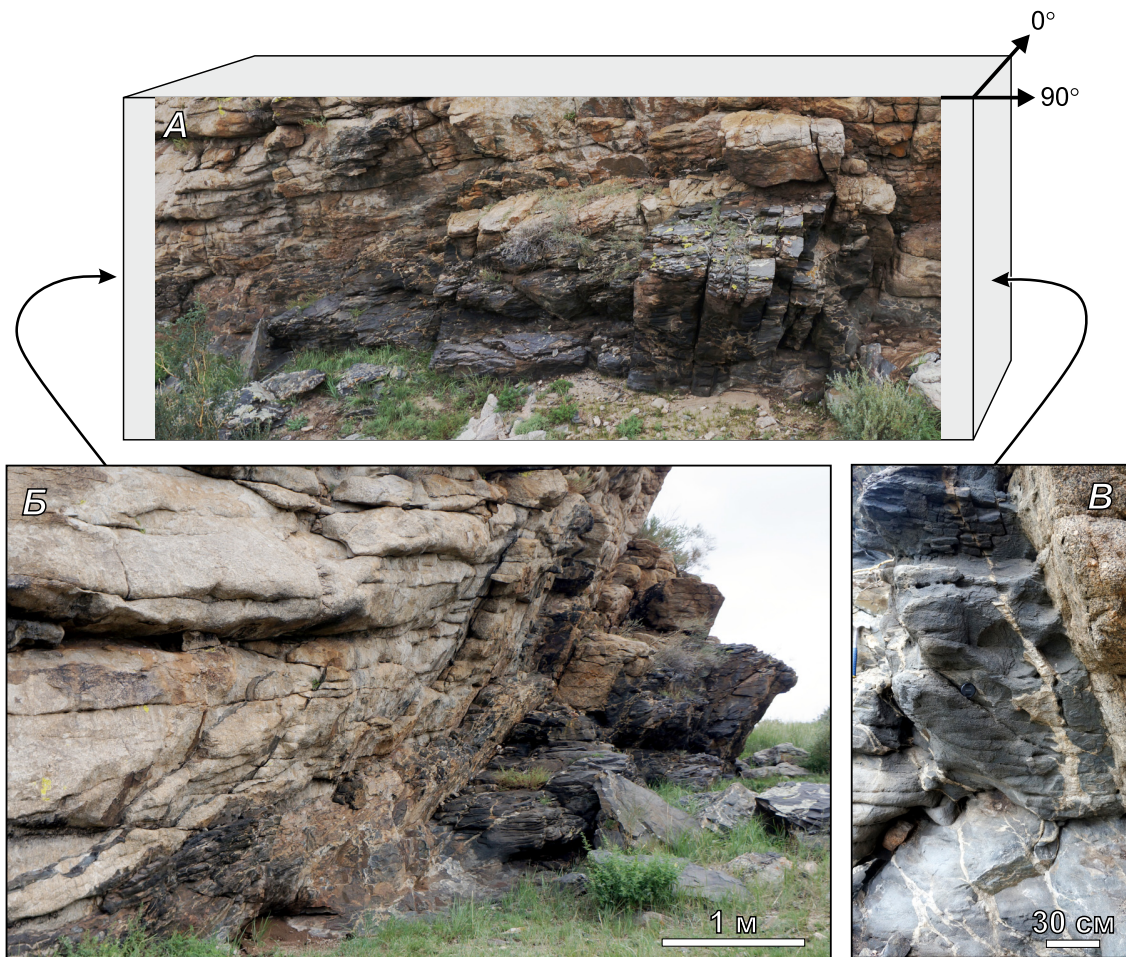


Рис. 7. Геологическое строение минглинг-дайки участка Тавыт-Даг. *A* – вид фронтальной субширотной стенки комбинированной дайки; *Б* – сечение минглинг дайки с запада; *В* – сечение минглинг дайки с востока. Пояснения в тексте.

Fig. 7. Geological structure of the mingling dyke on the Tavyt-Dag site. *A* – view of the frontal sublatitudinal wall of the combined dyke; *B* – section of the mingling dyke from the west; *B* – section of the mingling dyke from the east. See explanations in the text.

элементы сдвиговых структур взбросового характера в поперечном сечении дайки – гранитные прожилки заполняют структуры сдвигового генезиса C/C' и $C/C'/S$ типов (см. рис. 7, *B*).

3.2. ВМЕЩАЮЩИЕ ГРАНИТОИДЫ МАТУТСКОГО МАССИВА

Комбинированные дайки участка Тавыт-Даг прорывают гранитоиды Матутского массива (см. рис. 2, 7, 8). Это порфирированные крупнозернистые граниты с отчетливо выраженной директивной структурой (рис. 8, *Г*), фиксируемой по ориентировке порфирированных вкрапленников калиевого полевого шпата размером до 2 см. Распределение порфирированных выделений в теле Матутского массива неоднородно, что, скорее всего, связано с его становлением при заложении Эрзинской тектонической зоны. Это же обстоятельство объясняет высо-

кие вариации состава гранитов, в первую очередь, по содержанию K_2O (рис. 9, табл. 3) [Karmysheva et al., 2017]. Среднее содержание петрогенных элементов указано в таблице 3. Состав гранитов варьируется от умеренно-щелочных до низкощелочных (рис. 9).

3.3. СОСТАВ ГРАНИТОИДНОЙ ЧАСТИ МИНГЛИНГ-ДАЙКИ

Как было отмечено выше, состав калиевого полевого шпата минглинг-дайки Тавыт-Даг несущественно отличается от состава вмещающих пород (рис. 9, табл. 3, 4). Поскольку субстратом гранитоидов комбинированной дайки могут быть граниты Матутского массива, повторное плавление (реоморфизм) последних без участия всего объема КППШ может еще более отчетливо привести к смещению составов в сторону с пониженным содержанием

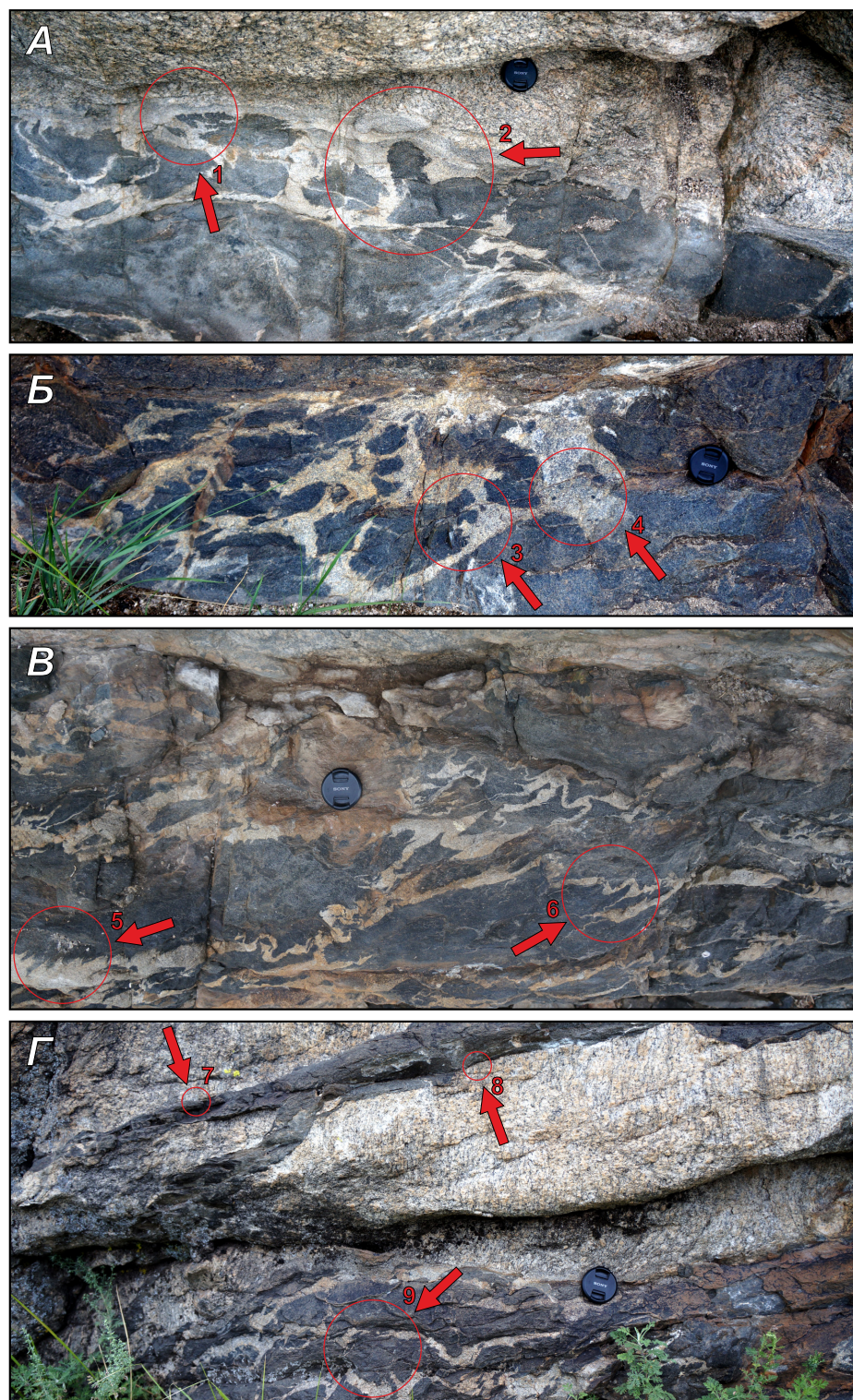


Рис. 8. Структуры магматического минглинга в комбинированной дайке участка Тавыт-Даг.

A.1 – контакт базитового тела, приобретающий перистый конформный характер, подобно контакту с гранитами Матутского массива; *A.2* – элемент всплывания или выдавливания основного расплава в механической смеси; *B.3–B.4* – фрагментация базитовых фрагментов с пассивным заполнением пространства кислым расплавом; *B.5* – пламеневидный характер контакта контрастных расплавов; *B.6* – признаки волочения и течения, указывающие на продолжающиеся деформации; *Г.7–Г.9* – сочетание жильных моно-габбродных тел, секущих граниты Матутского массива, и комбинированных минглинг-тел.

Fig. 8. Magmatic mingling structures in the combined dyke on the Tavyt-Dag site.

A.1 – contact of the basite body, which acquires the feathering shape similar to the contact with granites of the Matut massif; *A.2* – element of rising or extrusion of the basic melt in the mechanical mixture; *B.3–B.4* – fragmentation of basite fragments with passive filling with the acid melt; *B.5* – flame-shaped contact of the contrasting melts; *B.6* – drag and flow marks that are indicative of continued deformation; *Г.7–Г.9* – combination of vein-shaped mono-gabbroid bodies (cutting the granites of the Matut massif) and combined mingling bodies.

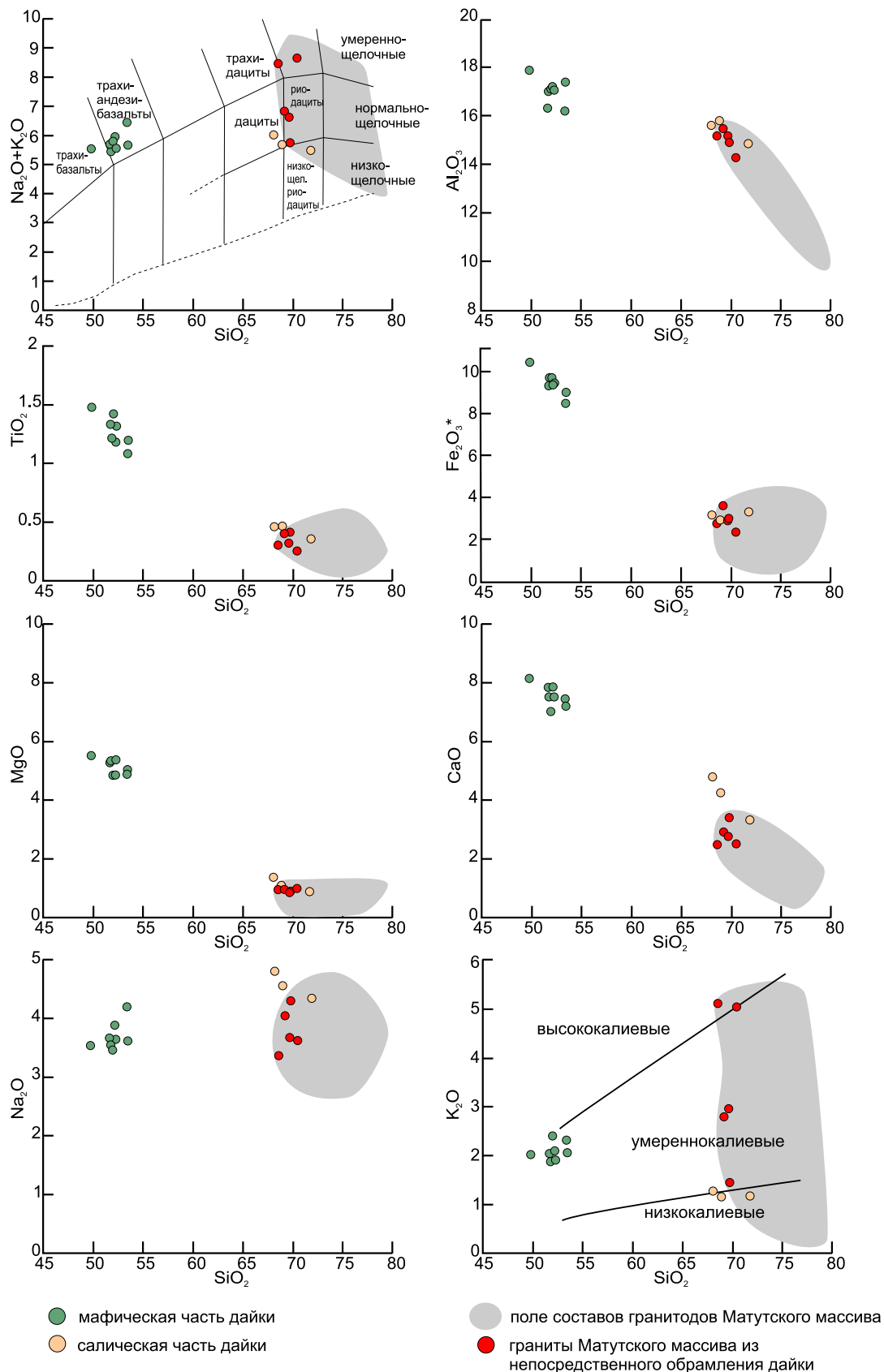


Рис. 9. TAS-диаграмма и диаграммы Харкера для базитов и гранитов комбинированной дайки участка Тавыт-Даг. Для диаграммы $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ классификационные границы по [Petrographic Code..., 2009]; для диаграммы $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ классификационные границы по [Le Maitre et al., 1989].

Fig. 9. TAS-diagram and Harker diagrams for basites and granites of the combined dyke on the Tavyt-Dag site. Classification boundaries are shown after [Petrographic Code..., 2009] for the $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ diagram, and after [Le Maitre et al., 1989] for the $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ diagram.

Т а б л и ц а 3. Содержание петрогенных оксидов (мас. %) в гранитоидах Матутского массива

T a b l e 3. Content of petrogenic oxides (wt. %) in granitoids of the Matut massif

| № образца | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ (общ.) | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | п.п.п | Сумма |
|------------------------|------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------------------|------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|-------|--------|
| Y69-5 | 69.23 | 0.41 | 15.50 | 3.64 | 0.05 | 0.96 | 2.93 | 4.05 | 2.79 | 0.21 | 0.47 | 99.96 |
| ER-03/1a-15 | 69.80 | 0.42 | 15.20 | 3.04 | 0.05 | 0.90 | 3.42 | 4.31 | 1.45 | 0.19 | 0.70 | 99.36 |
| ER-03a-15 | 70.50 | 0.26 | 14.30 | 2.39 | 0.05 | 0.99 | 2.53 | 3.63 | 5.04 | 0.12 | 0.59 | 100.30 |
| ER-03-15 | 68.60 | 0.31 | 15.20 | 2.80 | 0.07 | 0.95 | 2.50 | 3.37 | 5.11 | 0.15 | 0.44 | 99.36 |
| ER-03/5-15 | 69.70 | 0.33 | 15.20 | 2.93 | 0.13 | 0.86 | 2.78 | 3.68 | 2.96 | 0.15 | 1.05 | 99.62 |
| X _{av} (n=22) | 72.02 | 0.29 | 14.02 | 2.41 | 0.07 | 0.75 | 2.06 | 3.70 | 3.83 | 0.10 | | |
| min | 68.60 | 0.07 | 9.86 | 0.42 | 0.02 | 0.10 | 0.37 | 2.72 | 0.28 | 0.02 | | |
| max | 79.30 | 0.61 | 15.67 | 4.51 | 0.14 | 4.17 | 3.53 | 5.44 | 5.45 | 0.21 | | |

П р и м е ч а н и е. В таблице приведены представительные анализы из проб, отобранных в непосредственном обрамлении дайки, и средние значения (X_{av}) в целом Матутского массива.

N o t e. This table shows the data based on the representative analysis of the samples taken directly from the dyke's frame and average values (X_{av}) for the Matut massif.

K₂O. Это отчетливо наблюдается на рис. 9, где для сравнения приведены составы гранитов Матутского массива (поля серого цвета) и составы гранитов комбинированной дайки. Значения анализов из образцов салической части дайки и гранитов из непосредственного обрамления дайки сближены и на диаграмме расположены в крайних частях полей составов, отвечающих Матутскому массиву.

Гранитоиды минглинг-дайки представлены мелкозернистыми плагиогранитами (Qtz – 40–45 %, Pl – 45–50 %, Bt – 7–10 %). Среднее содержание петрогенных элементов представлено в таблице 4. Граниты относятся к нормально-щелочному ряду (рис. 9).

Салическая часть комбинированной дайки незначительно отличается от вмещающих гранитов как по минералогическому составу, так и по структурно-текстурным характеристикам. Это линейные структуры, директивность обусловлена расположением призматических агрегатов плагиоклаза и лейст биотита.

Следует отметить, что для всех типов контактов гранитов и базитов комбинированной дайки не характерны зоны переходного состава и контактовых

изменений, указывающих на возможное химическое взаимодействие контрастных расплавов (миксинг). Это косвенно может говорить о том, что их внедрение и становление происходило практически одновременно.

3.4. Состав базитовой части минглинг-дайки

В общем объеме дайки преобладают основные породы (80–90 %), гранитоиды же заполняют пространство между фрагментами базитов, образуя сетчатую структуру. В центральной части тела блоки базитов достигают в длину двух метров и более, в краевой же – не превышают нескольких десятков сантиметров.

Структура основных пород габбровая с заметно выраженной линейностью, сложенной лейстами биотита. Акцессорные минералы представлены сфеном, апатитом, цирконом. Роговая обманка распределена в породе неравномерно, чаще всего слагает гломероскопления с ситовидной структурой. На контактах с салической частью дайки иногда наблюдаются линейно вытянутые вдоль контакта призматические агрегаты роговой обманки и плагиоклаза.

Т а б л и ц а 4. Содержание петрогенных оксидов (мас. %) в гранитоидах комбинированной дайки участка Тавыт-Даг

T a b l e 4. Content of petrogenic oxides (wt. %) in granitoids of the combined dyke on the Tavyt-Dag site

| № образца | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ (общ.) | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | п.п.п | Сумма |
|-----------------|------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------------------|------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|-------|--------|
| Y-69-10 | 71.79 | 0.36 | 14.86 | 3.30 | 0.03 | 0.86 | 3.31 | 4.30 | 1.18 | 0.17 | 0.85 | 100.24 |
| ER-03/8-15 | 68.90 | 0.46 | 15.80 | 2.91 | 0.03 | 1.07 | 4.26 | 4.51 | 1.17 | 0.15 | 0.62 | 99.72 |
| ER-03/9-15 | 68.10 | 0.46 | 15.60 | 3.15 | 0.03 | 1.36 | 4.79 | 4.75 | 1.27 | 0.20 | 0.67 | 100.21 |
| X _{av} | 69.60 | 0.43 | 15.42 | 3.12 | 0.03 | 1.10 | 4.12 | 4.52 | 1.21 | 0.17 | | |
| min | 68.10 | 0.36 | 14.86 | 2.91 | 0.03 | 0.86 | 3.31 | 4.30 | 1.17 | 0.15 | | |
| max | 71.79 | 0.46 | 15.80 | 3.30 | 0.03 | 1.36 | 4.79 | 4.75 | 1.27 | 0.20 | | |

Таблица 5. Содержание петрогенных оксидов (мас. %) в габброидах комбинированной дайки участка Тавыт-Даг

Table 5. Content of petrogenic oxides (wt. %) in gabbroids of the combined dyke on the Tavyt-Dag site

| № образца | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ (общ.) | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | п.п.п | Сумма |
|-----------------|------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------------------|------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|-------|--------|
| Y-69-12 | 49.82 | 1.47 | 17.87 | 10.47 | 0.17 | 5.51 | 8.16 | 3.50 | 2.05 | 0.61 | 1.39 | 99.74 |
| Y-69-7 | 52.32 | 1.31 | 17.07 | 9.45 | 0.15 | 5.33 | 7.53 | 3.60 | 1.96 | 0.48 | 0.99 | 99.35 |
| Y-69-4 | 53.48 | 1.19 | 17.39 | 9.01 | 0.15 | 5.01 | 7.22 | 3.58 | 2.08 | 0.44 | 0.98 | 99.69 |
| ER-03/3-15 | 51.80 | 1.21 | 17.0 | 9.69 | 0.15 | 5.32 | 7.53 | 3.51 | 1.93 | 0.68 | 1.51 | 99.81 |
| ER-03/10-15 | 51.70 | 1.33 | 16.30 | 9.33 | 0.19 | 5.27 | 7.86 | 3.63 | 2.07 | 0.52 | 2.56 | 100.21 |
| ER-03/1-15(b) | 52.0 | 1.42 | 17.10 | 9.74 | 0.19 | 4.82 | 7.03 | 3.43 | 2.37 | 0.61 | 1.86 | 99.95 |
| ER-03/2-15 | 52.20 | 1.18 | 17.20 | 9.4 | 0.14 | 4.83 | 7.87 | 3.84 | 2.12 | 0.48 | 1.69 | 100.36 |
| ER-03/4-15 | 53.40 | 1.08 | 16.20 | 8.47 | 0.15 | 4.88 | 7.46 | 4.15 | 2.30 | 0.41 | 2.41 | 100.37 |
| X _{ав} | 52.09 | 1.27 | 17.02 | 9.45 | 0.16 | 5.12 | 7.58 | 3.66 | 2.11 | 0.53 | | |
| min | 49.82 | 1.08 | 16.20 | 8.47 | 0.14 | 4.82 | 7.03 | 3.43 | 1.93 | 0.41 | | |
| max | 53.48 | 1.47 | 17.87 | 10.47 | 0.19 | 5.51 | 8.16 | 4.15 | 2.37 | 0.68 | | |

Породы мафической части комбинированной дайки можно отнести к биотит-роговообманковым кварцевым диоритам (Pl – 50–55 %, Hbl – 20–25 %, Bt – 15–20 %, Qtz – 10 %). Средние содержания петрогенных элементов указаны в таблице 5 (рис. 9).

3.5. ИЗОТОПНО-ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Определение U-Pb изотопного возраста цирконов проводилось LA-ICP-MS методом на масс-спектрометре Finnigan Element XR в лаборатории физических методов анализа Геологического института Сибирского отделения РАН (г. Улан-Удэ). Методика съемки и расчетов изложена в работе В.Б. Хубанова с соавторами [Khubanov et al., 2016].

При определении U-Pb изотопного возраста цирконов получены следующие данные: базиты комбинированной дайки – 494.8 ± 5.4 Ma, салическая составляющая комбинированной дайки – 489.7 ± 7

Ma, гранитоиды Матутского массива – 509 ± 4 Ma [Burmakina et al., 2016].

Определение $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ изотопного возраста амфиболов и слюд проводилось методом ступенчатого прогрева на масс-спектрометре Noble gas 5400 фирмы Микромасс в лаборатории изотопно-аналитических методов Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск).

При определении $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ изотопного возраста амфиболов и слюд получены следующие данные (рис. 10): базиты комбинированной дайки (роговая обманка) – 471.2 ± 1.9 Ma, (биотит) – 462.5 ± 1 Ma.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предваряя обсуждение результатов, необходимо кратко остановиться на оценках температур и давлений, имевших место на момент внедрения на данный гипсометрический уровень коры комбинированной

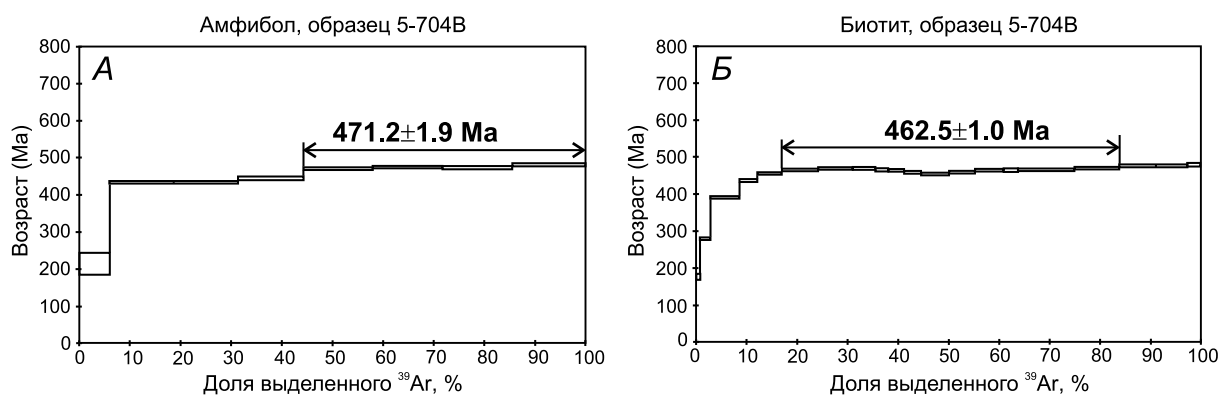


Рис. 10. Результаты изотопного датирования пород минглинг-дайки Тавыт-Даг. А – изотопное $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование амфиболов из базитов; Б – изотопное $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование биотита из базитов.

Fig. 10. Isotope dating of the rocks from the mingling dyke on the Tavyt-Dag site. A – isotope $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of amphibole from basites; B – isotope $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of biotite from basites.

рованных даек. Отправной точкой могут служить данные о гранулитовом метаморфизме пород эрзинского комплекса [Karmysheva et al., 2011, 2017]. С этой целью были проанализированы образцы на южном, западном и восточном контактах Матутского гранитоидного массива, а также на западном контакте Баянкольского гранитоидного массива (расчет P - T параметров производился в ПО «ТWQ 2.02» [Berman, Aranovich, 1996]).

4.1. ГРАНУЛИТОВЫЙ МЕТАМОРФИЗМ ЭРЗИНСКОГО МЕТАМОРФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Самые низкие значения ($T=730\pm 16$ °C, $P=5.3\pm 0.2$ кбар) были получены для ассоциации $Qtz+Pl_{26}+Kfs+Bt_{51}+Cr_{d38}+Grt_{85}+Ms$ на южном контакте Матутского гранитоидного массива. Близкие значения были рассчитаны и для парагенезиса $Qtz+Pl_{30}+Grt_{85}+Cr_{d46}+Bt_{62}+Sil$ на западном контакте Баянкольского гранитоидного массива, где наблюдаются автохтонные выплавки гранитного расплава из мигматитов эрзинского комплекса. Здесь P - T параметры метаморфизма и гранитообразования достигают $T=790$ °C и $P=5.4$ кбар.

Мигматиты эрзинского метаморфического комплекса западнее Матутского массива характеризуются $T=835$ °C и $P=7.2$ кбар (ассоциации $Qtz+Pl_{30}+Bt_{60}+Cr_{d40}+Grt_{80}$). Такие же значения были получены для метаморфических пород высокой степени плавления в восточной экзоконтактовой зоне Матутского гранитоидного массива: $T=800$ °C $P=7.5$ кбар, ассоциация $Qtz+Pl_{33}+Kfs+Bt_{60}+Cr_{d40}+Grt_{74}$.

Таким образом, P - T параметры метаморфизма эрзинского комплекса варьируются от верхов амфиболитовой фации ($T\sim 730$ °C, $P\sim 5$ кбар) до низов гранулитовой фации ($T\sim 830$ °C, $P=7.5$ кбар). Исходя из геологической ситуации, проявление пятнистого по площади высокоградного метаморфизма можно связать с заложением Эрзинской сдвиговой зоны и ее неоднородной проницаемостью для мантийных тепловых источников либо для источников, связанных с формированием нижнекоровых промежуточных камер магм основного состава.

Большинство определений условий метаморфизма пород эрзинского комплекса были выполнены для пород в непосредственном обрамлении параавтохтонных гранитов Матутского массива с возрастом 509 ± 4 Ma (U-Pb, циркон [Burmakina et al., 2016]). Поскольку комбинированная дайка участка Тавыт-Даг прорывает данный массив, можно утверждать, что ее внедрение происходило на гипсометрические уровни земной коры не глубже 27 км (оценка для гранулитового метаморфизма с $T\sim 830$ °C при геотермическом градиенте $30^\circ/1$ км) (рис. 11).

4.2. ТЕРМОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Мультиминеральные и мультисистемные изотопные исследования пород минглинга на участке Тавыт-Даг показали различный возраст закрытия изотопных систем (рис. 11): 494.8 ± 5.4 млн лет (U/Pb, циркон, базиты), 489.7 ± 7 млн лет (U/Pb, циркон, гранитоиды), 471.2 ± 1.9 млн лет (Ar/Ar, амфибол, базиты) и 462.5 ± 1 млн лет (Ar/Ar, биотит, базиты). С учетом параметров закрытия изотопных систем (~ 800 – 900 °C, циркон, U/Pb; ~ 500 °C, амфибол, Ar/Ar; ~ 300 °C, биотит, Ar/Ar) можно оценить кривую остывания минглинг-дайки. Она отвечает понижению температур на 600 °C (900 °C \rightarrow 500 °C \rightarrow 300 °C) в период с 500 (494.8 ± 5.4) до 461 (462.5 ± 1.0) млн лет (рис. 11).

Возможны два варианта интерпретации этих данных. В первом варианте различия изотопно-геохронологических данных для одной и той же минглинг-дайки обусловлены существованием двух и более термальных событий. Во втором варианте интерпретации предполагается, что поздние термальные события не затронули минглинг-дайку и последовательное изменение возраста закрытия изотопных систем отражает общее утонение земной коры в регионе в процессе постколлизийного развала орогенной структуры. Для обоснования выбора интерпретации рассмотрим более подробно существующие геологические данные.

Первый вариант интерпретации опирается на комплекс изотопно-геохронологических данных (см. табл. 1, рис. 11), указывающих на существование на рубеже 465 млн лет поздних термальных событий, связанных с активизацией базитового магматизма и проявлением метаморфизма андалузит-силлиманитового типа. Следует отметить, что полиметаморфизм данного типа проявлен преимущественно лишь на западе региона, тяготея к Башкымугурскому габброидному массиву. К косвенным признакам, указывающим на термальный прогрев пород, можно отнести появление деформаций с левосторонней сдвиговой кинематикой, что обусловлено реологической реакцией на термальные события [Vladimirov et al., 2005; Barabash et al., 2007; и др.].

Детальное изучение участка Тавыт-Даг, где расположена минглинг-дайка, показало, что здесь отсутствуют признаки полиметаморфизма и поздних деформаций сдвигового генезиса. Следует также обратить внимание на кривую остывания, построенную по изотопно-геохронологическим данным (кривая зеленого цвета, рис. 11). Она имеет линейный характер, что возможно лишь в условиях постоянной и относительно медленной скорости снижения температуры. Данные обстоятельства

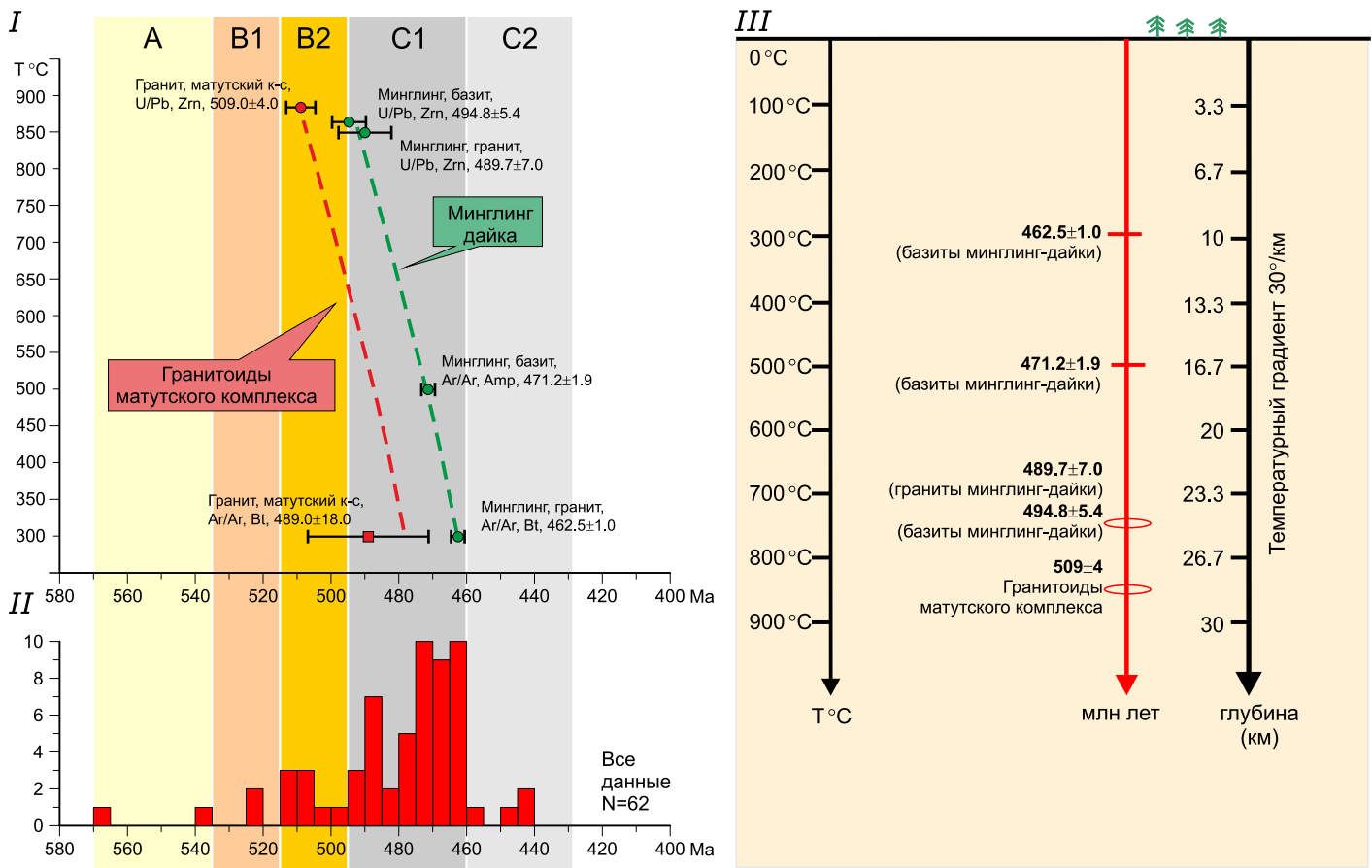


Рис. 11. Динамика развала Западно-Сангиленского коллизионного горно-складчатого сооружения по данным термохронологических исследований (см. табл. 2 и пояснения в тексте).

На схеме слева вверху (I) – динамика остывания комбинированной дайки участка Тавыт-Даг (пунктир зеленого цвета) и гранитоидов Матутского массива (пунктир красного цвета). Сокращения: А – аккреционно-субдукционный период (570–535 Ма); В – коллизионный период (В1 – ранняя стадия 535–515 Ма; В2 – поздняя стадия, 515–495 Ма); С – постколлизионный период (С1 – ранняя стадия, 495–460 Ма; С2 – поздняя стадия, 460–430 Ма). На схеме слева внизу (II) – сводная диаграмма термохронологических данных (см. рис. 3). На схеме справа (III) – динамика подъема комбинированной дайки (возрастной рубеж / глубина / температура) при температурном градиенте 30 °С / 1 км.

Fig. 11. Dynamics of the collapse of the West Sangilen collisional mountain-folded structure according to the thermochronological studies (see Table 2 and explanations in the text).

Top left (I) – scheme showing the dynamics of cooling of the combined dike on the Tavyt-Dag site (green dashed line) and granitoids of the Matut massif (red dashed line). *Abbreviations:* A – accretion-subduction period (570–535 Ma); B – collision period: B1 – early stage (535–515 Ma), B2 – late stage (515–495 Ma); C – post-collision period: C1 – early stage (495–460 Ma), C2 – late stage (460–430 Ma).

Bottom left (II) – summary diagram of the thermochronological data (see Fig. 3). **Right (III)** – scheme showing the dynamics of rising of the combined dike (age limit / depth / temperature) with a temperature gradient of 30 °C per 1 km.

делают сомнительным первый вариант интерпретации геохронологических данных.

Весь комплекс геологических данных указывает на то, что понижение температуры в период 495–463 млн лет происходило на фоне регионального утонения земной коры, завершившегося ее синдвиговым фрагментированием, и, как следствие, активизацией базитового магматизма на рубеже 463 млн лет [Vladimirov et al., 2005; Barabash et al., 2007; и др.].

Можно оценить динамику тектонической денудации в процессе утонения земной коры в период

495–463 млн лет. Величина подъема минглинг-дайки участка Тавыт-Даг ориентировочно составила 17 км. Выведение дайки происходило с гипсометрического уровня 27 км до отметки 10 км при падении температуры на 600 °С. При средней длительности периода тектонической денудации 32.3 млн лет градиент остывания составил ~18.6 °С при подъеме ~0.5 км за 1 млн лет (оценки приведены для геотермического градиента 30 °С/1 км).

Поскольку при термохронологических исследованиях принят второй вариант интерпретации изотопно-геохронологических данных, ниже до-

полнительно рассмотрены два вопроса. Это геологические свидетельства утонения коры в регионе и масштабы проявления полиметаморфизма, связанные с тепловым воздействием со стороны габброидных массивов.

4.3. СВИДЕТЕЛЬСТВА И МЕХАНИЗМЫ УТОНЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ В РЕГИОНЕ

Можно привести данные, прямо указывающие на существование процессов утонения земной коры в пределах Западного Сангиленена в период 495–463 млн лет, завершившееся фрагментацией коры и активизацией базитового магматизма на рубеже 463 млн лет. Все эти признаки являются одновременно свидетельством смены геодинамических режимов в регионе – коллизионное сжатие сменилось постколлизионным растяжением. В тектоническом плане пликативные и разрывные деформации сменились от взбросов и складчатости с субгоризонтальными шарнирами к левосторонним субгоризонтальным сдвигам и синсдвиговой складчатости с субвертикальными шарнирами. До момента фрагментации коры и активизации базитового магматизма произошел срыв по системе дачментов (шарьяжей) перекрывающих регион карбонатно-терригенных толщ (см. рис. 2, 12, сангиленская серия, Чангусская карбонатная гряда) [Vladimirov A.G. et al., 2000; Vladimirov V.G. et al., 2005; Barabash et al., 2007]. Появились признаки пересекающейся складчатости и складчатости сдвигового типа без нарушения сплошности метаморфизованных толщ (рис. 12) [Barabash et al., 2007], получили распространение лейкограниты жильного типа чжаргалантского комплекса (489 млн лет, U/Pb [Kozakov et al., 1999b, 2001]). Несомненный признак растяжения – появление на его завершающей стадии фрагментации земной коры и активизация собственно базитового магматизма.

При оценке механизмов утонения коры и параметров выведения на верхние гипсометрические уровни минглинг-дайки участка Тавыт-Даг необходимо учитывать также дополнительный вклад процессов изостазии.

4.4. ОЦЕНКА МАСШТАБОВ ТЕПЛОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СО СТОРОНЫ БАШКЫМУГУРСКОГО ГАББРОИДНОГО МАССИВА

Реперным событием на рубеже 463 млн лет является становление Башкымугурского габбро-монцодиоритового массива (464.6±5.7 млн лет, циркон, U-Pb [Kozakov et al., 1999b], 465±1.2 млн лет, биотит, Ar-Ar [Izokh et al., 2001b], 464±5 млн лет, вал, Rb-Sr [Petrova, 2001]) (таблица 2). Его внедрение и пространственное субмеридиональное поло-

жение контролировалось Западно-Сангиленской сдвиговой системой, включающей сопряженные субмеридиональные и субширотные нарушения (см. рис. 2, 12).

Башкымугурский массив занимает область раздвиги, разделяя Мугуро-Чинчилигский блок на две части и оказывая тепловое воздействие на вмещающие породы. С восточной стороны габброидного массива отмечено зональное ороговикование с появлением гранулитов НТ/LP типа [Kargopolov, 1991]. Однако подобное ороговикование на западной стороне массива не наблюдается. В то же время весь западный фрагмент (Тарлашкинхемский) Мугуро-Чинчилигского блока несет признаки полиметаморфизма – на ранние ставролит-кианитовые ассоциации наложены или полностью замещены ими парагенезисы андалузит-силлиманитового типа.

Пятнистый характер метаморфизма подтверждается широким разбросом термохронологических данных с закрытием изотопных систем по амфиболу от 513.1±5.0 до 500.4±7.3 (Ar/Ar, Hbl [Travin et al., 2006]), а по биотиту от 471.0±2.6 до 462.1±3.4 (Ar/Ar, Bt [Udin et al., 2002; Vladimirov et al., 2005; Travin et al., 2006; Barabash et al., 2007]) (см. табл. 1). Поскольку температуры закрытия изотопных систем для амфибола и биотита различны, логично предположить, что уровень прогрева был недостаточен для переустановки изотопной системы роговой обманки. Однако возможно и иное объяснение – это контактовый метаморфизм со стороны Башкымугурского габброидного массива с локальным прогревом вдоль тектонизированных зон.

Для установления причин пятнистого метаморфизма западнее габбро-монцодиоритового Башкымугурского массива (рис. 12) были проведены детальные структурно-метаморфические и изотопные исследования [Barabash et al., 2007]. Для оценки внутренней фрагментированности Мугуро-Чинчилигского блока была построена теневая модель рельефа его западной части (рис. 12). Как можно видеть, здесь уверенно дешифрируется эшелонированная система линеаментов северо-восточного и меридионального простирания (рис. 12, S-образные участки серого цвета). Проведенные полевые исследования показали, что это отдельные жесткие слабо- и недеформированные литоны, разделенные зонами объемного сдвигового течения (рис. 12). Формирование подобного коллажа из жестких блоков в вязкопластичном матриксе происходило при левосдвиговых деформациях в условиях синсдвигового растяжения [Barabash et al., 2007].

⁴⁰Ar/³⁹Ar изотопное датирование новообразованного синкинематического биотита из зон сдвига показало возраст 463.6±3.2 млн лет, что

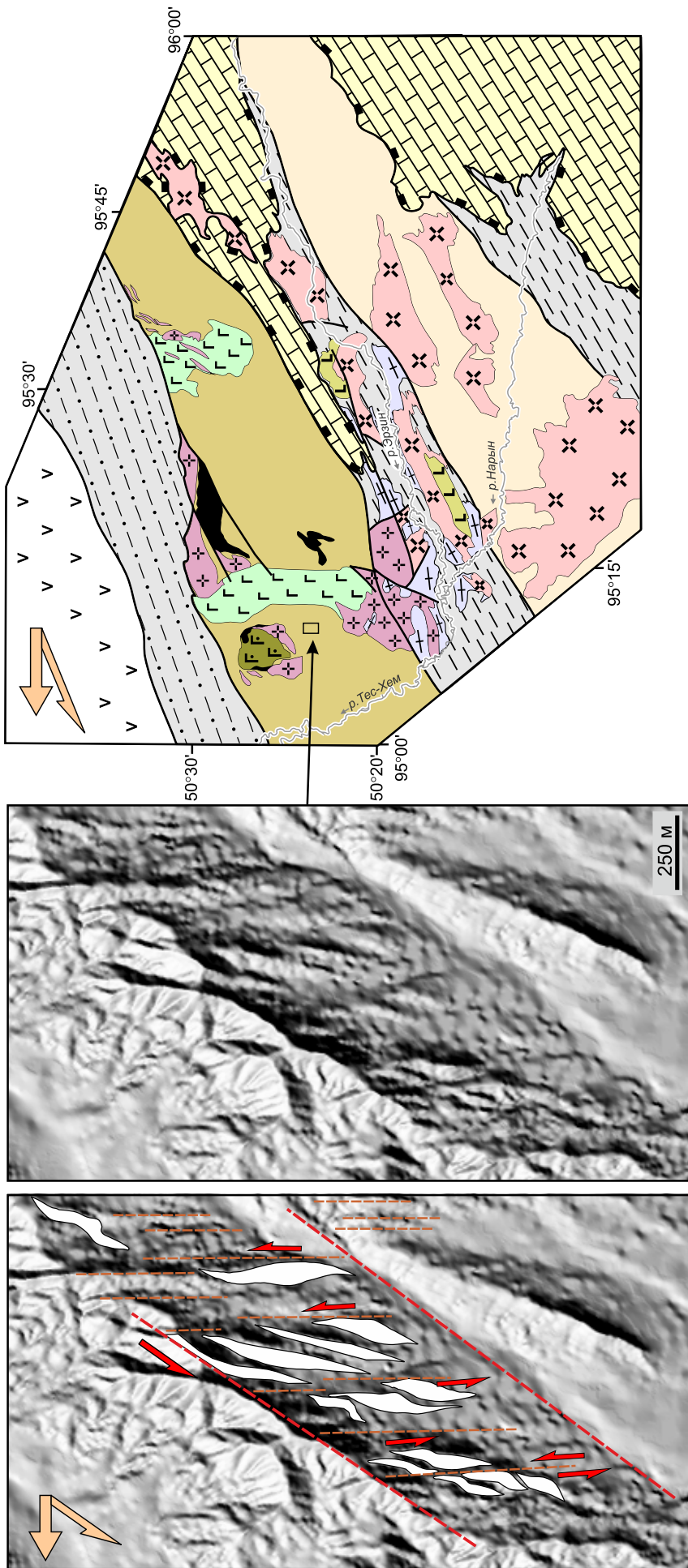


Рис. 12. Фрагментация на примере Ак-Дагского участка.

На рисунке слева – кинематическая схема фрагментации комплексов метаморфических пород в западной части Моренского блока (по результатам дешифрирования теневой модели рельефа и структурно-геологическим наблюдениям на правом берегу р. Тарлашкин-Хем [Barabash et al., 2007]. На рисунке справа – положение участка Ак-Даг на геологической схеме (условные обозначения приведены на рис. 2).

Fig. 12. Fragmentation of the Ak-Dag site.

Left – kinematic scheme of tectonic movements that caused fragmentation of metamorphic rock complexes in the western part of the Moren block (based on deciphering of the shaded model of the relief and the structural-geological observations on the right bank of the Tarlashkin-Khem river [Barabash et al., 2007]. Right – location of the Ak-Dag site in the geological scheme (see the legend in Fig. 2).

идентично возрасту Башкымугурского массива [Barabash et al., 2007]. Оценки уровня метаморфизма отвечают эпидот-амфиболитовой фации (ассоциации с андалузитом и кордиеритом, $T \sim 580-620$ °C).

Следует отметить, что, в связи с фрагментированием толщ и кратковременностью контактового теплового воздействия, прогрев пород мог проявиться локально и, в ряде случаев, ограничиваться лишь перекристаллизацией минералов.

Приведенные выше примеры и признаки показывают, что на постколлизийном этапе происходило утонение земной коры, сопровождаемое растяжением и фрагментированием глубинных уровней горно-складчатого сооружения. Это позволяет подчеркнуть, что тектоническая денудация орогенной структуры постколлизийного этапа была постепенной, но завершалась активными процессами, сопровождаемыми фрагментацией и магматической активизацией. Им сопутствовали сбросы тектонических напряжений в литосфере за счет кратковременного нарушения ее сплошности (фрагментации) с возникновением эпизодов массового проявления гранитоидного и базитового магматизма. Полученные в данной работе оценки динамики растяжения земной коры касаются лишь периодов между подобными всплесками фрагментации и магматизма.

5. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В пределах Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува) обнажены метаморфические и магматические комплексы ранних каледонид, относящихся к периоду длительных коллизийных и постколлизийных событий на северо-западной окраине Тувино-Монгольского массива. Эволюция орогенных структур в пределах Западного Сангилен может служить примером развала складчатых сооружений при смене режимов сжатия и транспрессии (период коллизии) режимом внутри- и окраинно-континентального трансформно-сдвигового растяжения (постколлизийный период). По авторским и многочисленным опубликованным данным использование комбинированных даек в

качестве природных термохронологических датчиков позволило оценить динамику трансформно-сдвигового растяжения на постколлизийном периоде:

1. Внедрение комбинированных даек на рубеже 495 млн лет является репером начала постколлизийных событий в регионе.

2. Выведение минглинг-даек участка Тавыт-Даг с глубинных уровней земной коры (~27 км) на уровень, отвечающий 10 км, происходило со скоростью около 0.5 км/1 млн лет и длилось до 40 млн лет (средняя оценка – 32.3 млн лет). Основные механизмы подъема – синсдвиговое растяжение и изостазия земной коры.

3. Растяжение, утонение и изостазия земной коры на краю Тувино-Монгольского массива характеризуются линейной динамикой понижения температуры – 18.6 °C за 1 млн лет при средней длительности оценочного периода в 32.3 млн лет.

4. Длительность всего постколлизийного периода, приведшего к коллапсу Западно-Сангиленского горно-складчатого сооружения, составляет не менее 60 млн лет (495–430 млн лет). Однако оценки динамики утонения коры касаются не всего постколлизийного периода, а лишь периодов между эпизодами регионального сброса тектонических напряжений в литосфере, фиксируемых по всплескам гранитоидного и базитового магматизма.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Я.В. Куйбида, М.Л. Куйбида, С.А. Каргополову, А.Г. Владимирову, А.С. Гибшеру, А.А. Гибшер, С.А. Рудневу, Р.А. Шелепаеву и другим сотрудникам Института геологии и минералогии СО РАН за совместные полевые работы и обсуждение материалов.

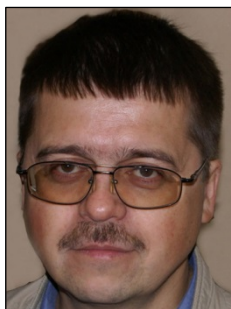
Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта РФФИ № 16-05-01011 и РФФИ-Сибирь № 15-45-04208, а также при финансовой поддержке полевых работ Президиумом СО РАН (ИП ОНЗ-9.3, ИП ОНЗ-10.1, ПФИ №77) и Министерства образования и науки РФ (проект № 5.1688.2017/ПЧ).

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Barabash N.V., Vladimirov V.G., Travin A.V., Yudin D.S., 2007. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the stage of transform-shear deformation in evolution of the early Caledonides in Western Sangilen, Southeastern Tuva. *Doklady Earth Sciences* 414 (1), 592–598. <https://doi.org/10.1134/S1028334X0704023X>.
- Berman R.G., Aranovich L.Y., 1996. Optimized standard state and solution properties of minerals: Model calibration for olivine, orthopyroxene, cordierite, garnet, and ilmenite in the system $\text{FeO-MgO-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-SiO}_2$. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 126 (1), 1–24. <https://doi.org/10.1007/s004100050232>.

- Burmakina G.N., Tsygankov A.A., Khubanov V.B., Vladimirov V.G., Karmysheva I.V., Buyantuyev M.D., 2016. Combined dykes of Western Sangilen, SE Tuva: isotope age, composition, petrogenesis. In: Correlation of the Altaides and Uralides: magmatism, metamorphism, stratigraphy, geochronology, geodynamics and metallogeny. Proceedings of the 3rd International scientific conference. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, p. 35–37 (in Russian) [Бурмакина Г.Н., Цыганков А.А., Хубанов В.Б., Владимиров В.Г., Кармышева И.В., Буянтуев М.Д. Комбинированные дайки Западного Сангилена, ЮВ Тува: изотопный возраст, состав, петрогенезис // Корреляция алтаид и уралид: магматизм, метаморфизм, стратиграфия, геохронология, геодинамика и металлогения: Материалы Третьей международной научной конференции. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. С. 35–37].
- Izokh A.E., Kargopolov S.A., Shelepaev R.A., Travin V.A., Egorova V.V., 2001b. Basic magmatism at the Cambrian–Ordovician stage of evolution of the Altai-Sayan folded area and its influence on high-temperature low-pressure metamorphism. In: Urgent Problems of Geology and Mineralogy in Southern Siberia. Proceedings of the Conference. IGM SB RAS, Novosibirsk, p. 68–72 (in Russian) [Изох А.Э., Каргополов С.А., Шелепаев Р.А., Травин А.В., Егорова В.В. Базитовый магматизм кембро-ордовикского этапа Алтае-Саянской складчатой области и связь с ним метаморфизма высоких температур и низких давлений // Актуальные вопросы геологии и минералогии юга Сибири: Материалы научно-практической конференции. Новосибирск: Изд-во ИГиМ СО РАН, 2001. С. 68–72].
- Izokh A.E., Polyakov G.V., Mal'kovets V.G., Shelepaev R.A., Travin A.V., Litasov Yu.D., Gibsher A.A., 2001a. The Late Ordovician age of camptonites from the Agardag Complex of Southeastern Tuva as an indicator of the plume-related magmatism during collision processes. *Doklady Earth Sciences* 379 (5), 511–514.
- Kargopolov S.A., 1991. Metamorphism of the Mугур zonal complex (South-Eastern Tuva). *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 32 (3), 109–119 (in Russian) [Каргополов С.А. Метаморфизм мугурского зонального комплекса (Юго-Восточная Тува) // Геология и геофизика. 1991. Т. 32. № 3. С. 109–119].
- Karmysheva I.V., Vladimirov V.G., Vladimirov A.G., 2017. Synkinematic granitoid magmatism of Western Sangilen, South-East Tuva. *Petrology* 25 (1), 87–113. <https://doi.org/10.1134/S0869591117010040>.
- Karmysheva I.V., Vladimirov V.G., Vladimirov A.G., Shelepaev R.A., Yakovlev V.A., Vasyukova E.A., 2015. Tectonic position of mingling dykes in accretion-collision system of Early Caledonides of West Sangilen (South-East Tuva, Russia). *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (3), 289–310. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-3-0183>.
- Karmysheva I.V., Vladimirov V.G., Volkova N.I., Vladimirov A.G., Kruk N.N., 2011. Two types of high-grade metamorphism in West Sangilen (Southeast Tuva). *Doklady Earth Sciences* 441 (2), 230–235. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1111016X>.
- Khubanov V.B., Buyantuyev M.D., Tsygankov A.A., 2016. U–Pb dating of zircons from PZ₃–MZ igneous complexes of Transbaikalia by sector-field mass spectrometry with laser sampling: technique and comparison with SHRIMP. *Russian Geology and Geophysics* 57 (1), 190–205. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.01.013>.
- Kozakov I.K., Kotov A.B., Sal'nikova E.B., Bibikova E.V., Kovach V.P., Kirnozova T.I., Berezhnaya N.G., Lykhin D.A., 1999a. Metamorphic age of crystalline complexes of the Tuva-Mongolia Massif: the U-Pb geochronology of granitoids. *Petrology* 7 (2), 177–191.
- Kozakov I.K., Kotov A.B., Sal'nikova E.B., Kovach V.P., Natman A., Bibikova E.V., Kirnozova T.I., Todt W., Kröner A., Yakovleva S.Z., Lebedev V.I., Sugorakova A.M., 2001. Timing of the structural evolution of metamorphic rocks in the Tuva-Mongolian Massif. *Geotectonics* 35 (3), 165–184.
- Kozakov I.K., Sal'nikova E.B., Bibikova E.V., Kirnozova T.I., Kotov A.B., Kovach V.P., 1999b. Polychronous evolution of the paleozoic granitoid magmatism in the Tuva-Mongolia Massif: U-Pb geochronological data. *Petrology* 7 (6), 592–601.
- Kuzmichev A.B., 2004. Tectonic History of the Tuva–Mongolian Massif: Early Baikalian, Late Baikalian, and Early Caledonian Stages. “PROBEL-2000” Publishing House, Moscow, 192 p. (in Russian) [Кузьмичев А.Б. Тектоническая история Тувино-Монгольского массива: раннебайкальский, позднебайкальский и раннекаледонский этапы. М.: «ПРОБЕЛ-2000», 2004. 192 с.].
- Kuzmichev A.B., Bibikova E.V., Zhuravlev D.Z., 2001. Neoproterozoic (800 Ma) orogeny in the Tuva-Mongolia Massif (Siberia): island arc–continent collision at the northeast Rodinia margin. *Precambrian Research* 110 (1–4), 109–126. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(01\)00183-8](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(01)00183-8).
- Le Maitre R.W., Bateman P., Dudek A., Keller J., Lameyre M., Le Bas M.J., Sabine P.A., Schmid R., Sorensen H., Streckeisen A., Wooley A.R., Zanettin B., 1989. A Classification of Igneous Rocks and a Glossary of Terms. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 206 p.
- Lebedev V.I., Khalilov V.A., Kargopolov S.A., Vladimirov A.G., Gibsher A.S., 1991. The U-Pb age of high-temperature metamorphism in Sangilen (Southeastern Tuva). *Doklady AN SSSR* 320 (3), 682–686 (in Russian) [Лебедев В.И., Халилов В.А., Каргополов С.А., Владимиров А.Г., Гибшер А.С. U-Pb возраст высокотемпературного метаморфизма Сангилена (Юго-Восточная Тува) // Доклады АН СССР. 1991. Т. 320. № 3. С. 682–686].
- Mongush A.A., Gusev N.I., Druzhkova E.K., 2014. The first data on the U-Pb age of plagiogranites of the Chon-Sair ophiolite massif (Southern Tuva) – evidence of the Early Ordovician phase of ophiolite genesis? In: Geology and Mineral Resources of Siberia. Materials of the 1st Scientific-Practical Conference. Vol. 1. SNIIGiMS, Novosibirsk,

- р. 105–109 (in Russian) [Монгуш А.А., Гусев Н.И., Дружкова Е.К. Первые данные о U-Pb возрасте плагиогранитов Чон-Саирского офиолитового массива (Южная Тува) – свидетельство раннеордовикского этапа офиолитогенеза? // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири: Материалы 1-й научно-практической конференции. Новосибирск: СНИИГГиМС, 2014. Т. 1. С. 105–109].
- Petrographic Code of Russia*, 2009. Magmatic, Metamorphic, Metasomatic, and Impact Formations. VSEGEI Press, Saint-Petersburg, 200 p. (in Russian) [Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. Санкт-Петербург: Издательство ВСЕГЕИ, 2008. 200 с.].
- Petrova A.Yu.*, 2001. The Rb-Sr Isotope System of Metamorphic and Magmatic Rocks of Western Sangilen (South-Eastern Tuva). Author's Abstract of PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). IMGRE, Moscow, 26 p. (in Russian) [Петрова А.Ю. Rb-Sr изотопная система метаморфических и магматических пород Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ИМГРЭ, 2001. 26 с.].
- Petrova A.Yu., Kostitsyn Yu.A.*, 1997. Age of high-gradient metamorphism and granite magmatism in the Western Sangilen. *Geochemistry International* 35 (3), 295–298.
- Petrova A.Yu., Kostitsyn Yu.A.*, 2001. Comparison of the U–Pb and Rb–Sr ages of granitoids from the western Sangilen (southeastern Tuva): polemic review of published data. In: Isotopic dating of geologic processes: new methods and results. Abstracts of All-Russian Conference on Isotope Geochronology. Moscow, p. 261–264 (in Russian) [Петрова А.Ю., Костицын Ю.А. Сравнение U-Pb и Rb-Sr возрастов гранитоидов Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува): полемический пересмотр опубликованных данных // Изотопное датирование геологических процессов: новые методы и результаты: Тезисы докладов Всероссийской конференции по изотопной геохронологии. М., 2001. С. 261–264].
- Pfänder J., Jochum K.P., Todt W., Kröner A.*, 1999. Relationships between the mantle, lower crust and upper crust within the Agardagh-Tes Chem Ophiolite, Central Asia: evidence from petrologic, trace element, and isotopic data. *Ophioliti* 24 (1b), 151–152.
- Travin A.V., Kargopolov S.A., Lepezin G.G., Ponomarchuk V.A., Yudin D.S.*, 2006. The age and thermochronological reconstructions of a polymetamorphic complex in the western Sangilen, southeastern Tuva. In: Isotopic dating of ore formation, magmatism, sedimentation, and metamorphism processes. Proceedings of the Third Russian Conference on isotope geochronology. Vol. 2. GEOS, Moscow, p. 350–355 (in Russian) [Травин А.В., Каргополов С.А., Лепезин Г.Г., Пономарчук В.А., Юдин Д.С. Возраст и термохронологические реконструкции полиметаморфического комплекса Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува) // Изотопное датирование процессов рудообразования, магматизма, осадконакопления и метаморфизма: Материалы III Российской конференции по изотопной геохронологии. М.: ГЕОС, 2006. Т. 2. С. 350–355].
- Udin D., Travin A.V., Vladimirov V.G., Prostyakov K., Barabach N.V.*, 2002. Age spectra of biotite indicator of deformation rate: evidence from microchemical, structural, step-heating and laser $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analyses. *Geochimica et Cosmochimica Acta* (Special Supplement “Abstracts of the 12th Annual V.M. Goldschmidt Conference”, Davos, Switzerland) 66 (15A), A791.
- Vladimirov A.G., Kruk N.N., Vladimirov V.G., Gibsher A.S., Rudnev S.N.*, 2000. Synkinematic granites and collision-shear deformations in Western Sangilen (Southeastern Tuva). *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 41 (3), 398–413.
- Vladimirov V.G., Karmysheva I.V., Travin A.V., Tsygankov A.A., Burmakina G.N., Khubanov V.B.*, 2016a. Complexes of combined dykes as indicators of tectonic denudation and the collapse of the collision system in the caledonides of Western Sangilen (SE Tuva). In: Correlation of the Altaides and Uralides: magmatism, metamorphism, stratigraphy, geochronology, geodynamics and metallogeny. Proceedings of the 3rd International scientific conference. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, p. 54–55 (in Russian) [Владимиров В.Г., Кармышева И.В., Травин А.В., Цыганков А.А., Бурмакина Г.Н., Хубанов В.Б. Комплексы комбинированных даек как индикаторы тектонической денудации и развала коллизонной системы в каледонидах Западного Сангилен (ЮВ Тува) // Корреляция алтаид и уралид: магматизм, метаморфизм, стратиграфия, геохронология, геодинамика и металлогения: Материалы Третьей международной научной конференции. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. С. 54–55].
- Vladimirov V.G., Karmysheva I.V., Yakovlev V.A.*, 2016b. Two groups of magmatic mingling (on the example of the Early Caledonides of Western Sangilen, South-Eastern Tuva). In: Correlation of the Altaides and Uralides: magmatism, metamorphism, stratigraphy, geochronology, geodynamics and metallogeny. Proceedings of the 3rd International scientific conference. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, p. 52–53 (in Russian) [Владимиров В.Г., Кармышева И.В., Яковлев В.А. Две группы магматического минглинга (на примере ранних каледонид Западного Сангилен, Юго-Восточная Тува) // Корреляция алтаид и уралид: магматизм, метаморфизм, стратиграфия, геохронология, геодинамика и металлогения: Материалы Третьей международной научной конференции. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. С. 52–53].
- 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 (8), 1159–1165.
- Whitney D.L., Evans B.W.*, 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*. 95 (1), 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>.



Владимиров Владимир Геннадьевич, канд. геол.-мин. наук, с.н.с.
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия
Новосибирский государственный университет
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия
✉ e-mail: vvg@igm.nsc.ru

Vladimirov, Vladimir G., Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher
V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS
3 Academician Koptyug ave, Novosibirsk 630090, Russia
Novosibirsk State University
2 Pirogov street, Novosibirsk 630090, Russia
✉ e-mail: vvg@igm.nsc.ru



Кармышева Ирина Владимировна, канд. геол.-мин. наук, н.с.
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия
Новосибирский государственный университет
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия
e-mail: iri@igm.nsc.ru

Karmysheva, Irina V., Candidate of Geology and Mineralogy, Researcher
V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS
3 Academician Koptyug ave, Novosibirsk 630090, Russia
Novosibirsk State University
2 Pirogov street, Novosibirsk 630090, Russia
e-mail: iri@igm.nsc.ru



Яковлев Владислав Александрович, магистрант, лаборант
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия
Новосибирский государственный университет
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия
e-mail: yakovlew.official@gmail.com

Yakovlev, Vladislav A., undergraduate student
V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS
3 Academician Koptyug ave, Novosibirsk 630090, Russia
Novosibirsk State University
2 Pirogov street, Novosibirsk 630090, Russia
e-mail: yakovlew.official@gmail.com



Травин Алексей Валентинович, докт. геол.-мин. наук
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия
Новосибирский государственный университет
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия
Томский государственный университет
634050, Томск, просп. Ленина, 50, Россия
e-mail: travin@igm.nsc.ru

Travin, Aleksei V., Doctor of Geology and Mineralogy
V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS
3 Academician Koptyug ave, Novosibirsk 630090, Russia
Novosibirsk State University
2 Pirogov street, Novosibirsk 630090, Russia
Tomsk State University
50 Lenin ave, Tomsk 634050, Russia
e-mail: travin@igm.nsc.ru



Цыганков Андрей Александрович, докт. геол.-мин. наук, директор
Геологический институт СО РАН
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия
Бурятский государственный университет
670000, Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а, Россия
e-mail: tsygan@gin.bscnet.ru

Tsyganov, Andrei A., Doctor of Geology and Mineralogy, Director
Geological Institute, Siberian Branch of RAS
6a Sakhyanova street, Ulan-Ude 670047, Russia
Buryat State University
24a Smolin street, Ulan-Ude 670000, Russia
e-mail: tsygan@gin.bscnet.ru



Бурмакина Галина Николаевна, канд. геол.-мин. наук, н.с.
Геологический институт СО РАН
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия
e-mail: gerka_85@mail.ru

Burmakina, Galina N., Candidate of Geology and Mineralogy, Researcher
Geological Institute, Siberian Branch of RAS
6a Sakhyanova street, Ulan-Ude 670047, Russia
e-mail: gerka_85@mail.ru