



THE AGE OF EARLY COLLISIONAL GRANITOIDS OF WESTERN SANGILEN (SE TUVA): IMPLICATIONS FOR ESTIMATING THE DURATION OF OROGENY AT THE MARGIN OF THE TUVA-MONGOLIAN MASSIF

D.V. Semenova ¹✉, V.G. Vladimirov ^{1,2}, I.V. Karmysheva ^{1,2}, V.A. Yakovlev ^{1,2}

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptuyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

² Novosibirsk State University, 1 Pirogov St, Novosibirsk 630090, Russia

ABSTRACT. The first U-Pb isotope-geochronological data were obtained on the age of early collisional granitoids of the Matut massif (Western Sangilen, SE Tuva). The rocks that have been studied are assigned to magnesian, calc-alkaline, high-potassium, and low-peraluminious varieties. LA-ICP-MS analysis on two zircon samples showed that the Matut granite massif formation age corresponds to 522 Ma (U/Pb, LA-ICP-MS, zircons, 520±3 Ma (sample KT-1070) and 524±3 Ma (sample KT-1324)). Thus, the Matut massif granitoids are among the most ancient in Western Sangilen and were formed at the early collisional stage of the structural evolution of the region. Based on the data obtained, an assessment was made of the duration of collisional orogeny on the northwestern margin of the Tuva-Mongolian massif. The initiation to collapse period of the orogen is at least 80 million years.

KEYWORDS: orogeny; collisional; U-Pb; zircon; LA-ICP-MS; granitoids; Sangilen; Tuva-Mongolian massif; CAOБ

FUNDING: The study was performed as part of the state assignment of Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (№ 122041400176-0; № 122041400171-5).



EDN: QHEAQC

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Dina V. Semenova, sediva@igm.nsc.ru

Received: April 23, 2024

Revised: May 24, 2024

Accepted: June 14, 2024

FOR CITATION: Semenova D.V., Vladimirov V.G., Karmysheva I.V., Yakovlev V.A., 2024. The Age of Early Collisional Granitoids of Western Sangilen (SE Tuva): Implications for Estimating the Duration of Orogeny at the Margin of the Tuva-Mongolian Massif. *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (4), 0767. doi:10.5800/GT-2024-15-4-0767

ВОЗРАСТ РАННЕКОЛЛИЗИОННЫХ ГРАНИТОИДОВ ЗАПАДНОГО САНГИЛЕНА (ЮГО-ВОСТОЧНАЯ ТУВА): ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ОРОГЕНЕЗА НА ОКРАИНЕ ТУВИНО-МОНГОЛЬСКОГО МАССИВА

Д.В. Семенова¹, В.Г. Владимиров^{1,2}, И.В. Кармышева^{1,2}, В.А. Яковлев^{1,2}

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

АННОТАЦИЯ. Получены первые U-Pb изотопно-геохронологические данные о возрасте раннеколлизиионных гранитоидов Матутского массива (Западный Сангилен, Юго-Восточная Тува). Изученные породы относятся к магнезиальным, известково-щелочным, высококалиевым и слабопералюминиевым разновидностям. По двум пробам циркона методом LA-ICP-MS установлено, что возраст становления Матутского гранитного массива отвечает 522 млн лет (U/Pb, LA-ICP-MS, цирконы, 520±3 млн лет (обр. КТ-1070) и 524±3 млн лет (обр. КТ-1324)). Таким образом, гранитоиды Матутского массива являются одними из наиболее древних на Западном Сангиле и формировались на раннеколлизиионном этапе развития структур региона. На основе полученных данных оценена длительность коллизиионного орогенеза на северо-западной окраине Тувино-Монгольского массива. Период от инициации до коллапса орогена составляет не менее 80 млн лет.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: орогенез; коллизиионный; U-Pb; циркон; LA-ICP-MS; гранитоиды; Сангилен; Тувино-Монгольский массив; ЦАСП

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование проводилось в рамках госзадания Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (№ 122041400176-0; № 122041400171-5).

1. ВВЕДЕНИЕ

Абсолютное датирование основных рубежей и длительности коллизиионного орогенеза имеет фундаментальное значение при построении моделей эволюции литосферы. Инициация и коллапс процессов орогенеза ознаменует кардинальное изменение интенсивности и кинематики взаимодействия крупных фрагментов континентальной и океанической литосферы.

Особую сложность представляет датирование ранних коллизиионных событий. Это связано с глубинным характером начальных этапов тектогенеза и синтетектонического магматизма. Однако ключевым препятствием при проведении изотопно-геохронологических исследований являются масштабные тектонотермальные события при коллапсе орогенных структур и проявление площадного позднеколлизиионного кислого магматизма. В совокупности они маскируют либо уничтожают объекты и признаки ранних коллизиионных событий.

В настоящей работе представлены данные о возрасте раннеколлизиионных гранитоидов Матутского массива (Западный Сангилен, Юго-Восточная Тува), позволившие оценить длительность орогенеза на северо-западной окраине Тувино-Монгольского массива (Центрально-Азиатский складчатый пояс, ЦАСП).

2. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ

Матутский гранитный массив представляет собой гарполит площадью до 10 км². Он расположен в матрикс метаморфических пород эрзинского комплек-

са. В пределах одноименной тектонической зоны уровень метаморфизма вмещающих пород неоднороден по своим характеристикам и достигает локально гранулитов и верхов амфиболитовой фации [Karmysheva et al., 2022a, 2022b].

В юго-западной части гранитоиды могут не иметь видимых контактов с вмещающими мигматитами и гнейсогранитами эрзинского комплекса, что связано как с существованием признаков частичного плавления в породах рамы, так и с конформностью структурных элементов в метапелитах с магматической полосчатостью в эндоконтакте тела гранитов. Общность структурных элементов метаморфических пород и гранитоидов обусловлена их синтетектоническим генезисом на ранних стадиях орогенеза в обстановках сжатия и заложения Эрзинской сдвиговой зоны на юго-восточной окраине Тувино-Монгольского массива [Vladimirov et al., 2005, 2017; Karmysheva et al., 2022a, 2022b].

Гранитоиды Матутского массива, как и метаморфические породы эрзинского комплекса, расположены в пределах Эрзинской тектонической зоны (рис. 1).

Граниты Матутского массива (Qz – 35–40 %, Kfs – 45–50 %, Pl – 10–20 %, Vt+Nbl ~5 %, ±Ms)¹ характеризуются среднекрупнозернистой слабопорфировидной структурой, в которой наиболее крупные вкрапленники представлены калиевым полевым шпатом. Текстуры варьируются от массивных в центральной части массива до гнейсовидных и отчетливо директивных – в краевых частях.

¹ Сокращения приведены по [Warr, 2021].

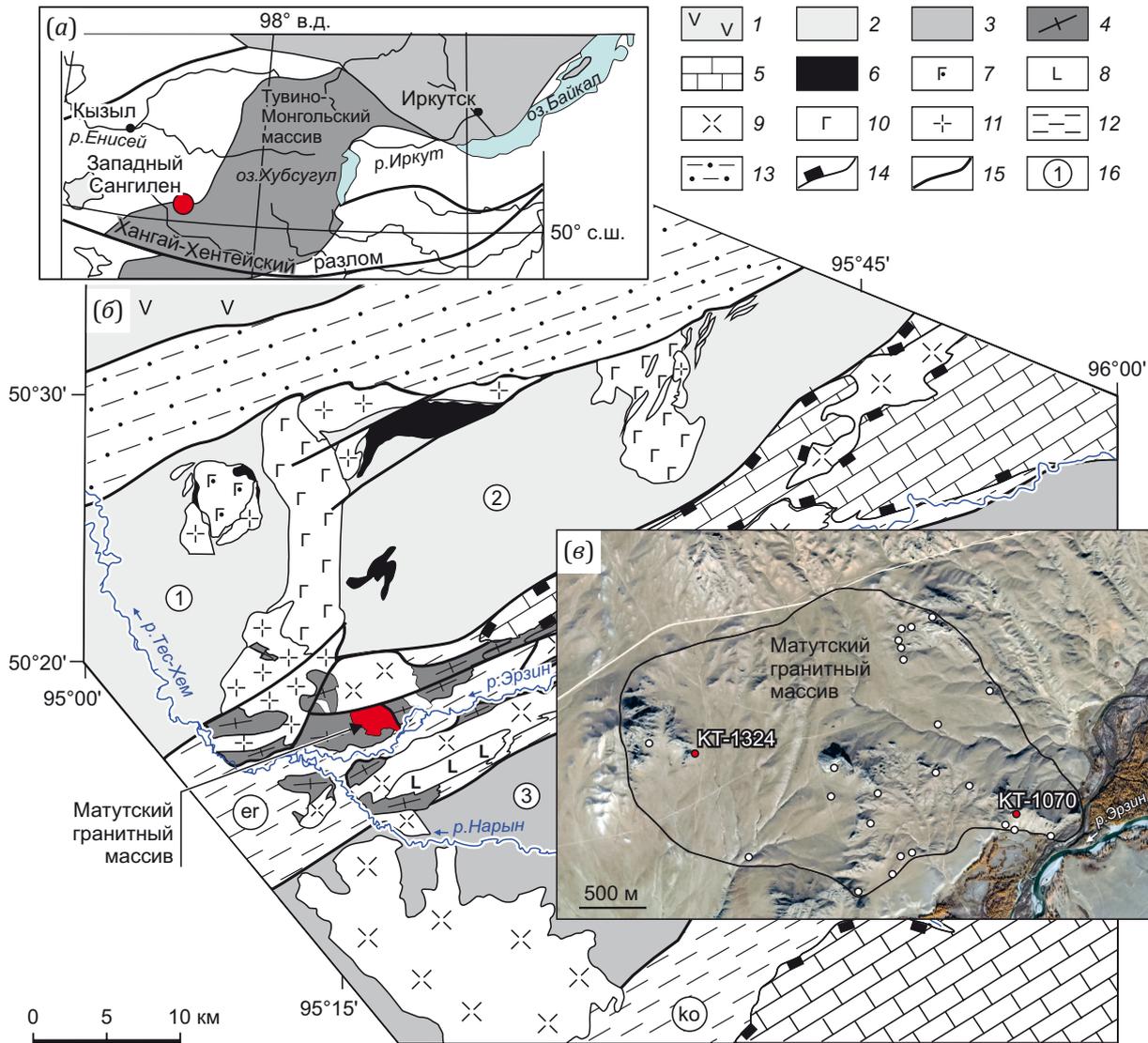


Рис. 1. Геологическое положение Матутского массива в структурах Западного Сангилен. (а) – положение Западного Сангилен в структурах южного обрамления Сибирской платформы (по [Kuzmichev, 2004], с упрощениями). (б) – геологическая схема Западного Сангилен (по [Karmysheva et al., 2017], с упрощениями и изменениями). 1 – образования Таннуольской островной дуги; 2–4 – метаморфические комплексы: 2 – моренский, 3 – нижнеэрзинский, 4 – эрзинский мигматит-гранитный; 5 – карбонатно-терригенный чехол (сангиленская серия); 6–11 – магматические комплексы и серии: 6 – актоврацкий дунит-гарцбургитовый комплекс, 7 – правотарлашкинский анортозит-габбро-норитовый комплекс, 8 – габброиды, 9 – гранитоиды баянкольского габбро-монцодиорит-гранодиорит-гранитного комплекса, 10 – габброиды, 11 – гранитоиды башкымугурского габбро-монцодиорит-гранит-лейкогранитного комплекса; 12 – тектонические зоны: er – Эрзинская, ko – Кокмолгаргинская; 13 – Агардагский сутурный шов; 14 – границы тектонических покровов; 15 – разломы; 16 – тектонические блоки: Тарлашкинский (1), Мугуро-Чинчилигский (2), Эрзин-Нарынский (3). (с) – контуры Матутского гранитного массива на спутниковых снимках Google Earth (по материалам [Vladimirov et al., 2017]) с положением точек отбора проб (красный цвет): КТ-1324 (50°17'47.87" с.ш.; 95°16'11.71" в.д.), КТ-1070 (50°17'33.25" с.ш.; 95°18'11.81" в.д.) и образцов для петрогеохимических исследований (белый цвет).

Fig.1. Geological position of the Matut massif in the Western Sangilen. (а) – the position of western Sangilen in the structures bordering the Siberian Platform on the south (after [Kuzmichev, 2004], as simplified). (б) – schematic geological map of Western Sangilen (after [Karmysheva et al., 2017], as revised and simplified). 1 – rocks of the Tannu-Ola island arc; 2–4 – metamorphic complexes: 2 – Moren, 3 – Nizhny Erzin, 4 – Erzyn migmatite-granite; 5 – carbonate-terrigenous cover (Sangilen series); 6–11 magmatic complexes and series: 6 – Aktovrak dunit-harzburgite complex, 7 – Pravotarlashka anorthosite-gabbro-norite complex, 8 – gabbroids, 9 – granitoids of the Bayankol gabbro-montzodiorite-granodiorite-granite complex, 10 – gabbroids, 11 – granitoids of the Bashkymugur gabbro-montzodiorite-granite-leucogranite complex; 12 – tectonic zones: er– Erzin, ko – Kokmolgargin; 13 – Agardag suture; 14 – boundaries of tectonic covers; 15 – faults; 16 – tectonic blocks: Tarlashka (1), Muguro-Chinchilig (2), Erzin-Naryn (3). (с) – Contours of the Matut granite massif on Google Earth satellite images (after [Vladimirov et al., 2017]) with the positions of sampling points: KT-1324 (50°17'47.87" N; 95°16'11.71" E, KT-1070 (50°17'33.25" N; 95°18'11.81" E) and samples for petrogeochemical studies (white color).

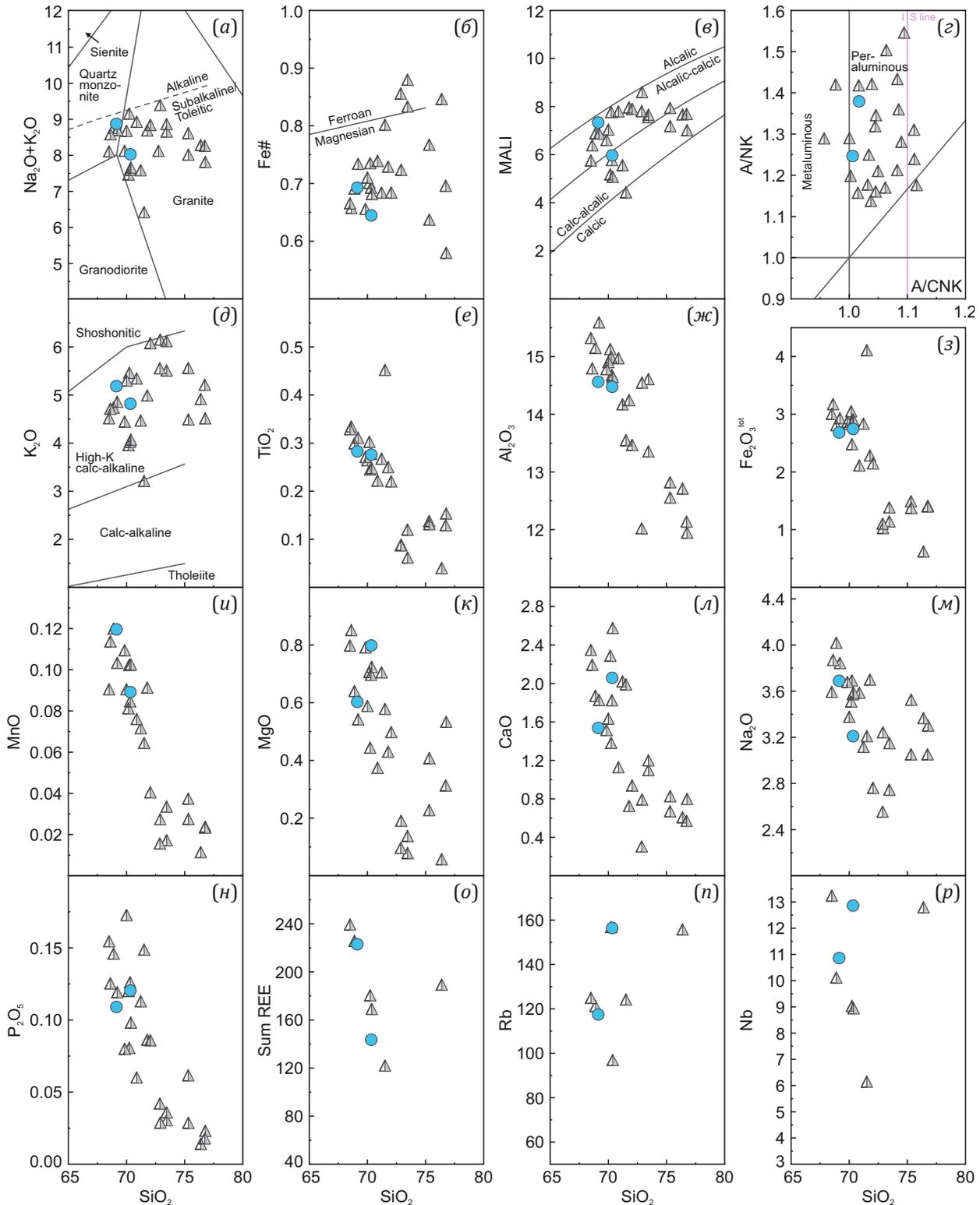


Рис. 2. Классификационные и вариационные диаграммы для гранитов Матутского массива (кружками показаны анализы проб для геохронологических исследований).

(a) – $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ [Middlemost, 1994]; (б) – $\text{FeO}^{\text{tot}}/(\text{FeO}^{\text{tot}}+\text{MgO}) - \text{SiO}_2$ [Frost et al., 2001]; (в) – MALI – SiO_2 [Frost et al., 2001]; (z) – $\text{A}/\text{NK} - \text{A}/\text{CNK}$, I-S линия по [Chappell, White, 2001]; (д) – $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ [Peccerillo, Taylor, 1976]; (e–h) – диаграммы содержания породообразующих элементов по отношению к SiO_2 ; (i–p) – содержание редких элементов по отношению к SiO_2 .

Fig. 2. Classification and variation diagrams for granites of the Matut massif (circles show analyzes of samples for geochronological studies).

(a) – $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ [Middlemost, 1994]; (б) – $\text{FeO}^{\text{tot}}/(\text{FeO}^{\text{tot}}+\text{MgO}) - \text{SiO}_2$ [Frost et al., 2001]; (в) – MALI – SiO_2 [Frost et al., 2001]; (z) – $\text{A}/\text{NK} - \text{A}/\text{CNK}$, I-S line after [Chappell, White, 2001]; (д) – $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ [Peccerillo, Taylor, 1976]; (e–h) – compositional diagrams of petrogenic elements vs SiO_2 ; (i–p) – compositional diagrams of rare elements vs SiO_2 .

Для пород характерны широкие вариации значений по основным петрохимическим параметрам (Прил. 1, табл. 1.1).

Граниты Матутского массива характеризуются высокими содержаниями кремнезема (68.5–76.8 мас. %) и щелочей ($K_2O+Na_2O=6.4-9.4$ мас. %, $K_2O/Na_2O=1.0-2.2$), что обуславливает их положение на TAS диаграмме в полях кварцевых монцонитов и гранитов (рис. 2, а). Породы высококалийевые (рис. 2, д) и преимущественно магнезиальные ($MgO=0.06-0.85$ мас. %, $Fe_2O_3^{общ}=0.6-4.1$, $\#Fe=0.58-0.88$) (рис. 2, б), с низкими содержаниями TiO_2 (0.04–0.45 мас. %).

На диаграмме с MAlI точки составов занимают поля известково-щелочных и щелочно-известковистых пород (рис. 2, в). Граниты преимущественно слабопералюминиевые ($ASI=0.97-1.12$) (рис. 2, г), концентрации Al_2O_3 и CaO не выдержаны (11.9–15.6 и 0.3–2.6 мас. % соответственно).

На бинарных диаграммах наблюдается закономерное снижение концентраций всех петрогенных оксидов, за исключением K_2O , с ростом кремнекислотности.

Содержания РЗЭ снижаются с увеличением концентрации SiO_2 в породах, HFS и LIL элементы варьируются вне зависимости от кремнекислотности (рис. 2).

Все образцы гранитов характеризуются наклонными спектрами распределения РЗЭ с преобладанием легких лантаноидов над тяжелыми при невыдержанном содержании последних ($(La/Yb)_N=8.3-16.5$ $(Gd/Yb)_N=1.2-2.1$) и отрицательными европиевыми аномалиями ($Eu/Eu^*=0.4-0.7$) (рис. 3, а). Спайдер-диаграммы демонстрируют отрицательные аномалии по высокозарядным элементам (Nb, Ta, Ti), U и Sr (рис. 3, б).

Вещественный состав образцов гранитов, используемых для изотопно-геохронологических исследований, идентичен типичным кислым породам Матутского массива (см. рис. 2; рис. 3; Прил. 1, табл. 1.1).

Вариации содержаний петрогенных оксидов в гранитах Матутского массива могут являться отражением процессов последовательного плавления одного или нескольких источников (с последующими эпизодами внедрения), захвата реститового материала или фракционной кристаллизации. Следует отметить, что в гранитах отсутствуют полевые и петрографические свидетельства наличия реститовых фаз. Многоактное плавление различных источников маловероятно в силу единых петрохимических трендов и однофазного строения массива. Последнее наблюдение, наряду со снижением концентраций РЗЭ при росте кремнекислотности пород, не позволяет рассматривать процесс последовательного плавления одного источника в качестве определяющего разнообразие составов гранитов.

Таким образом, наблюдаемые петрохимические тренды отвечают модели фракционной кристаллизации с фракционированием амфибола, биотита и плагиоклаза. Обеднение легкими и тяжелыми РЗЭ по мере увеличения кремнекислотности пород указывает на то, что при фракционной кристаллизации происходило удаление значительного количества акцессорных фаз, таких как монацит (LREE) и ксенотим (HREE).

Поскольку Матутский гранитный массив не является продуктом консолидации магматической камеры, необходимо предполагать фракционирование в ходе перемещения магмы и/или ее внедрения. Однако рассуждения на эту тему выходят за рамки данной статьи.

Граниты Матутского массива магнезиальные, известково-щелочные высококалийевые, слабопералюминиевые, с высокими содержаниями Ba (798–1060 г/т) и Sr (113–351 г/т) и низкими Rb (97–157 г/т). В сочетании с высоким содержанием Na_2O (>2.6 мас. %), умеренным CaO (среднее=1.4 мас. %) это указывает на источник, обедненный пелитовым материалом [Miller, 1985].

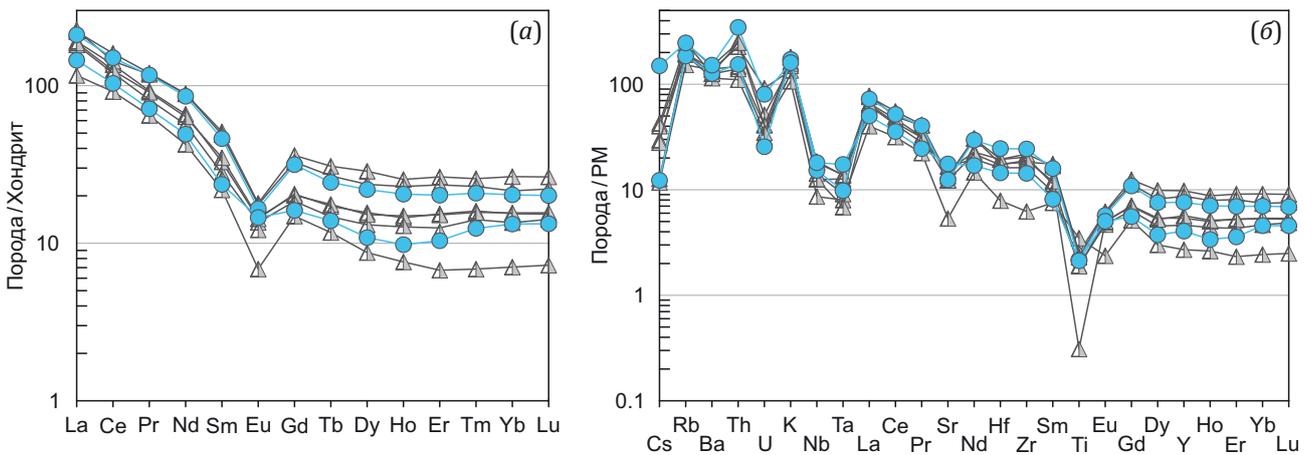


Рис. 3. Нормированные по хондриту кривые распределения редкоземельных элементов (а) и нормированные по примитивной мантии мультиэлементные диаграммы (б) для гранитов Матутского массива (кружками показаны анализы проб для геохронологических исследований). Данные для хондрита и примитивной мантии по [Sun, McDonough, 1989].

Fig. 3. Chondrite-normalized distribution curves of rare earth elements (a) and multi-element diagrams normalized to the primitive mantle (b) for granites of the Matut massif (circles show analyzes of samples for geochronological studies). The chondrite and primitive mantle data are borrowed from [Sun, McDonough, 1989].

Низкие значения отношений Rb/Sr (0.3–1.1) и Rb/Ba (0.1–0.2) указывают на то, что исследуемые породы имеют сходство с гранитами, формировавшимися при плавлении метаматматических (Rb/Sr=0.11–0.19, Rb/Ba=0.09–0.16 [Simon et al., 2017]), а не метапелитовых источников (Rb/Sr ~4, Rb/Ba ~1 [Paul et al., 2014]).

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Выбор места отбора проб

Матутский гранитный массив располагается в пределах Эрзинской тектонической зоны и отражает длительную историю ее эволюции [Vladimirov et al., 2005]. Современная морфология гранитного массива отвечает гарполиту с корневой частью на востоке тела. Серповидная часть магматического тела полого протягивается на запад. Высота серповидной части тела от подошвы (1150 м) до ее кровли (1250 м) не превышает 100 м. Конформное залегание гранитов с вмещающими гнейсами и гранитогнейсами эрзинского метаморфического комплекса, автохтонными гранитными жилами эрзинского комплекса, признаками магматического течения в эндоконтакте может указывать на автохтонный/параавтохтонный характер матутских гранитоидов. В совокупности это существенно осложняет выбор места отбора проб для изотопно-геохронологических исследований. В связи с этим была отобрана серия проб. Среди них были выбраны две наиболее представительные пробы, являющиеся типичными как по петрогеохимическим (Прил. 1, табл. 1.1), так и по петрографическим характеристикам (отсутствие явных признаков деформирования, характерный минеральный состав – Qz+Kfs+Pl+Bt+Hbl). Первая проба (КТ-1070) отобрана на востоке массива в корневой части тела, примерно в 400 м от контакта. Вторая проба (КТ-1324) отобрана на западе массива в серповидной части гарполита, примерно в 500 м от контакта.

3.2. Аналитические методы

U-Pb изотопно-геохронологические исследования цирконов выполнены в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) методом LA-ICP-MS на масс-спектрометре высокого разрешения Element XR (Thermo Fisher Scientific) с эксимерной системой лазерной абляции Analyte Excite (Teledyne Cetac). Данные о морфологии и внутреннем строении зерен получены по катодолюминесцентным изображениям на электронном сканирующем микроскопе LEO-1430. Параметры измерения масс-спектрометра оптимизировали для получения максимальной интенсивности сигнала ^{208}Pb при минимальном значении $^{248}\text{ThO} + ^{232}\text{Th} +$ (менее 2 %), используя стандарт NIST SRM612. Все измерения выполняли по массам ^{202}Hg , $^{204}(\text{Pb}+\text{Hg})$, ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{238}U . Детектирование сигналов проводилось в режиме счета (counting) для всех изотопов, кроме ^{238}U и ^{232}Th (режим triple). Диаметр лазерного луча составлял 35 мкм, частота повторения импульсов 5 Нз и плотность энергии лазерного излучения 5 Дж/см². Данные масс-спектрометрических изме-

рений обрабатывали с помощью программы «Glitter» [Griffin et al., 2008]. Для учета элементного и изотопного фракционирования U-Pb изотопные отношения нормализовали на соответствующие значения изотопных отношений стандартных цирконов Plesovice [Sláma et al., 2008]. Средневзвешенный возраст и диаграмма с конкордией построены с помощью программы Isoplot [Ludwig, 2003]. Погрешности единичных анализов (изотопных отношений) приведены на уровне 1σ, погрешности возрастов и пересечений с конкордией – на уровне 2σ. Для контроля качества данных использован стандартный циркон Temora [Black et al., 2003]. В ходе исследований для циркона Temora получен возраст 419 ±4 млн лет (n=14), что совпадает с оценками возраста, полученными методом ID-TIMS [Black et al., 2003].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ U/Pb ИЗОТОПНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЦИРКОНА

Внутреннее строение цирконов из образцов КТ-1324 и КТ-1070, судя по BSE- и CL-изображениям, идентично и характеризуется тонкой осцилляторной магматической зональностью (рис. 4, 5). Из двух образцов химический состав циркона детально анализировался в пробе КТ-1070.

По результатам микрорентгеноспектрального анализа среднее содержание основных элементов Zr, Si, O в цирконе составляет соответственно 48.64, 15.34 и 35.66 мас. %. Измеренное содержание кислорода O и рассчитанное стехиометрическое – Ocm (35.19 мас. %) практически совпадают между собой. Наличие избыточного кислорода (Oизб=O–Ocm) является признаком гидратации циркона, т.е. присутствия H₂O и/или OH-групп. В цирконе образца КТ-1070 отклонение от стехиометрии по кислороду и, соответственно, гидратация матрицы минимальны: среднее Oизб=0.47 мас. %, что на уровне погрешности определения. Из элементов-примесей в цирконе фиксируется Hf (0.8–1.3 мас. %); концентрация других примесей ниже их пределов обнаружения.

По результатам микронзондового и микроспектроскопического анализа зерна циркона образца КТ-1070 (по-видимому, и образца КТ-1324) характеризуются высокой степенью кристалличности, минимальной (до средней) степенью разупорядочения структуры, обладают составом, близким к стехиометрическому, однородным по содержанию основных элементов – Zr, Si, O и примесного Hf.

На основе полученных результатов цирконы образцов КТ-1070 и КТ-1324 можно рассматривать как эталонные для Матутского гранитоидного массива. По данным монофракциям цирконов были получены оценки возраста гранитов Матутского массива – 520 ±3 млн лет (обр. КТ-1070) и 524±3 млн лет (обр. КТ-1324) (см. рис. 4; рис. 5).

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Характерной чертой кислого магматизма коллизионных зон является вовлечение интрузивных тел в

повторные высокотемпературные деформации и по- листадийные термальные события. Процессы воздей- ствия на горные породы и минералы разнообразны. Изменения циркона могут включать рекристаллиза- цию, метаморфический рост, значительные изменения в морфологии, внутренней структуре и химическом составе отдельных зерен. Как следствие, при выборе проб для анализа особое внимание уделялось призна- кам появления метамиктных состояний, искажений во внутренней кристаллической структуре зерен цир-

кона, их хрупкому и вязкому деформированию. Про- веденные предварительные исследования позволили остановиться на двух пробах, для которых были полу- чены наиболее древние оценки возраста для гранитов Матутского массива и одни из наиболее древних воз- растов для гранитоидов всего Западного Сангилен – 520±3 млн лет (обр. КТ-1070) и 524±3 млн лет (обр. КТ-1324) (см. рис. 4; рис. 5).

Полученные оценки возраста раннеколлизионно- го гранитообразования наиболее близки к возрасту

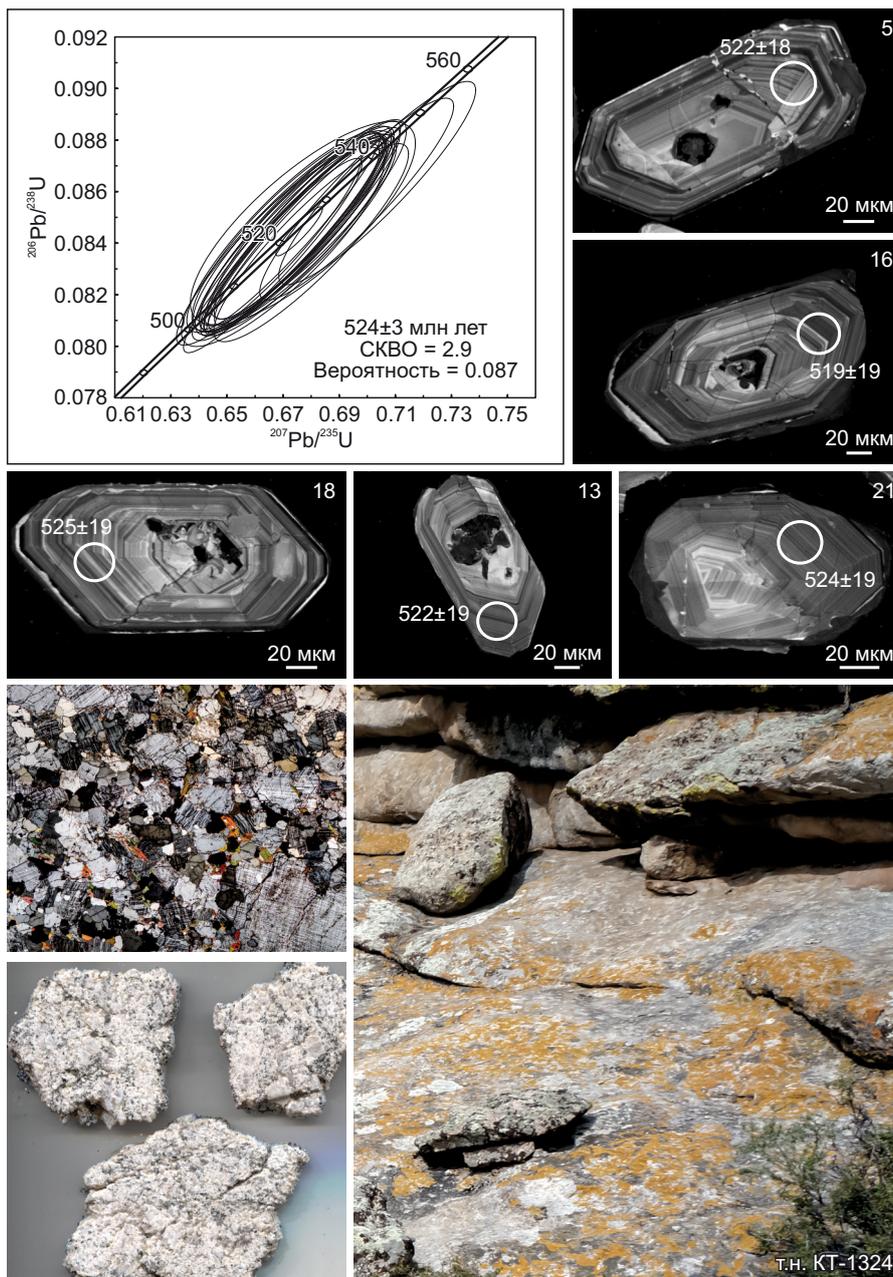


Рис. 4. Результаты U-Pb датирования цирконов Матутского гранитного массива (т.н. КТ-1324): диаграмма с конкордией; представительные катодолуминесцентные изображения цирконов (окружности – номера точек съемки, номера см. в Прил. 1, табл. 1.2); микрофотография шлифа в скрещенных николях; пластинки и точка отбора образца.

Fig. 4. U-Pb dating results for zircons of the Matut granitoid massif (point KT-1324 sampling point): U-Pb concordia diagram; cathodoluminescent images of representative zircon crystals (circles are the numbers of imaging points, see App. 1, Table 1.2 for details); microphotograph of thin section under crossed nicols; plates and rock sampling point.

базитового магматизма (Правотарлашкинский массив, 524 ± 9 млн лет [Izokh et al., 2001]), кианитового метаморфизма (515.7 ± 6.9 млн лет [Gibsher et al., 2017]) и возрасту синметаморфических жильных гранитоидов Ортоадырского массива (521 ± 12 и 516 ± 5 млн лет [Kozakov et al., 1999, 2003, 2021]). Данный возрастной рубеж 522 млн лет отвечает пику коллизионных событий на Западном Сангилене с инициацией кислого и основного магматизма в нижней коре, метаморфизма ставролит-кианитового типа и заложения круп-

ных тектонических нарушений [Vladimirov et al., 2005, 2017].

В публикациях, посвященных геологии региона, существуют два более древних определения возраста, но они не относятся к периоду коллизионного орогенеза на Западном Сангилене.

Первый (569 ± 1 млн лет [Pfänder et al., 2002]) отвечает возрасту расслоенного Карашатского дунит-верлит-клинопироксенит-габбрового массива, рассматриваемого, с учетом геологической позиции, в качестве

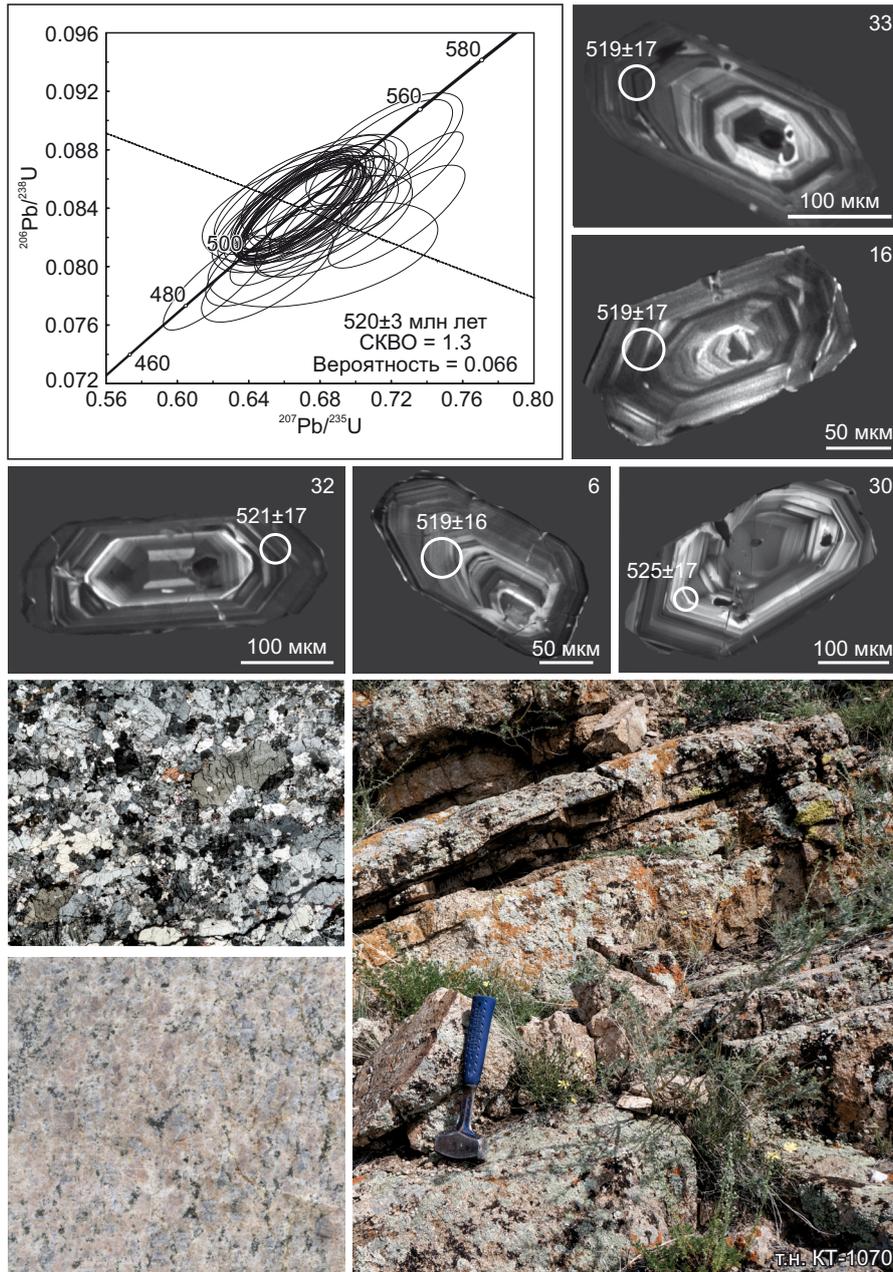


Рис. 5. Результаты U-Pb датирования цирконов Матутского гранитного массива (т.н. КТ-1070): диаграмма с конкордией; представительные катодолуминесцентные изображения цирконов (окружности – номера точек съемки, см. Прил. 1, табл. 1.2); микрофотография шлифа в скрещенных николях; пластинки и точка отбора образца.

Fig. 5. U-Pb dating results for zircon of Matut granitoid massif (point KT-1070): U-Pb concordia diagram; cathodoluminescent images of representative zircon crystals (circles are the numbers of imaging points, see App. 1, Table 1.2); microphotograph of thin section undercrossed nicols; plates and rock sampling point.

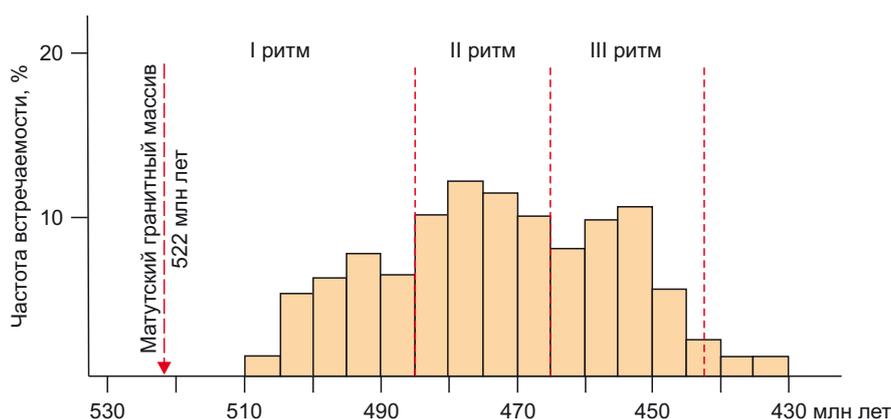


Рис. 6. Периодичность раннепалеозойского гранитоидного магматизма в Тувино-Монгольском сегменте ЦАСП (по [Rudnev et al., 2004], с упрощениями и добавлениями).

Fig. 6. Periodicity of Early Paleozoic granitoid magmatism in the Tuva-Mongolian segment of the CAOB (after [Rudnev et al., 2004], as simplified or supplemented).

фрагмента докембрийских офиолитов [Pfänder et al., 2002], второй (536 ± 5.7 млн лет [Salnikova et al., 2001]) – возрасту тоналитов из «серых» гнейсов Мугуро-Чинчилигского тектонического блока. В обоих случаях это доколлизийные образования.

Завершением коллизийных событий в Западном Сангилене можно считать появление постколлизийных камптонитовых даек с возрастом 444 ± 7.5 млн лет [Gibsher et al., 2012]. В структурном плане они занимают секущее положение относительно типичных коллизийных структур юго-западного простирания. Данный рубеж прямо согласуется с оценками возраста (460–450 млн лет) третьего заключительного ритма гранитоидного магматизма в Тувино-Монгольском сегменте ЦАСП – позднетаннуольский (451 ± 6 млн лет) и сархойский (450 ± 5 млн лет) комплексы [Rudnev et al., 2004] (рис. 6).

Таким образом, с учетом полученных данных длительность коллизийного орогенеза и сопряженного с ним магматизма на северо-западной окраине ТММ составляла не менее 80 млн лет. Следует отметить, что данные оценки не противоречат и хорошо коррелируются с общей периодичностью в 90 млн лет масштабного гранитообразования в пределах ЦАСП [Rudnev et al., 2004].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возраст становления Матутского гранитного массива отвечает 522 млн лет (U/Pb, LA-ICP-MS, цирконы, 520 ± 3 млн лет (обр. КТ-1070) и 524 ± 3 млн лет (обр. КТ-1324)).

Матутский гранитоидный массив является одним из наиболее древних проявлений раннеколлизийного кислого магматизма на Западном Сангилене (Юго-Восточная Тува).

Длительность коллизийного орогенеза на северо-западной окраине Тувино-Монгольского массива от инициации до его коллапса составляет не менее 80 млн лет.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность чл.-корр. д.г.-м.н. Н.Н. Круку за обсуждение результатов исследований и ценные замечания.

8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

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

All 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.

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

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., Aleinikoff J.N., Davis D.W., Korsch R.J., Foudoulis C., 2003. TEMORA 1: A New Zircon Standard for Phanerozoic U-Pb Geochronology. *Chemical Geology* 200 (1–2), 155–170. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(03\)00165-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(03)00165-7).
- Chappell B.W., White A.J.R., 2001. Two Contrasting Granite Types: 25 Years Later. *Australian Journal of Earth Sciences* 48 (4), 489–499. <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2001.00882.x>.
- Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D., 2001. A Geochemical Classification for Granitic Rocks. *Journal of Petrology* 42 (11), 2033–2048. <https://doi.org/10.1093/ptrology/42.11.2033>.
- Gibsher A.A., Malkovets V.G., Travin A.V., Belousova E.A., Sharygin V.V., Konc Z., 2012. The Age of Camptonite Dikes of the Agardag Alkali-Basalt Complex (Western Sangilen): Results of Ar/Ar and U/Pb Dating. *Russian Geology and Geophysics* 53 (8), 763–775. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.06.004>.

Gibsher A.S., Gibsher A.A., Malkovets V.G., Shelepaev R.A., Terleev A.A., Sukhorukov V.P., Rudnev S.N., 2017. Nature and Age of High-Pressure (Kyanite) Metamorphism in Western Sangilen (South-East Tuva). In: Geodynamic Settings and Thermodynamic Conditions of Regional Metamorphism in the Precambrian and the Phanerozoic. Proceedings of the V Russian Conference on Precambrian Geology and Geodynamics (October 24–26, 2017). Springer, Saint Petersburg, p. 52–53 (in Russian) [Гибшер А.С., Гибшер А.А., Мальковец В.Г., Шелепаев Р.А., Терлеев А.А., Сухоруков В.П., Руднев С.Н. Природа и возраст высокобарического (кианитового) метаморфизма Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува) // Геодинамические обстановки и термодинамические условия регионального метаморфизма в докембрии и фанерозое: Материалы V Российской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия (24–26 октября 2017 г.). СПб.: Springer, 2017. С. 52–53].

Griffin W.L., Powell W.J., Pearson N.J., O'Reilly S.Y., 2008. GLITTER: Data Reduction Software for Laser Ablation ICPMS. In: P.J. Sylvester (Ed.), Laser Ablation ICP-MS in the Earth Sciences: Current Practices and Outstanding Issues. Mineralogical Association of Canada Short Course Series. Vol. 40. Vancouver, Canada, p. 308–311.

Izokh A.E., Kargopolov S.A., Shelepaev R.A., Travin A.V., Egorova V.V., 2001. Cambrian-Ordovician Basite Magmatism of the Altai-Sayan Folded Area and Its Related Metamorphism with High Temperatures and Low Pressures. In: Actual Problems of Geology and Minerageny of the Southern Siberia. Proceedings of the Scientific and Practical Conference (October 31 – November 2, 2001, Elan, Novokuznetsk District, Kemerovo Region). IIN 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 минерагении юга Сибири: Материалы научно-практической конференции (31 октября – 2 ноября 2001 г., пос. Елань Новокузнецкого района Кемеровской области). Новосибирск: Изд-во ИГиЛ СО РАН, 2001. С. 68–72].

Karmysheva I.V., Vladimirov V.G., Kuibida M.L., Semenova D.V., Yakovlev V.A., 2022a. Petrogenesis and Tectonic Settings of the Formation of High-K Granites (Western Sangilen, Tuva-Mongolian Massif). *Geosphere Research* 1, 6–32 (in Russian) [Кармышева И.В., Владимиров В.Г., Куйбида М.Л., Семенова Д.В., Яковлев В.А. Петрогенезис и тектонические обстановки образования высококалийевых гранитов (Западный Сангилен, Тувино-Монгольский массив) // Геосферные исследования. 2022. № 1. С. 6–32]. <https://doi.org/10.17223/25421379/22/1>.

Karmysheva I.V., Vladimirov V.G., Rudnev S.N., Yakovlev V.A., Semenova D.V., 2022b. Syntectonic Metamorphism of a Collisional Zone in the Tuva-Mongolian Massif, Central Asian Orogenic Belt: P-T Conditions, U-Pb Ages and Tectonic Setting. *Journal of Asian Earth Sciences* 220, 104919. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2021.104919>.

Karmysheva I.V., Vladimirov V.G., Vladimirov A.G., 2017. Synkinematic Granitoid Magmatism of Western Sangilen, South-East Tuva. *Petrology* 25, 87–113. <https://doi.org/10.1134/S0869591117010040>.

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., 1999. Metamorphic Age of Crystalline Complexes of the Tuva-Mongolia Massif: The U-Pb Geochronology of Granitoids. *Petrology* 7 (2), 177–191.

Kozakov I.K., Kovach V.P., Salnikova E.B., Kröner A., Adamskaya E.V., Azimov P.Ya., Gorokhovskiy B.M., Ivanova A.A., Oydup Ch.K., Plotkina Yu.V., 2021. Geochronology and Geodynamic Settings of Metamorphic Complexes in the Southwestern Part of the Tuva-Mongolian Terrane, Central Asian Foldbelt. *Stratigraphy and Geological Correlation* 29, 389–410. <https://doi.org/10.1134/S0869593821030035>.

Kozakov I.K., Kovach V.P., Yarmolyuk V.V., Kotov A.B., Salnikova E.B., Zagornaya N.Yu., 2003. Crust-Forming Processes in the Geologic Development of the Tuva-Mongolia Massif: Sm-Nd Isotopic and Geochemical Data for Granitoids. *Petrology* 11 (5), 444–463.

Kuzmichev A.B., 2004. Tectonic History of the Tuva-Mongolian Massif: Early Baikal, Late Baikal and Early Caledonian Stages. *Probel-2000, Moscow*, 192 p. (in Russian) [Кузьмичев А.Б. Тектоническая история Тувино-Монгольского массива: раннебайкальский, позднебайкальский и раннекаледонский этапы. М.: Пробел-2000, 2004. 192 с.].

Ludwig K.R., 2003. ISOPLOT/Ex: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Version 3.00. Berkeley Geochronology Center Special Publication 4, 74 p.

Middlemost E.A.K., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth-Science Reviews* 37 (3–4), 215–224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9).

Miller C.F., 1985. Are Strongly Peraluminous Magmas Derived from Pelitic Sedimentary Sources? *Journal of Geology* 93 (6), 673–689. <https://doi.org/10.1086/628995>.

Paul A., Jung S., Romer R.L., Stracke A., Hauf F., 2014. Petrogenesis of Synorogenic High-Temperature Leucogranites (Damara Orogen, Namibia): Constraints from U-Pb Monazite Ages and Nd, Sr and Pb Isotopes. *Gondwana Research* 25 (4), 1614–1626. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.06.008>.

Peccerillo A., Taylor S.R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 58, 63–81. <https://doi.org/10.1007/BF00384745>.

Pfänder J.A., Jochum K.P., Kozakov I., Kröner A., Todt W., 2002. Coupled Evolution of Back-Arc and Island Arc-Like Mafic Crust in the Late Neoproterozoic Agardagh Tes-Chem Ophiolite Central Asia: Evidence from Trace Element and Sr-Nd-Pb Isotope Data. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 143, 154–174. <https://doi.org/10.1007/s00410-001-0340-7>.

Rudnev S.N., Vladimirov A.G., Kruk N.N., Ponomarchuk V.A., Babin G.A., Borisov S.M., 2004. Early Paleozoic Granitoid Batholiths of the Altai-Sayan Folded Region (Lateral-Temporal Zoning and Sources). *Doklady Earth Sciences* 396 (4), 492–495.

Salnikova E.B., Kozakov I.K., Kotov A.B., Kroner A., Todt W., Bibikova E.V., Nutman A., Yakovleva S.Z., Kovach V.P., 2001. Age of Palaeozoic Granites and Metamorphism in the Tuvino-Mongolian Massif of the Central Asian Mobile Belt: Loss of a Precambrian Microcontinent. *Precambrian Research* 110 (1-4), 143–164. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(01\)00185-1](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(01)00185-1).

Simon I., Jung S., Romer R.L., Garbe-Schönberg D., Berndt J., 2017. Geochemical and Nd-Sr-Pb Isotope Characteristics of Synorogenic Lower Crust-Derived Granitoids (Central Damara Orogen, Namibia). *Lithos* 274–275, 397–411. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.12.033>.

Sláma J., Košler J., Condon D.J., Crowley J.L., Gerdes A., Hanchar J.M., Horstwood M.S.A., Morris G.A. et al., 2008. Plešovice Zircon – A New Natural Reference Material for U-Pb and Hf Isotopic Microanalysis. *Chemical Geology* 249 (1-2), 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005>.

Sun S.-S., McDonough W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society of London Special Publications* 42 (1), 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>.

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 (in Russian) [Владимиров В.Г., Кармышева И.В., Яковлев В.А., Травин А.В., Цыганков А.А., Бурмакина Г.Н. Термохронология минглинг-даек Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува): свидетельства развала коллизионной системы на Северо-Западной окраине Тувино-Монгольского массива // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 2. С. 283–310]. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-2-0242>.

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 Science* 405 (8), 1159–1165.

Warr L.N., 2021. IMA–CNMNC Approved Mineral Symbols. *Mineralogical Magazine* 85 (3), 291–320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1

Таблица 1.1. Содержание петрогенных (мас. %) и редких (г/т) элементов в представительных пробах гранитоидов Матутского массива**Table 1.1.** Concentrations of petrogenic (wt. %) and rare elements (ppm) in representative samples of granitoids from the Matut massif

Оксиды и элементы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	K-164	K-165	K-166-2	K-167	K-168	K-172	K-173	K-176	K-177	K-214	K-234	K-283	K-286
SiO ₂	73.45	71.22	75.31	70.16	71.78	70.23	72.89	68.89	70.87	72.87	70.30	70.00	73.44
TiO ₂	0.06	0.27	0.14	0.30	0.25	0.25	0.09	0.30	0.22	0.09	0.28	0.26	0.12
Al ₂ O ₃	14.61	14.17	12.82	15.13	14.25	14.99	14.55	15.15	14.97	12.02	14.68	14.91	13.36
Fe ₂ O ₃ *	1.14	2.84	1.49	3.05	2.29	2.48	1.03	2.81	2.11	1.10	2.91	2.83	1.39
MnO	0.02	0.07	0.04	0.08	0.09	0.10	0.03	0.12	0.08	0.02	0.08	0.09	0.03
MgO	0.08	0.71	0.23	0.71	0.43	0.44	0.19	0.64	0.37	0.10	0.70	0.59	0.14
CaO	1.10	2.02	0.67	2.29	0.73	1.38	0.79	1.87	1.13	0.31	1.83	1.63	1.20
Na ₂ O	3.15	3.12	3.05	3.51	3.70	3.69	3.24	4.02	3.59	2.56	3.57	3.38	2.75
K ₂ O	5.51	4.47	5.56	3.96	4.99	5.46	6.15	4.74	5.35	5.56	4.03	5.30	6.12
P ₂ O ₅	0.03	0.11	0.06	0.12	0.09	0.08	0.03	0.15	0.06	0.04	0.13	0.17	0.04
п.п.п.	0.25	0.21	0.40	0.44	0.43	0.40	0.31	0.27	0.49	4.92	0.69	0.50	0.82
Сумма	99.41	99.20	99.78	99.76	99.02	99.52	99.32	98.96	99.24	99.58	99.20	99.66	99.40
Th	-	-	-	-	-	12	-	9	-	-	-	-	-
U	-	-	-	-	-	0.7	-	0.7	-	-	-	-	-
Cs	-	-	-	-	-	0.89	-	0.41	-	-	-	-	-
Rb	-	-	-	-	-	157	-	121	-	-	-	-	-
Ba	-	-	-	-	-	877	-	798	-	-	-	-	-
Sr	-	-	-	-	-	259	-	261	-	-	-	-	-
La	-	-	-	-	-	44	-	53	-	-	-	-	-
Ce	-	-	-	-	-	77	-	88	-	-	-	-	-
Pr	-	-	-	-	-	8.6	-	11.2	-	-	-	-	-
Nd	-	-	-	-	-	30	-	41	-	-	-	-	-
Sm	-	-	-	-	-	5.3	-	7.5	-	-	-	-	-
Eu	-	-	-	-	-	0.84	-	1.02	-	-	-	-	-
Gd	-	-	-	-	-	4.1	-	6.7	-	-	-	-	-
Tb	-	-	-	-	-	0.66	-	1.00	-	-	-	-	-
Dy	-	-	-	-	-	3.9	-	6.0	-	-	-	-	-
Ho	-	-	-	-	-	0.84	-	1.30	-	-	-	-	-
Er	-	-	-	-	-	2.5	-	3.9	-	-	-	-	-
Tm	-	-	-	-	-	0.40	-	0.58	-	-	-	-	-
Yb	-	-	-	-	-	2.6	-	3.7	-	-	-	-	-
Lu	-	-	-	-	-	0.40	-	0.56	-	-	-	-	-
Zr	-	-	-	-	-	213	-	244	-	-	-	-	-
Hf	-	-	-	-	-	5.3	-	6.0	-	-	-	-	-
Ta	-	-	-	-	-	0.28	-	0.37	-	-	-	-	-
Nb	-	-	-	-	-	9.0	-	10.1	-	-	-	-	-

Таблица 1.1 (продолжение)

Table 1.1 (continued)

Оксиды и элементы	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
	К-313	К-313-1	КТ-0994-4	КТ-0998	КТ-1070	КТ-1101	КТ-1112	КТ-1182	КТ-1214-1	КТ-1217	КТ-1256	КТ-1324	Y 065
SiO ₂	69.20	69.84	68.61	76.77	70.59	71.51	75.32	76.38	72.04	68.50	70.37	70.33	76.73
TiO ₂	0.31	0.27	0.33	0.15	0.28	0.45	0.13	0.04	0.22	0.33	0.25	0.28	0.13
Al ₂ O ₃	15.59	14.78	14.80	11.95	14.66	13.55	12.56	12.71	13.47	15.32	14.65	14.48	12.14
Fe ₂ O ₃ *	2.93	2.87	3.18	1.41	2.70	4.11	1.38	0.62	2.15	3.01	2.89	2.74	1.40
MnO	0.10	0.11	0.11	0.02	0.12	0.06	0.03	0.01	0.04	0.09	0.10	0.09	0.02
MgO	0.54	0.79	0.85	0.53	0.61	0.58	0.41	0.06	0.50	0.80	0.72	0.80	0.31
CaO	1.83	1.52	2.19	0.80	1.55	1.99	0.83	0.61	0.94	2.35	2.58	2.06	0.57
Na ₂ O	3.84	3.68	3.87	3.30	3.71	3.21	3.53	3.37	2.76	3.59	3.59	3.21	3.05
K ₂ O	4.86	4.45	4.72	4.52	5.22	3.22	4.49	4.92	6.08	4.52	4.08	4.82	5.21
P ₂ O ₅	0.12	0.08	0.13	0.02	0.11	0.15	0.03	0.01	0.09	0.15	0.10	0.12	0.02
п.п.п.	0.43	0.66	0.50	0.38	0.67	0.31	0.29	0.34	0.52	0.26	0.31	0.24	0.38
Сумма	99.77	99.05	99.29	99.86	100.23	99.14	98.99	99.08	98.81	98.93	99.64	99.16	99.98
Th	-	-	-	-	13.1	13	-	21	-	21	19	29.4	-
U	-	-	-	-	0.54	0.9	-	0.9	-	1.1	1.9	1.69	-
Cs	-	-	-	-	0.39	1.28	-	1.36	-	0.94	0.37	4.78	-
Rb	-	-	-	-	117	124	-	156	-	125	97	156	-
Ba	-	-	-	-	883	974	-	1040	-	881	954	1060	-
Sr	-	-	-	-	262	113	-	322	-	284	351	371	-
La	-	-	-	-	49.8	28	-	45	-	52	43	34.3	-
Ce	-	-	-	-	92.0	56	-	83	-	98	74	63.3	-
Pr	-	-	-	-	11.1	6.1	-	8.8	-	11.4	7.7	6.77	-
Nd	-	-	-	-	40.0	20	-	31	-	41	26	23.0	-
Sm	-	-	-	-	7.06	3.3	-	5.0	-	7.8	4.2	3.61	-
Eu	-	-	-	-	0.96	0.40	-	0.83	-	1.04	0.79	0.84	-
Gd	-	-	-	-	6.48	3.1	-	4.2	-	7.4	3.8	3.32	-
Tb	-	-	-	-	0.91	0.44	-	0.64	-	1.15	0.55	0.52	-
Dy	-	-	-	-	5.57	2.2	-	4.0	-	7.3	3.3	2.26	-
Ho	-	-	-	-	1.16	0.43	-	0.82	-	1.44	0.72	0.55	-
Er	-	-	-	-	3.34	1.1	-	2.5	-	4.4	2.1	1.72	-
Tm	-	-	-	-	0.53	0.17	-	0.41	-	0.65	0.36	0.32	-
Yb	-	-	-	-	3.45	1.2	-	2.6	-	4.5	2.3	2.25	-
Lu	-	-	-	-	0.51	0.18	-	0.39	-	0.67	0.36	0.34	-
Zr	-	-	-	-	273	70	-	229	-	204	182	160	-
Hf	-	-	-	-	7.59	2.4	-	6.0	-	5.4	5.0	4.47	-
Ta	-	-	-	-	0.40	0.33	-	0.57	-	0.56	0.52	0.71	-
Nb	-	-	-	-	10.9	6.2	-	12.8	-	13.2	8.9	12.8	-

Таблица 1.2. Результаты U/Pb изотопных исследований циркона гранитоидов Матутского массива методом LA-ICP-MS
Table 1.2. Results of U/Pb analysis (LA-ICP-MS) of zircons from the Matut massif granitoids

№ точки	²⁰⁶ Pb, г/г	U, г/г	Th/U	Изотопные отношения						Rho	Возраст, млн лет						D, %
				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1s, %	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1s, %	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1s, %		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	2s	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	2s	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	2s	
Проба КТ-1324																	
1	67	887	0.80	0.05825	2.1	0.67540	2.0	0.08421	1.8	0.90	539	93	524	17	521	18	0.5
2	68	893	1.28	0.05805	2.0	0.67296	2.0	0.08419	1.8	0.94	531	89	523	16	521	18	0.3
3	62	823	0.83	0.05816	2.1	0.67603	2.0	0.08442	1.8	0.93	535	90	524	16	522	18	0.4
4	48	627	0.60	0.05807	2.0	0.67425	2.0	0.08434	1.8	0.93	532	89	523	16	522	18	0.3
5	63	832	0.63	0.05816	2.0	0.67483	1.9	0.08427	1.8	0.95	535	88	524	16	522	18	0.4
6*	31	449	0.54	0.05782	2.2	0.61654	2.1	0.07745	1.9	0.88	523	95	488	16	481	17	1.4
7	69	942	0.73	0.05805	2.0	0.67409	2.0	0.08434	1.8	0.94	531	89	523	16	522	18	0.2
8	78	1040	0.69	0.05794	2.0	0.66628	2.0	0.08352	1.8	0.95	527	88	518	16	517	18	0.3
9	71	934	0.59	0.05782	2.0	0.67256	1.9	0.08448	1.8	0.95	523	88	522	16	523	18	-0.1
10	46	602	0.72	0.05812	2.2	0.67524	2.1	0.08439	1.9	0.87	534	96	524	17	522	19	0.3
11*	31	443	0.62	0.05978	2.2	0.64739	2.2	0.07866	1.9	0.87	595	96	507	17	488	18	3.9
12	34	448	0.71	0.05799	2.1	0.67270	2.1	0.08426	1.9	0.89	529	93	522	17	522	19	0.2
13	27	361	0.89	0.05788	2.2	0.67264	2.1	0.08441	1.9	0.88	525	95	522	17	522	19	0.0
14	52	697	0.79	0.05801	2.5	0.67707	2.4	0.08478	1.9	0.78	530	109	525	20	525	19	0.1
15*	80	1129	0.61	0.05913	2.1	0.63765	2.0	0.07832	1.9	0.92	572	89	501	16	486	17	3.0
16	45	591	0.99	0.05760	2.1	0.66500	2.0	0.08386	1.9	0.92	514	91	518	16	519	19	-0.3
17	63	824	1.08	0.05806	2.1	0.67861	2.0	0.0849	1.8	0.92	532	90	526	16	525	19	0.1
18	36	475	0.75	0.05808	2.2	0.67907	2.1	0.08492	1.9	0.89	532	94	526	17	525	19	0.2
19	45	593	0.56	0.05798	2.1	0.67577	2.0	0.08466	1.9	0.92	529	92	524	17	524	19	0.1
20	100	1315	1.22	0.05824	2.1	0.67862	2.0	0.08464	1.9	0.93	538	90	526	16	524	19	0.4
21	57	765	0.79	0.05787	2.1	0.67455	2.1	0.08467	1.9	0.91	525	92	524	17	524	19	-0.1
22	72	950	0.62	0.05799	2.1	0.67089	2.0	0.08404	1.9	0.91	529	91	521	17	520	19	0.2
23	51	674	0.71	0.05878	2.2	0.67997	2.1	0.08402	1.9	0.90	559	93	527	17	520	19	1.3
24	34	459	0.87	0.05792	2.3	0.67359	2.2	0.08447	1.9	0.86	526	98	523	18	523	19	0.0
25	60	785	0.49	0.05900	2.1	0.69622	2.0	0.08571	1.9	0.92	567	90	537	17	530	19	1.2
26	54	701	0.52	0.05920	2.1	0.70355	2.0	0.08633	1.9	0.91	574	90	541	17	534	19	1.3
27*	38	532	1.34	0.05898	2.2	0.63923	2.1	0.07872	1.9	0.89	566	92	502	17	489	18	2.7
28*	119	1743	0.43	0.06142	2.1	0.64239	2.0	0.07597	1.9	0.93	654	88	504	16	472	17	6.7
29	31	412	0.85	0.05803	2.3	0.66990	2.2	0.08386	1.9	0.85	530	99	521	18	519	19	0.3
30	55	727	0.66	0.05771	2.2	0.67081	2.1	0.08443	1.9	0.88	519	96	521	17	523	19	-0.2
Проба КТ-1070																	
1	58	638	0.89	0.05725	2.0	0.66633	1.9	0.08432	1.6	0.85	501	90	519	15	522	16	-0.7
2	71	783	0.55	0.05900	2.1	0.68488	2.0	0.08422	1.6	0.82	567	89	530	16	521	16	1.6
3	124	1347	2.41	0.06256	2.0	0.72744	1.8	0.08582	1.6	0.89	693	84	555	16	531	17	4.6
4	74	813	0.76	0.05768	2.0	0.66703	1.9	0.08457	1.6	0.85	517	89	519	16	523	16	-0.9
5	69	765	0.99	0.05892	2.0	0.68928	1.9	0.08424	1.6	0.85	564	88	532	16	521	16	2.1
6	64	716	0.85	0.05774	2.2	0.66660	2.2	0.08379	1.6	0.75	520	95	519	18	519	16	0.0
7	69	773	0.72	0.05778	2.1	0.66790	2.0	0.08405	1.6	0.80	521	92	519	17	520	16	-0.2
8	37	435	1.48	0.06031	2.3	0.65026	2.3	0.07942	1.7	0.71	615	96	509	19	493	16	3.2

Таблица 1.2 (продолжение)
Table 1.2 (continued)

№ точки	²⁰⁶ Pb, г/т	U, г/т	Th/U	Изотопные отношения						Rho	Возраст, млн лет						D, %
				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1s, %	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1s, %	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1s, %		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	2s	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	2s	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	2s	
9	71	794	0.91	0.05771	2.1	0.66974	2.1	0.08393	1.6	0.80	518	92	521	17	520	16	0.2
10	28	313	0.92	0.05808	2.2	0.66716	2.3	0.08398	1.7	0.74	533	97	519	18	520	17	-0.2
11	63	717	0.74	0.05769	2.0	0.66635	1.9	0.08362	1.7	0.85	518	89	519	16	518	16	0.2
12	37	415	1.70	0.05761	2.2	0.66872	2.2	0.08463	1.7	0.74	515	96	520	18	524	17	-0.7
13	72	807	0.75	0.05782	2.1	0.67000	2.0	0.08448	1.7	0.85	523	89	521	16	523	17	-0.4
14	32	361	1.23	0.05799	2.1	0.66577	2.1	0.08396	1.7	0.79	529	93	518	17	520	17	-0.3
15	36	405	0.81	0.05783	2.2	0.66921	2.2	0.08387	1.7	0.77	523	94	520	18	519	17	0.2
16	71	806	0.79	0.05768	2.0	0.66624	1.9	0.08385	1.7	0.85	517	89	518	16	519	17	-0.1
17	55	617	1.85	0.05831	2.2	0.68620	2.2	0.08519	1.7	0.77	541	95	531	18	527	17	0.7
18	69	838	0.25	0.05837	2.1	0.62225	2.0	0.07888	1.7	0.84	544	89	491	15	489	16	0.4
19	17	184	0.77	0.05764	2.5	0.68236	2.8	0.08546	1.7	0.61	516	110	528	23	529	17	-0.1
20	18	206	1.29	0.05824	2.4	0.66720	2.5	0.08355	1.7	0.67	538	103	519	21	517	17	0.3
21	33	384	0.72	0.05772	2.2	0.66961	2.2	0.08355	1.7	0.77	519	95	521	18	517	17	0.6
22	9	107	1.08	0.05791	3.0	0.67231	3.6	0.08393	1.8	0.50	526	131	522	29	520	18	0.5
23	32	365	0.82	0.05529	2.2	0.65786	2.3	0.08435	1.7	0.74	424	97	513	19	522	17	-1.7
24	50	582	0.86	0.05779	2.4	0.68750	2.6	0.08277	1.7	0.66	521	104	531	22	513	17	3.6
25	51	587	0.64	0.05769	2.2	0.66516	2.2	0.08420	1.7	0.77	518	94	518	18	521	17	-0.6
26	34	396	1.02	0.05986	2.2	0.68032	2.2	0.08277	1.7	0.76	599	93	527	18	513	17	2.8
27	7	87	1.82	0.05749	3.2	0.68126	3.9	0.08083	1.8	0.47	510	140	528	32	501	18	5.3
28	39	460	0.92	0.05751	2.1	0.66420	2.1	0.08212	1.7	0.79	511	94	517	17	509	17	1.7
29	36	422	1.27	0.05774	2.1	0.66901	2.2	0.08366	1.7	0.79	520	93	520	18	518	17	0.4
30	37	422	0.64	0.05771	2.3	0.67885	2.4	0.08483	1.7	0.72	519	99	526	20	525	17	0.2
31	35	405	1.26	0.05786	2.2	0.66930	2.3	0.08430	1.7	0.73	524	98	520	19	522	17	-0.3
32	73	853	0.81	0.05772	2.1	0.67038	2.1	0.08410	1.7	0.80	519	93	521	17	521	17	0.1
33	37	430	0.84	0.05776	2.2	0.67317	2.3	0.08391	1.7	0.75	521	97	523	19	519	17	0.6
34	57	667	0.81	0.06098	2.1	0.72273	2.2	0.08342	1.7	0.80	639	91	552	18	517	17	6.9
35	21	248	0.74	0.05762	2.7	0.67302	3.1	0.08320	1.8	0.58	515	116	523	25	515	18	1.4
36	57	666	0.92	0.05789	2.2	0.67200	2.3	0.08463	1.7	0.75	525	97	522	19	524	17	-0.3
37	16	189	1.65	0.05772	2.5	0.66492	2.7	0.08468	1.8	0.64	519	108	518	22	524	18	-1.2
38	13	150	1.21	0.05825	2.5	0.66433	2.8	0.08319	1.8	0.64	538	110	517	22	515	18	0.4
39	32	395	0.61	0.05747	2.3	0.65380	2.4	0.08072	1.7	0.73	509	99	511	19	500	17	2.1
40	49	571	0.73	0.05764	2.2	0.67881	2.3	0.08533	1.7	0.77	516	95	526	19	528	18	-0.3
41	32	360	0.66	0.05865	2.3	0.71579	2.5	0.08807	1.8	0.71	554	100	548	21	544	18	0.8
42	28	332	1.93	0.05779	2.5	0.67658	2.8	0.08393	1.8	0.65	522	108	525	23	520	18	1.0
43	47	564	0.91	0.05777	2.4	0.67298	2.6	0.08438	1.8	0.68	521	104	523	21	522	18	0.1
44	49	565	0.76	0.05846	2.2	0.71382	2.3	0.08766	1.8	0.76	547	95	547	20	542	18	1.0

Примечание. Погрешности возраста приводятся на уровне 2σ. Rho – коэффициент корреляции ошибок отношений ²⁰⁷Pb/²³⁵U и ²⁰⁶Pb/²³⁸U, D – дискордантность. * – номера точек, данные по которым не использованы при расчете средневзвешенного возраста.

Note. Aging errors are at the 2σ level. Rho – coefficient of ²⁰⁶Pb/²³⁸U and ²⁰⁷Pb/²³⁵U ratio error correlations. D – discordance. * – point numbers not used in calculating weight average age.