

СОСТАВ И U-Pb (LA-ICP-MS) ИЗОТОПНЫЙ ВОЗРАСТ ЦИРКОНОВ КОМБИНИРОВАННЫХ ДАЕК ЗАПАДНОГО САНГИЛЕНА (Тувино-Монгольский массив)

А.А. Цыганков^{1,2}, Г.Н. Бурмакина¹, В.А. Яковлев^{3,4}, В.Б. Хубанов^{1,2},
В.Г. Владимиров^{3,4}, И.В. Кармышева^{3,4}, М.Д. Буянтуев¹

¹Геологический институт СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, ба, Россия

²Бурятский государственный университет, 670000, Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а, Россия

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

⁴Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

Комбинированные дайки (минглинг-дайки) Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува) рассматриваются в качестве индикаторов смены тектонического режима сжатия, связанного с формированием горно-складчатой системы, постколлизийным растяжением, завершившимся развалом коллизийного орогена. Вместе с тем положение комбинированных даек в общей последовательности магматических событий основывалось лишь на их геологическом положении, но не было подтверждено U/Pb изотопно-геохронологическими определениями. Нами изучено геологическое строение, вещественный состав и установлен U-Pb изотопный возраст разнотипных комбинированных даек Западного Сангилен, составляющий 485—490 млн лет. Вмещающие граниты Матутского массива имеют изотопный возраст 509 млн лет, а в цирконах из гнейсогранитов эрзинского метаморфического комплекса зафиксированы термальные события рифейского (679—934 млн л. н.) и раннепалеозойского (484 млн л. н.) возраста. Полученные данные согласуются с установленной ранее последовательностью тектонometаморфических событий Западного Сангилен. Базиты изученных комбинированных даек кардинально различаются содержаниями индикаторных элементов (Rb, Nb, Ta, Zr, Hf) и величиной отношений Nb/Y, Zr/Y, Th/Ta, Zr/Nb, Nb/Th, что указывает на разные, вероятно, разноглубинные, мантийные источники. Протолитом салической части комбинированных даек, по-видимому, были породы, близкие по составу к автохтонным и параавтохтонным гнейсогранитам эрзинского метаморфического комплекса.

Комбинированные дайки, минглинг, цирконы, U-Pb изотопный возраст, источники магм, Западный Сангилен.

COMPOSITION AND U-Pb (LA-ICP-MS) ISOTOPIC AGE OF ZIRCONS FROM COMPOSITE DIKES OF WESTERN SANGILEN (*Tuva-Mongolian orogen*)

A.A. Tsygankov, G.N. Burmakina, V.A. Yakovlev, V.B. Khubanov, V.G. Vladimirov,
I.V. Karmysheva, and M.D. Buyantuev

Composite dikes (mingling dikes) of Western Sangilen (southeastern Tuva) are believed to indicate a shift from tectonic contraction, related to the mountain fold system formation, to postcollisional extension that ended with the disintegration of the collisional orogen. However, the position of composite dikes in the general sequence of magmatic events was based only on their geologic location and has not been confirmed by U/Pb isotope-geochronological data. The proposed study is concerned with the geologic structure, composition, and isotopic age (485—490 Ma) of West Sangilen composite dikes. The isotopic age of the host granites from the Matut pluton is 509 Ma; thermal events of Riphean (679—934 Ma) and early Paleozoic (484 Ma) ages are reflected in zircons from gneiss-granites of the Erzin metamorphic complex. The obtained data are consistent with the earlier determined sequences of West Sangilen tectonometamorphic events. Basites from the examined composite dikes are strongly different in the contents of indicator elements (Rb, Nb, Ta, Zr, and Hf) and the Nb/Y, Zr/Y, Th/Ta, Zr/Nb, and Nb/Th ratios, which is indicative of different (probably, different-depth) mantle sources. The protolith of the salic component of the combined dikes might have been rocks similar in composition to the autochthonous/parautochthonous gneiss-granites of the Erzin metamorphic complex.

Composite dikes, mingling, zircons, U-Pb isotopic age, magma sources, Western Sangilen

ВВЕДЕНИЕ

Смешение контрастных магм как петрологический процесс, ответственный за образование определенных типов горных пород, известен уже более 100 лет (см. обзор в [Didier, Barbarin, 1991]). Вместе с тем его геологическое значение, механизмы реализации, масштабы и индикаторная роль стали выяс-

няться лишь в последние десятилетия. Комбинированные габбро-гранитные интрузии (минглинг-дайки) как одна из форм проявления процессов смешения магм являются прямым и наиболее очевидным геологическим свидетельством сосуществования очагов базитовых (мантийных) и салических (коровых) магм и их активного взаимодействия. Наличие таких свидетельств является весомым аргументом в обосновании важной, а в ряде случаев ключевой роли процессов мантийного магматизма в формировании крупных гранитоидных батолитов и целых гранитоидных провинций [Didier, Barbarin, 1991; Литвиновский и др., 1993; Kemp, Hawkesworth, 2003; Bonin, 2004]. Кроме того, минглинг-дайки являются индикаторами смены обстановки коллизионного сжатия постколлизионным растяжением, что делает их важным «репером» в реконструкции истории развития складчатых областей.

Одним из регионов, где комбинированные габбро-гранитные интрузии развиты необычайно широко, является Западный Сангилен (Юго-Восточная Тува) [Karmysheva et al., 2015; Владимиров и др., 2017; и др.]. Хронология раннепалеозойских тектонических, магматических и метаморфических событий Западного Сангилена (северо-западный фланг Тувино-Монгольского массива) реконструирована достаточно детально [Козаков и др., 1999а, б, 2001; Изох и др., 2001а, б; Владимиров и др., 2005, 2017; Шелепаев, 2006; Кармышева, 2012; Травин, 2016; и др.]. Согласно многочисленным изотопно-геохронологическим определениям, тектономагматические коллизионные события региона охватывали длительный период начиная с раннего кембрия до позднего ордовика. Комбинированные габбро-гранитные интрузии*, широко развитые в Эрзинской тектонической зоне Западного Сангилена (рис. 1), рассматриваются в качестве индикаторов постколлизионных тектономагматических событий [Владимиров и др., 2017]. Вместе с тем положение комбинированных даек в общей последовательности магматических событий до сих пор основывалось лишь на их геологическом положении, но не было подтверждено U/Pb изотопно-геохронологическими определениями. Учитывая полистадийность формирования тектонических структур, магматизма и метаморфизма региона, задача изотопного датирования комбинированных габбро-гранитных интрузий представляется особенно актуальной. Это касается как петрологических аспектов формирования комбинированных интрузий, так и реконструкций коллизионных событий региона.

В настоящей работе авторами проведены U-Pb изотопно-геохронологические и петрогеохимические исследования двух даек, различающихся структурно-геологическим положением и внутренним строением. Особенностью работы является U-Pb изотопное датирование всех компонентов минглинг-даек, включая вмещающие породы, а также минералого-петрографическая и геохимическая характеристики рассматриваемых образований.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ

Тектоническая природа горно-складчатого сооружения Западного Сангилена (Юго-Восточная Тува) дискуссионна и неоднократно обсуждалась [Ильин и др., 1963; Лепезин, 1978; Митрофанов и др., 1981; Гоникберг, 1997; Владимиров и др., 2000; Пономарева и др., 2001; Козаков и др., 2001; Кузьмичев, 2004; Владимиров и др., 2005, 2017; и др.]. Одним из наиболее распространенных взглядов является представление о Западном Сангилене как о фрагменте коллизионной орогенной структуры в краевой части раннедокембрийского Тувино-Монгольского массива Центрально-Азиатского складчатого пояса [Kuz'michev et al., 2001; Кузьмичев, 2004; Владимиров и др., 2005; и др.]. Основанием для этого, в первую очередь, служат многочисленные изотопно-геохронологические данные [Владимиров и др., 2017], указывающие на отсутствие датировок древнее 570 млн лет. Исключением являются единичные изотопные определения 740, 1815—1859 млн лет, полученные И.К. Козаковым (U/Pb, циркон [Козаков и др., 2001]) при анализе ядер цирконов либо монокристаллов без зональности и рассматриваемые авторами данной работы как захваченные расплавом ксеногенные кристаллы.

В эволюции коллизионных структур Западного Сангилена следует выделить возрастной рубеж 495 млн лет, когда, согласно существующим представлениям [Владимиров и др., 2017], произошла коренная смена тектонических обстановок от синколлизионного сжатия к постколлизионному растяжению. Наиболее ярким и информативным индикатором этих событий могут служить минглинг-дайки, широко распространенные в Эрзинской тектонической зоне [Karmysheva et al., 2015; Владимиров и др., 2017].

В рамках данной работы изучены комбинированные габбро-гранитные дайки двух опорных участков (Тавыт-Даг и Сайзырал), различающиеся структурно-геологическим положением и внутренним строением, но расположенные в одной и той же Эрзинской тектонической зоне (см. рис. 1).

Участок Сайзырал (рис. 1, 2, а, б). Комбинированная габбро-гранитная дайка участка Сайзырал (условно назовем ее дайкой 1-го типа) расположена в южном обрамлении Матутского гранитоидного массива (см. рис. 1), прорывая биотитовые гранитогнейсы эрзинского метаморфического комплекса [Karmysheva et al., 2015]. Субширотная ориентировка минглинг-дайки практически совпадает с гнейсо-

* Комбинированные габбро-гранитные интрузии (комбинированные, минглинг- или композитные дайки) — это магматические тела, формирующиеся при механическом смешении контрастных по составу магм (расплавов).

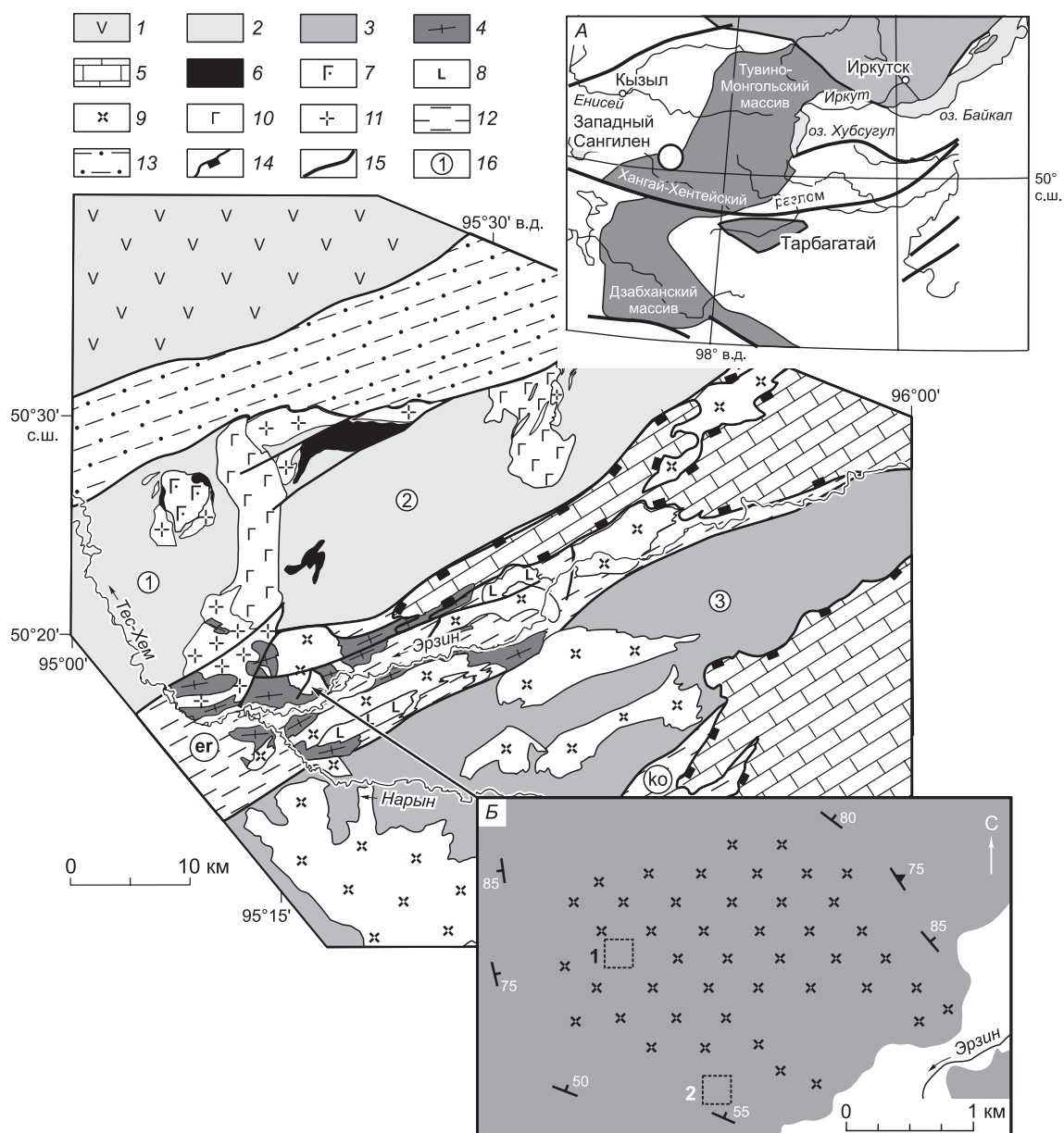


Рис. 1. Геологическая схема Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува) [Кармышева и др., 2017].

1 — образования Таннуольской островной дуги; метаморфические комплексы (2—4): 2 — моренский, 3 — нижнеэрзинский, 4 — эрзинский мигматит-гранитный; 5 — карбонатно-терригенный чехол (сангиленская серия); магматические комплексы и серии (6—9): 6 — актовракский дунит-гарцбургитовый комплекс, 7 — правотарлашкинский анортозит-габброноритовый комплекс, 8 — габброиды и 9 — гранитоиды баянкольского габбро-монцодиорит-гранодиорит-гранитного комплекса, 10 — габброиды и 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: 1 — Тарлашкинский, 2 — Мугуро-Чинчилгиский, 3 — Эрзин-Нарынский. Врезки: А — положение Западного Сангилен в структурах южного обрамления Сибирской платформы, по [Кузьмичев, 2004]; Б — геологическая позиция комбинированных даек (1 — участок Тавыт-Даг, 2 — участок Сайзырал).

видностью во вмещающих породах — простирание северо-восток—восточное, угол падения варьирует от 40 до 80°. Мощность дайки непостоянна и изменяется от 0.5 до 5.0 м при ее видимой протяженности в плане не менее 30 м.

Значительные вариации мощности минглинг-дайки отражаются на ее внутреннем строении. На участках с минимальной мощностью преобладает мафическая составляющая, а гранитоиды выполняют мелкие прожилки. Здесь же в непосредственной близости от комбинированной дайки во вмещающих метаморфических породах отмечена дайка лейкократовых гранитов мощностью до 0.5 м, которая по

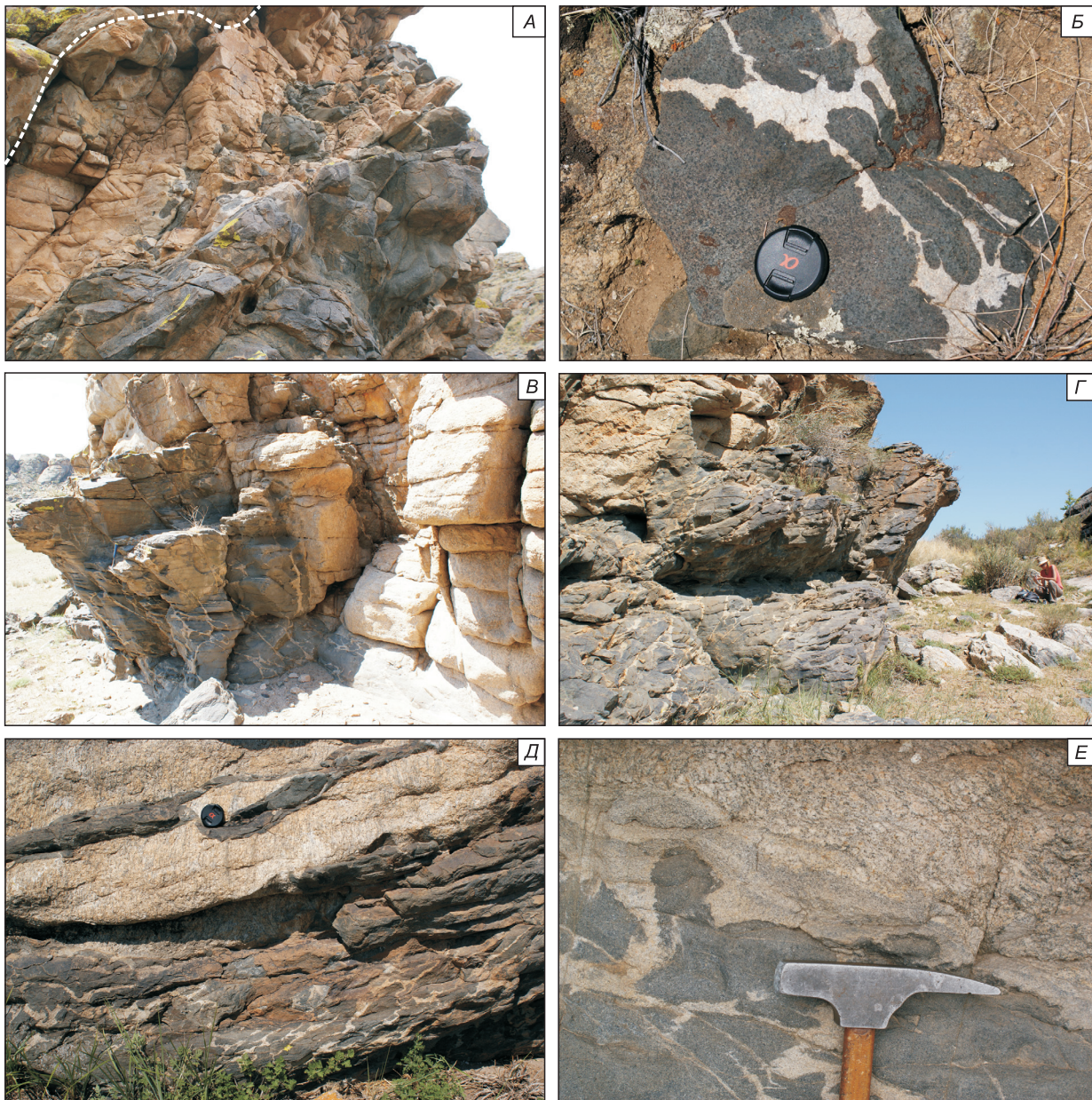


Рис. 2. Детали внутреннего строения комбинированных даек (темный цвет — базитовая, светлый цвет — салическая составляющие).

Участок Сайзырал: *А* — общий вид обнажения (положение контакта дайки с вмещающими плагитогнейсами показано штриховой линией), краевая часть дайки салическая (лейкогранитная), центральная — существенно базитовая, наиболее типичные минглинг-структуры (округлые нодулы в лейкогранитном «цементе» в зоне перехода от базитовой части к салической (центральная часть рисунка), высота обнажения около 3 м; *Б* — наиболее типичные текстуры минглинга (участок Сайзырал) — округлые, вытянутые базитовые (темное) нодулы с фестончатыми краями «сцементированные» лейкогранитным материалом. Участок Тавыт-Даг: *В*, *Г* — сечение комбинированной дайки, внутренняя сетчатая структура сформирована тонкой сетью лейкогранитных «прожилков»; *Д* — базитовая апофиза в гнейсовидных гранитах Матутского массива, контакт дайки и ее апофизы почти под прямым углом срезает гнейсовидность вмещающих пород; *Е* — гибридная зона на контакте комбинированной дайки с вмещающими породами. Остальные поясн. см. в тексте.

простирацию «врезается» в комбинированную дайку. Осевая часть комбинированной дайки, составляющая не менее 2/3 ее общего объема, на 90 % сложена базитовым материалом, пронизанным лейкогранитными прожилками (см. рис. 2, *А*). Краевые зоны дайки (мощностью до 0.5 м) салические, сложены лейкократовыми гранитами. Типичные минглинг-структуры (см. рис. 2, *Б*) характерны для зоны перехода от центральной базитовой части к салической. Она насыщена включениями базитовых обособле-

ний. Их количество и размеры уменьшаются в сторону контакта с вмещающими метаморфическими породами. Контакт с последними резкий, секущий гнейсовидность. Базитовые глобулы имеют преимущественно удлиненно-овальную форму, типичны фестончатые края, иногда наблюдается отчетливое уменьшение зернистости базитов в контакте с лейкогранитами.

Между салической и базитовой составляющими дайки наблюдаются зоны гибридации, представляющие собой более меланократовые (по сравнению с лейкогранитами салической части дайки) мелкозернистые граниты с мелкими базитовыми включениями, обогащенные фемическими минералами (Amph, Vt). Такие образования, по-видимому, могут быть результатом химического взаимодействия контрастных по составу магм.

Участок Тавыт-Даг. Комбинированная дайка рассматриваемого участка (назовем ее дайкой 2-го типа) располагается в эндоконтактной зоне на западе Матутского гранитоидного массива (см. рис. 1). Это крутопадающая дайка (см. рис. 2, В, Г) субширотного простирания протяженностью около 14 м при мощности 4.5—5.0 м.

Комбинированная дайка на 90—95 % сложена базитовым материалом, пронизанным тонкими субпараллельными гранитоидными прожилками (см. рис. 2, В, Г). В поперечном вертикальном сечении дайки можно видеть «сетчатую структуру», отвечающую сдвиговой трещинной системе растяжения (см. рис. 2, В, Г) [Яковлев и др., 2016]. Иногда от основного тела дайки отходят субпараллельные базитовые апофизы мощностью до 5—10 см и протяженностью в несколько метров (см. рис. 2, Д). В отличие от дайки 1-го типа, краевые салические зоны развиты не повсеместно, а их мощность не превышает 10—15 см (см. рис. 2, Е). В отличие от лейкогранитов внутренней части дайки, приконтактные салические зоны более меланократовые, иногда в них наблюдаются текстуры течения — чередование тонких полос разной меланократовости (см. рис. 2, Е). Можно предположить, что лейкократовые «полосы» отвечают лейкогранитам внутренних частей дайки, а более меланократовые представляют собой продукт приконтактного плавления вмещающих гранитов и взаимодействия новообразованного расплава с базитами комбинированной дайки.

МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРОД

Базиты комбинированных даек сложены плагиоклазом, амфиболом и биотитом с подчиненным количеством кварца и калиевого полевого шпата, а также аксессуарными титанитом, ильменитом, магнетитом, апатитом и цирконом. Химический состав базитов варьирует от амфиболовых габбро до амфиболовых монцогаббро-диоритов. Структура пород неясно-порфировидная. Относительно крупные лейсты плагиоклаза находятся в аллотриоморфно-зернистой основной массе. Очень характерны изометричные скопления мелких зерен амфибола, окруженные биотитовой каймой, а также крупные округлые зерна кварца, окруженные мелкими зернами амфибола. Подобные структуры макроскопически придают породе порфировидный облик. На контакте с лейкогранитами салической части дайки в базитах концентрируются лейсты биотита, а содержание амфибола вблизи контакта уменьшается, вплоть до его полного исчезновения. При этом дайка участка Тавыт-Даг (2-й тип) характеризуется большим содержанием амфибола относительно биотита, а для дайки Сайзырал (1-й тип) очень типичен интерстициальный кварц, содержащий массу включений биотита и полевых шпатов.

Салическая часть обеих даек представлена биотитовыми лейкогранитами, при этом в дайке участка Тавыт-Даг плагиоклаз резко преобладает над калиевым полевым шпатом, тогда как в дайке участка Сайзырал соотношения обратные. В обоих случаях единственным темнокротовым минералом является биотит. Лейкограниты из дайки участка Тавыт-Даг заметно более крупнозернистые и содержат меньше кварца по сравнению с дайкой 1-го типа. Набор аксессуарных минералов почти такой же, как и в базитах (Ttn, Mt, Ap, Zrn).

Вмещающие породы на участке Сайзырал — это автохтонные биотитовые гнейсограниты эрзинского метаморфического комплекса, характеризующиеся почти полным отсутствием калиевого полевого шпата и гнездово-струйчатым расположением биотита, определяющим гнейсовидную текстуру пород. В небольшом количестве присутствует мусковит, содержание рудных минералов и титанита минимально.

На участке Тавыт-Даг (дайка 2-го типа) вмещающими породами являются гранитоиды Матутского массива. Они представляют собой порфировидные (Kfs) биотит-амфиболовые граниты, в которых пертитовый калиевый полевой шпат резко преобладает над плагиоклазом. Характерно большое количество апатита и титанита, последний развивается по краям крупных зерен титаномагнетита.

Плагиоклаз. Гистограммы распределения основности плагиоклазов (содержание An компонента) в базитовой и салической составляющих рассматриваемых даек приведены на рис. 3. В дайке 1-го типа состав плагиоклазов в базитах варьирует от 63 до 32 % An и от 56 до 28 % An в дайке 2-го типа, при этом характер распределения существенно отличается. Для дайки участка Сайзырал типично полимодальное распределение с модами 58, 52 и 41 % An, тогда как в дайке участка Тавыт-Даг имеет место один максимум, соответствующий 33—34 % An и слабовыраженный — 37 % An. Салической части

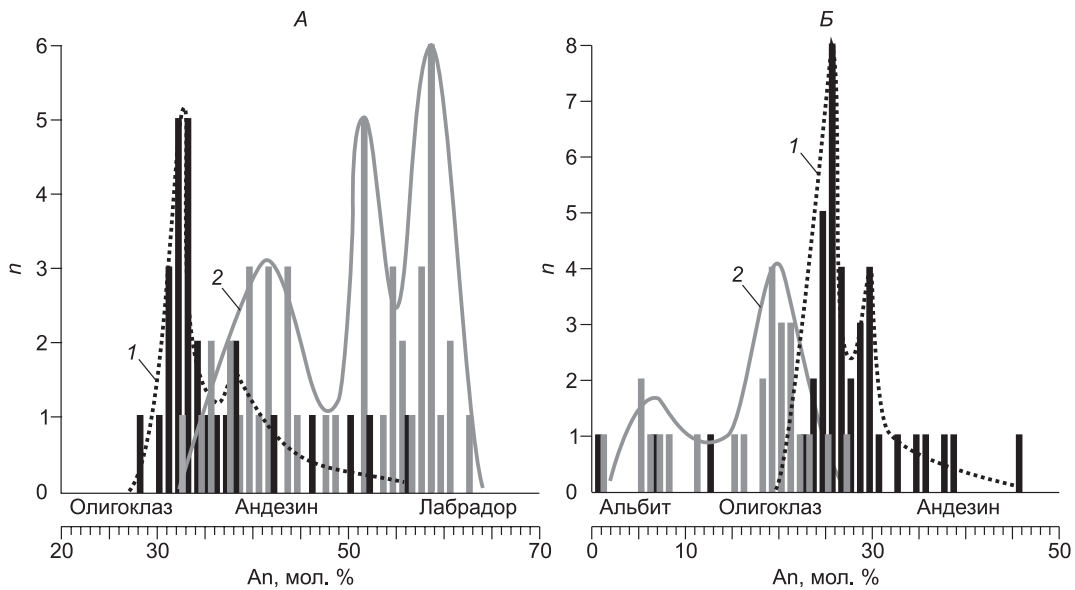


Рис. 3. Гистограммы частоты встречаемости плагиоклазов разного состава в комбинированных дайках Западного Сангиленга:

A — базитовая, *Б* — салическая составляющие. Кривые плотности распределения вероятности: 1 — дайка участка Тавыт-Даг; 2 — дайка участка Сайзырал. Определения состава породообразующих минералов, приведенные на рис. 3—5, выполнены в ГИН СО РАН на растровом электронном микроскопе LEO-1430VP, оснащенный энергодисперсионным спектрометром INCA Energy. Определения выполнялись в полированных шлифах, выбирались наиболее свежие зерна. Для плагиоклазов отдельно анализировались зональные зерна (центр, промежуточная зона, край) и зерна основной массы. Кривые плотности вероятности распределения построены с помощью программы ISOPLOT [Ludwig, 2003].

дайки участка Сайзырал свойствен более кислый плагиоклаз с модами 20 и 7 % An, а в дайке участка Тавыт-Даг — плагиоклаз заметно более основной, с главной модой 26 % и менее выраженной — 30 % An. При этом в отдельных зернах зафиксировано до 45 % An компонента.

Амфибол является породообразующим минералом только для базитовой составляющей даек. В обоих случаях он представлен магниальной роговой обманкой (рис. 4, *A*), однако в дайке участка

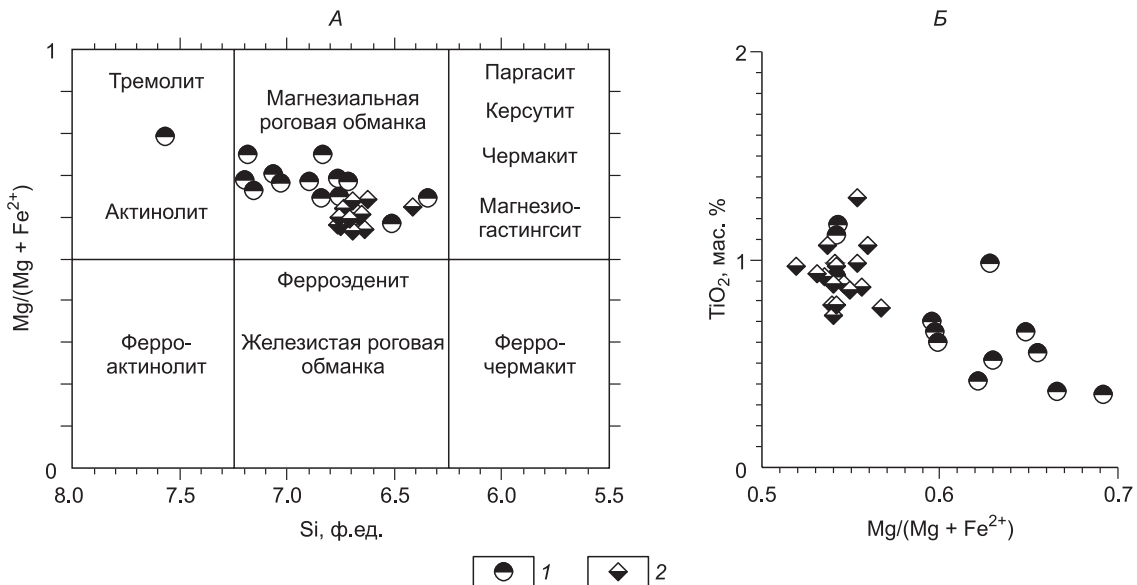


Рис. 4. Положение точек составов амфиболов из базитовой составляющей комбинированных даек на классификационной диаграмме [Leake et al., 1997] (*A*) и диаграмме соотношения TiO_2 — $Mg/(Mg + Fe^{2+})$ (*Б*).

1 — Сайзырал; 2 — Тавыт-Даг.

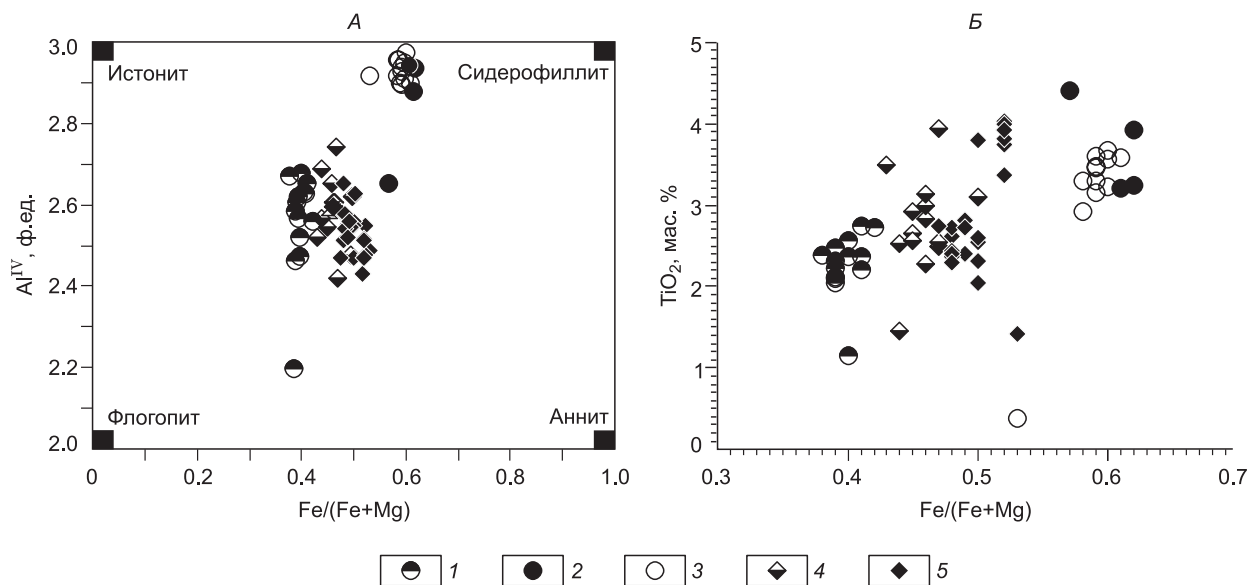


Рис. 5. Положение точек составов биотитов на классификационной диаграмме (А) и на диаграмме соотношения TiO_2 — $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ (Б).

Участок Сайзырал: 1 — базитовая, 2 — салическая составляющие, 3 — вмещающие гнейсоплагиограниты Эрзинской тектонической зоны; участок Тавыт-Даг: 4 — базитовая, 5 — салическая составляющие.

Тавыт-Даг содержание магния ниже ($\text{Mg} \# = 0.52$ — 0.57), а титана выше (0.73 — 1.3 мас. % TiO_2) (см. рис. 4, Б) по сравнению с дайкой участка Сайзырал ($\text{Mg} \# = 0.59$ — 0.74 и 0.35 — 0.98 мас. % TiO_2). На диаграммах (см. рис. 4) они образуют неперекрывающиеся ареалы фигуративных точек.

БИОТИТ является порообразующим минералом как базитовой, так и салической составляющих обеих даек. По составу относится к изоморфному ряду флогопит—аннит (рис. 5, А), содержание TiO_2 варьирует от 2 до 4.5 мас. % (см. рис. 5, Б), в некоторых анализах отмечаются первые десятые доли процента хлора, фтор и барий не обнаружены. Биотит из базитов и гранитоидов даек заметно различается по составу. Так, в дайке 1-го типа магнезиальность биотитов из базитовой части составляет 0.62 — 0.58 , при содержании $\text{TiO}_2 = 2$ — 2.75 мас. %, тогда как в дайке 2-го типа 0.57 — 0.5 и 2.3 — 3.9 % соответственно (см. рис. 5, Б). Не менее контрастны различия состава биотитов из салической части комбинированных даек: участок Сайзырал — $\text{Mg}\# = 0.43$ — 0.38 ; $\text{TiO}_2 = 3.2$ — 4.4 мас. %; участок Тавыт-Даг — $\text{Mg}\# = 0.53$ — 0.48 ; $\text{TiO}_2 = 2$ — 4 мас. %.

ПЕТРОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРОД

Состав пород комбинированных даек и вмещающих образований приведен в табл. 1—3 и показан на рис. 6, 7. Рассматриваемые дайки представляют собой ассоциацию основных (базитовых) и кислых (салических) пород нормального и умеренно-щелочного ряда [Петрографический кодекс..., 2009] без промежуточных разностей между ними (см. рис. 6, А).

Базитовая составляющая комбинированных даек по химическому составу отвечает амфиболовым габбро — амфиболовым монцогаббро-диоритам и монцодиоритам [Петрографический кодекс..., 2009], содержащим 49 — 52 мас. % SiO_2 (см. рис. 6, А). При этом базиты дайки участка Тавыт-Даг более щелочные ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 3.8$ — 6.5 мас. %) и менее магнезиальные ($\text{Mg}\# = 49.5$ — 53.3 мол. %), чем базиты дайки участка Сайзырал ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 2.6$ — 5.9 мас. %; $\text{Mg}\# = 54.8$ — 58.9 мол. %).

Состав салической части даек варьирует от гранитов до лейкогранитов и умеренно-щелочных гранитов. Содержание SiO_2 в салических породах дайки участка Тавыт-Даг составляет 68.1 — 71.8 мас. %, сумма щелочей 5.5 — 6.2 мас. %; в дайке участка Сайзырал соответственно 69.6 — 76.4 и 5.24 — 8.7 мас. %. Следует отметить высокую магнезиальность ($\text{Mg}\#$) салических пород комбинированных даек, варьирующую от 36.9 до 46.1 мол. % (участок Тавыт-Даг) и от 34.2 до 54.7 мол. % (участок Сайзырал). Корреляция SiO_2 и $\text{Mg}\#$ отсутствует, а состав биотита во вмещающих гранитоидных дайках участка Сайзырал практически аналогичен биотиту из салической составляющей дайки. Из этого следует, что высокая и сильно варьирующая магнезиальность салических пород дайки первого типа (участок Сайзырал) обусловлена неоднородностью распределения «реститового» биотита, унаследованного от вмещающих гранитоидных пород.

Таблица 1. Содержание петрогенных (мас. %) и редких (г/т) элементов в базитах комбинированных даек Эрзинской тектонической зоны Западного Сангилен

№ образца	Сайзырал					Тавыт-Даг									
	02/3*	02/6*	02/6a	Y-68-6**	КТ 1000-3**	05/3	05/1	03/3	03/10	03/1b	03/2*	03/4*	Y-69 -12**	Y-69 -7**	Y-69 -4**
SiO ₂	51.10	52.20	51.50	52.19	51.57	49.50	49.50	51.80	51.70	52.0	52.20	53.40	49.82	52.32	53.48
TiO ₂	1.81	1.79	1.74	1.80	1.70	1.47	1.08	1.21	1.33	1.42	1.18	1.08	1.47	1.31	1.19
Al ₂ O ₃	16.50	16.70	16.30	16.48	16.03	15.30	17.40	17.0	16.30	17.10	17.20	16.20	17.87	17.07	17.39
Fe ₂ O ₃ *	9.57	8.51	8.60	9.01	8.94	11.24	9.77	9.69	9.33	9.74	9.4	8.47	10.47	9.45	9.01
MnO	0.17	0.15	0.15	0.16	0.16	0.19	0.16	0.15	0.19	0.19	0.14	0.15	0.17	0.15	0.15
MgO	5.86	5.69	6.22	6.00	6.88	7.86	6.73	5.32	5.27	4.82	4.83	4.88	5.51	5.33	5.01
CaO	8.13	7.72	8.26	8.28	8.70	10.81	8.04	7.53	7.86	7.03	7.87	7.46	8.16	7.53	7.22
Na ₂ O	1.97	2.40	2.80	2.30	3.09	2.62	3.33	3.51	3.63	3.43	3.84	4.15	3.50	3.60	3.58
K ₂ O	2.25	2.30	2.2	2.11	1.90	1.18	2.00	1.93	2.07	2.37	2.12	2.30	2.05	1.96	2.08
P ₂ O ₅	0.72	0.72	0.71	0.74	0.68	0.30	0.23	0.68	0.52	0.61	0.48	0.41	0.61	0.48	0.44
П.п.п.	1.94	1.87	1.92	1.68	1.56	1.75	1.85	1.51	2.56	1.86	1.69	2.41	1.39	0.99	0.98
Сумма	99.40	99.47	99.89	99.27	99.82	99.54	99.41	99.81	100.21	99.95	100.36	100.37	99.74	99.35	99.69
Ba	738	1069	889	678	—	249	444	630	450	583	722	791	554	577	—
Rb	104	117	92	71	—	23	60	40	90	82	46	56	45	49	—
Sr	610	770	544	549	—	544	614	586	530	477	769	788	616	623	—
Ga	20	21	14	—	—	14	16	16	15	16	20	20	—	—	—
Ta	3.32	3.59	1.70	2.9	—	2.00	—	—	—	—	0.66	0.77	0.59	0.51	—
Nb	74.0	74.0	52.0	56	—	12.0	7.0	9.0	10.0	12.0	10.8	11.3	11	9.1	—
Hf	8.7	9.7	10.4	8.0	—	8.1	2.5	6.9	2.8	4.9	3.9	4.4	4.2	3.9	—
Zr	348	383	304	322	—	117	82	154	157	174	150	158	183	169	—
Y	29	32	24	26	—	23	22	27	27	29	29	29	33	29	—
Th	4.8	5.7	3.5	3.9	—	3.8	—	4.6	4.1	3.9	4.0	4.7	2.8	3.2	—
U	2.12	2.40	3.60	1.99	—	3.40	—	11.00	—	3.30	1.89	4.18	3.0	3.9	—
Cr	228	238	—	—	—	—	—	—	—	—	20	99	—	—	—
Ni	47	54	38	—	—	80	84	58	57	45	52	80	—	—	—
Co	71	87	—	—	—	—	—	—	—	—	91	102	—	—	—
V	246	244	—	—	—	—	—	—	—	—	192	188	—	—	—
Cu	111	37	19	—	—	28	27	28	10	11	24	15	—	—	—
Pb	6	6	5	—	—	4	3	4	10	9	8	10	—	—	—
Zn	106	119	67	—	—	72	66	63	74	85	104	97	—	—	—
La	39	43	42	33	—	17	21	43	20	34	33	35	32	31	—
Ce	83	87	71	67	—	54	40	72	77	82	71	73	74	64	—
Pr	10	11	—	8.7	—	—	—	—	—	—	9	9	10.4	9.1	—
Nd	42	43	—	34	—	—	—	—	—	—	39	39	42	36	—
Sm	8.0	8.9	—	7.1	—	—	—	—	—	—	8.1	7.9	8.7	7.2	—
Eu	2.6	2.6	—	1.88	—	—	—	—	—	—	2.3	2.3	2.6	2.0	—
Gd	7.2	7.8	—	6.1	—	—	—	—	—	—	6.9	7.0	7.4	6.6	—
Tb	1.0	1.1	—	0.86	—	—	—	—	—	—	1.0	1.0	1.1	0.91	—
Dy	5.8	6.3	—	4.5	—	—	—	—	—	—	5.6	5.8	6.0	5.4	—
Ho	1.1	1.2	—	0.88	—	—	—	—	—	—	1.1	1.1	1.21	0.95	—
Er	3.3	3.5	—	2.5	—	—	—	—	—	—	3.2	3.2	3.3	2.8	—
Tm	0.4	0.5	—	0.37	—	—	—	—	—	—	0.4	0.5	0.46	0.4	—
Yb	2.7	2.9	—	2.3	—	—	—	—	—	—	2.7	3.0	3.0	2.6	—
Lu	0.4	0.4	—	0.35	—	—	—	—	—	—	0.4	0.4	0.45	0.39	—
(La/Yb) _n	10.3	10.6	—	10.3	—	—	—	—	—	—	8.7	8.5	7.6	8.5	—
Eu/Eu*	1.04	0.94	—	0.85	—	—	—	—	—	—	0.92	0.94	0.97	0.87	—

Примечание. Анализ содержаний петрогенных элементов выполнен методом «мокрой химии» (аналитики Б.Б. Лыгденова, О.В. Корсун, А.А. Цыренова), элементы-примеси методом РФА на спектрометре ARL PERFORM'X (аналитик Б.Ж. Жалсаева) в ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ. (La/Yb)_n — нормировано по хондриту [Sun, McDonough, 1989]; Eu/Eu* = Eu_n/(Sm_n*Gd_n)^{1/2}.

* Элементы-примеси определены методом ICP-MS в ИГХ СО РАН (аналитик Н.Н. Пахомова).

** Петрогенные элементы определены методом РФА (аналитик Л.Д. Холодова), элементы-примеси методом ICP-MS (аналитик И.В. Николаева) в ИГМ СО РАН, г. Новосибирск.

Таблица 2. Содержание петрогенных (мас. %) и редких (г/т) элементов в салической части комбинированных даек Эрзинской тектонической зоны Западного Сангилен

№ образца	Сайзырал										Тавыт-Даг				
	02/2	02/4*	02/4a	02/8	02/7	02/9*	Y-68-3**	Y-68-4**	Y-68	KT1002-4a	KT1002-2**	03/1a	03/8	03/9	Y-69-10**
SiO ₂	74.30	72.50	73.80	73.00	75.00	74.90	76.37	74.97	75.27	72.73	74.56	69.80	68.90	68.10	71.79
TiO ₂	0.22	0.24	0.25	0.26	0.15	0.17	0.21	0.25	0.18	0.28	0.21	0.42	0.46	0.46	0.36
Al ₂ O ₃	13.80	13.70	14.20	14.00	13.50	13.70	13.20	13.55	13.86	13.68	13.68	15.20	15.80	15.60	14.86
Fe ₂ O ₃	1.65	1.78	1.55	1.64	1.07	1.24	1.93	2.20	1.68	2.70	2.01	3.04	2.91	3.15	3.30
MnO	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.05	0.03	0.03	0.03
MgO	0.44	0.84	0.46	1.00	0.45	0.45	0.48	0.44	0.37	0.58	0.51	0.90	1.07	1.36	0.86
CaO	0.72	1.54	0.76	2.41	2.12	1.51	0.84	0.70	1.44	1.35	1.05	3.42	4.26	4.79	3.31
Na ₂ O	3.25	3.81	2.87	3.46	3.43	3.81	3.30	3.16	3.96	2.93	3.16	4.31	4.51	4.75	4.30
K ₂ O	4.37	4.41	3.93	3.43	3.51	2.91	3.79	4.47	2.59	4.76	4.08	1.45	1.17	1.27	1.18
P ₂ O ₅	<0.1	<0.1	0.11	<0.1	<0.1	<0.1	0.05	0.06	0.06	0.10	0.16	0.19	0.15	0.20	0.17
П.п.п.	0.96	1.34	1.34	0.50	0.37	0.75	0.69	0.87	0.86	1.30	1.26	0.07	0.62	0.67	0.85
Сумма	99.67	100.11	99.21	99.62	99.56	99.36	100.33	99.98	99.55	99.35	99.63	99.36	99.72	100.21	100.24
Ba	1154	1247	1240	1778	1097	741	772	999	—	—	1155	364	603	588	629
Rb	99	84	107	61	80	64	81	91	—	—	84	43	31	24	76
Sr	157	190	158	379	248	192	147	155	—	—	212	450	858	888	438
Ga	12	17	14	14	14	17	—	—	—	—	—	15	18	18	—
Ta	2.10	1.01	—	1.30	—	1.68	0.81	0.75	—	—	1.77	1.80	1.11	0.73	1.8
Nb	10.3	12.9	12.8	15.0	13.0	17.0	7.9	9.9	—	—	13.2	15.0	10.5	7.6	30
Hf	4.1	5.7	2.7	2.9	4.9	4.3	4.6	5.6	—	—	4.3	5.8	7.6	6.8	5.3
Zr	142	162	148	114	107	111	137	170	—	—	135	269	285	275	184
Y	57	37	42	32	26	28	55	60	—	—	42	27	25	19	38
Th	22.2	27.0	19.8	19.0	16.0	21.0	21	33	—	—	19.4	15.0	18.0	13.8	11.4
U	3.90	2.40	3.20	2.10	3.60	3.48	2.8	2.4	—	—	3.2	4.10	5.90	1.73	4.0
Cr	—	17	—	—	—	11	—	—	—	—	—	—	17	10	—
Ni	6	7	11	12	3	5	—	—	—	—	—	11	16	11	—
Co	—	3	—	—	—	153	—	—	—	—	—	—	67	87	—
V	—	23	—	—	—	15	—	—	—	—	—	—	52	63	—
Cu	15	6	26	24	13	4	—	—	—	—	—	20	35	7	—
Pb	27	23	20	12	22	22	—	—	—	—	—	15	12	10	—
Zn	51	39	89	54	34	32	—	—	—	—	—	74	33	41	—
La	48	36	36	30	28	20	37	46	—	—	30	44	40	59	28
Ce	83	79	77	68	62	48	70	90	—	—	66	114	119	125	57
Pr	—	9	—	—	—	6	8.4	10.8	—	—	7.1	—	10	12	8.1
Nd	—	35	—	—	—	21	30	39	—	—	26	—	37	40	33
Sm	—	7.7	—	—	—	5.1	6.5	7.8	—	—	5.3	—	7.1	6.4	6.5
Eu	—	0.8	—	—	—	0.5	0.6	0.57	—	—	0.68	—	1.5	1.2	1.32
Gd	—	7.0	—	—	—	4.9	6.8	8.4	—	—	5.6	—	6.2	5.3	6.6
Tb	—	1.1	—	—	—	0.9	1.21	1.32	—	—	0.94	—	0.9	0.7	1.05
Dy	—	7.3	—	—	—	6.0	8.2	8.8	—	—	6.6	—	5.3	4.0	6.0
Ho	—	1.5	—	—	—	1.2	1.78	1.96	—	—	1.38	—	1.0	0.8	1.25
Er	—	4.6	—	—	—	3.9	5.5	5.8	—	—	4.3	—	3.1	2.3	3.6
Tm	—	0.7	—	—	—	0.6	0.91	0.92	—	—	0.68	—	0.5	0.3	0.57
Yb	—	4.7	—	—	—	4.4	5.7	5.6	—	—	4.7	—	2.8	2.1	3.7
Lu	—	0.7	—	—	—	0.6	0.86	0.88	—	—	0.7	—	0.4	0.3	0.57
(La/Yb) _n	—	5.6	—	—	—	3.3	4.7	5.9	—	—	4.6	—	10.4	19.9	5.4
Eu/Eu*	—	0.31	—	—	—	0.33	0.27	0.21	—	—	0.38	—	0.66	0.59	0.61

Таблица 3. Содержание петрогенных (мас. %) и редких (г/т) элементов во вмещающих породах комбинированных даек (эрзинский комплекс, Матутский массив) Эрзинской тектонической зоны Западного Сангилен

№ образца	Сайзырал (эрзинский комплекс)				Тавыт-Даг (Матутский массив)				
	02*	02а*	05/9	КТ-1019-5	03/1а	03а*	03*	03/5	Y-69-5**
SiO ₂	74.80	72.70	74.90	72.25	69.80	70.50	68.60	69.70	69.23
TiO ₂	0.50	0.25	0.17	0.29	0.42	0.26	0.31	0.33	0.41
Al ₂ O ₃	11.80	14.80	13.70	15.24	15.20	14.30	15.20	15.20	15.50
Fe ₂ O ₃	3.71	1.47	1.24	2.62	3.04	2.39	2.80	2.93	3.64
MnO	0.04	0.02	0.02	0.05	0.05	0.05	0.07	0.13	0.05
MgO	1.27	0.78	0.45	0.73	0.90	0.99	0.95	0.86	0.96
CaO	1.58	3.25	1.51	2.86	3.42	2.53	2.50	2.78	2.93
Na ₂ O	2.89	3.57	3.81	3.89	4.31	3.63	3.37	3.68	4.05
K ₂ O	2.32	1.73	2.91	1.97	1.45	5.04	5.11	2.96	2.79
P ₂ O ₅	0.10	0.10	0.10	0.08	0.19	0.12	0.15	0.15	0.21
П.п.п.	0.79	0.60	0.75	0.30	0.70	0.59	0.44	1.05	0.47
Сумма	99.44	99.11	99.39	100.38	99.36	100.30	99.36	99.62	99.96
Ba	461	453	695	—	—	1525	1678	2188	1047
Rb	76	86	76	—	—	105	126	53	53
Sr	172	164	177	—	—	510	526	542	493
Ga	15	15	15	—	—	16	17	15	—
Ta	0.62	0.62	—	—	—	0.93	0.70	—	0.51
Nb	11.0	10.8	16.0	—	—	13.9	13.1	6.3	8.1
Hf	5.1	5.2	3.2	—	—	4.9	5.2	5.5	5.8
Zr	184	183	108	—	—	149	170	165	215
Y	13	16	36	—	—	17	19	10	16.5
Th	6.8	6.6	17.0	—	—	27.0	25.0	20.0	15.9
U	1.06	1.09	4.50	—	—	2.65	1.83	1.80	1.98
Cr	58	56	—	—	—	7	4	—	—
Ni	26	32	7	—	—	6	1	4	—
Co	218	216	—	—	—	103	80	—	—
V	69	69	—	—	—	46	50	—	—
Cu	4	7	19	—	—	2	2	14	—
Pb	14	14	19	—	—	37	37	17	—
Zn	65	65	59	—	—	41	46	50	—
La	24	29	30	—	—	27	33	31	40
Ce	54	58	73	—	—	51	70	73	87
Pr	6	7	—	—	—	6	7	—	7.8
Nd	23	25	—	—	—	21	25	—	26
Sm	4.7	4.9	—	—	—	4.0	4.6	—	4.2
Eu	0.8	0.8	—	—	—	1.0	1.0	—	0.86
Gd	4.1	4.5	—	—	—	3.3	4.0	—	3.7
Tb	0.6	0.6	—	—	—	0.5	0.5	—	0.48
Dy	3.2	3.5	—	—	—	3.3	3.6	—	3.0
Ho	0.5	0.7	—	—	—	0.7	0.7	—	0.57
Er	1.5	1.8	—	—	—	2.2	2.4	—	1.67
Tm	0.2	0.2	—	—	—	0.3	0.4	—	0.25
Yb	1.4	1.6	—	—	—	2.4	2.7	—	1.76
Lu	0.2	0.2	—	—	—	0.4	0.4	—	0.27
(La/Yb) _n	12.4	13.2	—	—	—	8.1	8.7	—	16.3
Eu/Eu*	0.56	0.50	—	—	—	0.77	0.69	—	0.65

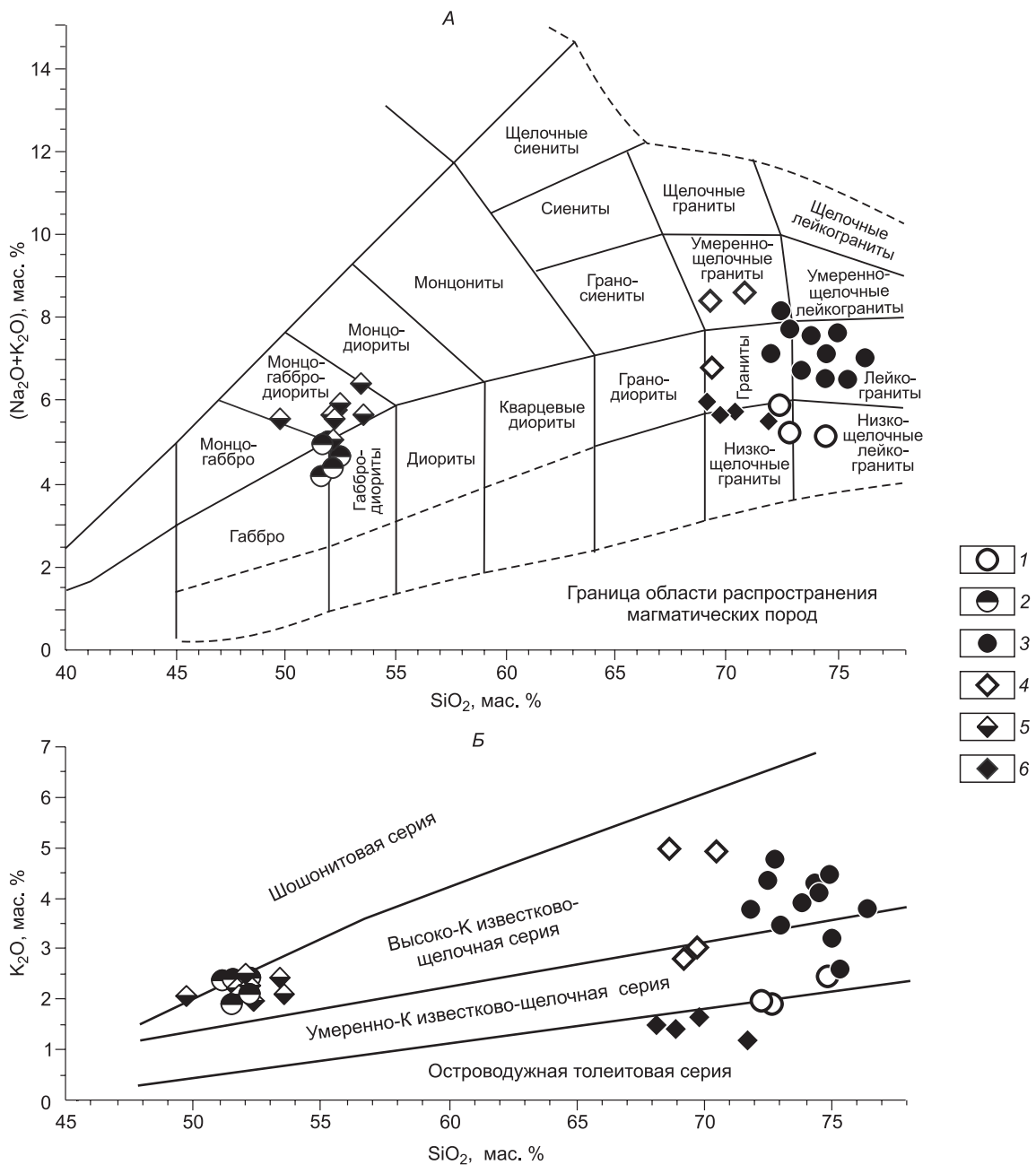


Рис. 6. TAS-диаграмма (SiO_2 — $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$) [Петрографический кодекс..., 2009] (А) и диаграмма K_2O — SiO_2 (границы полей, по [Rickwood, 1989]) (Б) для пород комбинированных даек Западного Сангилен и вмещающих образований.

Участок Сайзырал: 1 — вмещающие гнейсоплагииграниты Эрзинской тектонической зоны, 2 — базитовая, 3 — салическая составляющие комбинированной дайки; участок Тавыт-Даг: 4 — граниты Матутского массива, 5 — базитовая, 6 — салическая составляющие комбинированной дайки.

На диаграмме с MALI [Frost et al., 2001] базиты дайки Сайзырал лежат в поле известково-щелочных пород, базиты дайки Тавыт-Даг — переходные от известково-щелочных к щелочно-известковым. Салические разности дайки участка Тавыт-Даг известковые, а дайки участка Сайзырал — варьируют от известковых до известково-щелочных.

Базиты комбинированных даек характеризуются повышенной калиевой щелочностью, занимая на диаграмме K_2O — SiO_2 [Rickwood, 1989] поле высококалийной известково-щелочной серии (см. рис. 6, Б), при этом отношение $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ варьирует в диапазоне 0.45—0.95 в дайке участка Тавыт-Даг и от 0.33 до 1.14 в дайке участка Сайзырал.

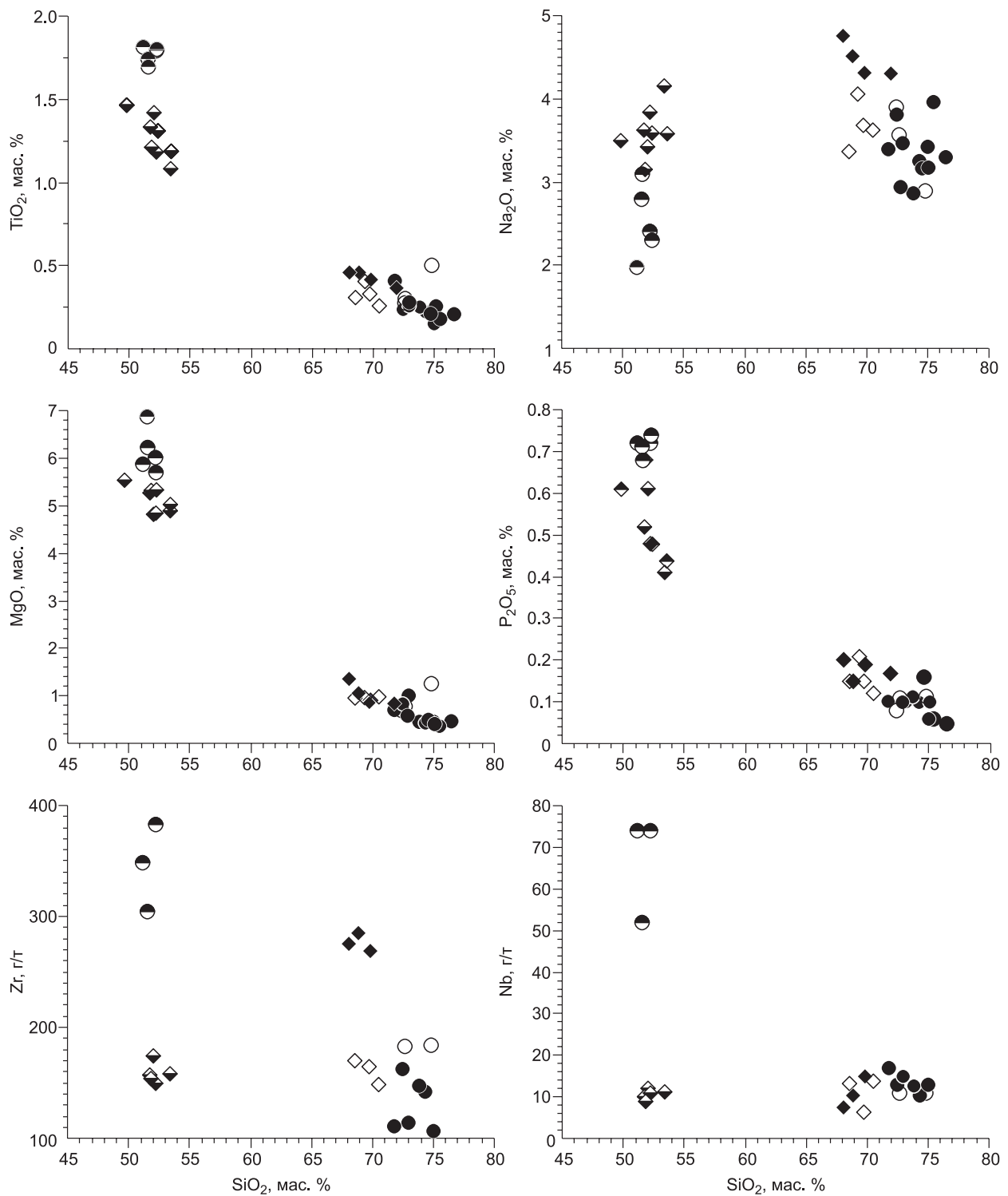


Рис. 7. Соотношение некоторых породообразующих оксидов (TiO_2 , Na_2O , MgO , P_2O_5 , и элементов примесей (Zr , Nb) с кремнеземом (SiO_2) в породах комбинированных даек и вмещающих образованиях Западного Сангилены.

Усл. обозн. см. рис. 6.

Салические породы дайки 1-го типа в основном высококальциевые ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.65\text{—}1.41$), тогда как их эквиваленты из дайки 2-го типа низкокальциевые ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.26\text{—}0.34$). Следует отметить широкие вариации индекса насыщения алюминием (A/CNK) в салической части дайки участка Сайзырал — от 0.99 до 1.37, тогда как в дайке участка Тавыт-Даг индекс составляет 0.87—1.03.

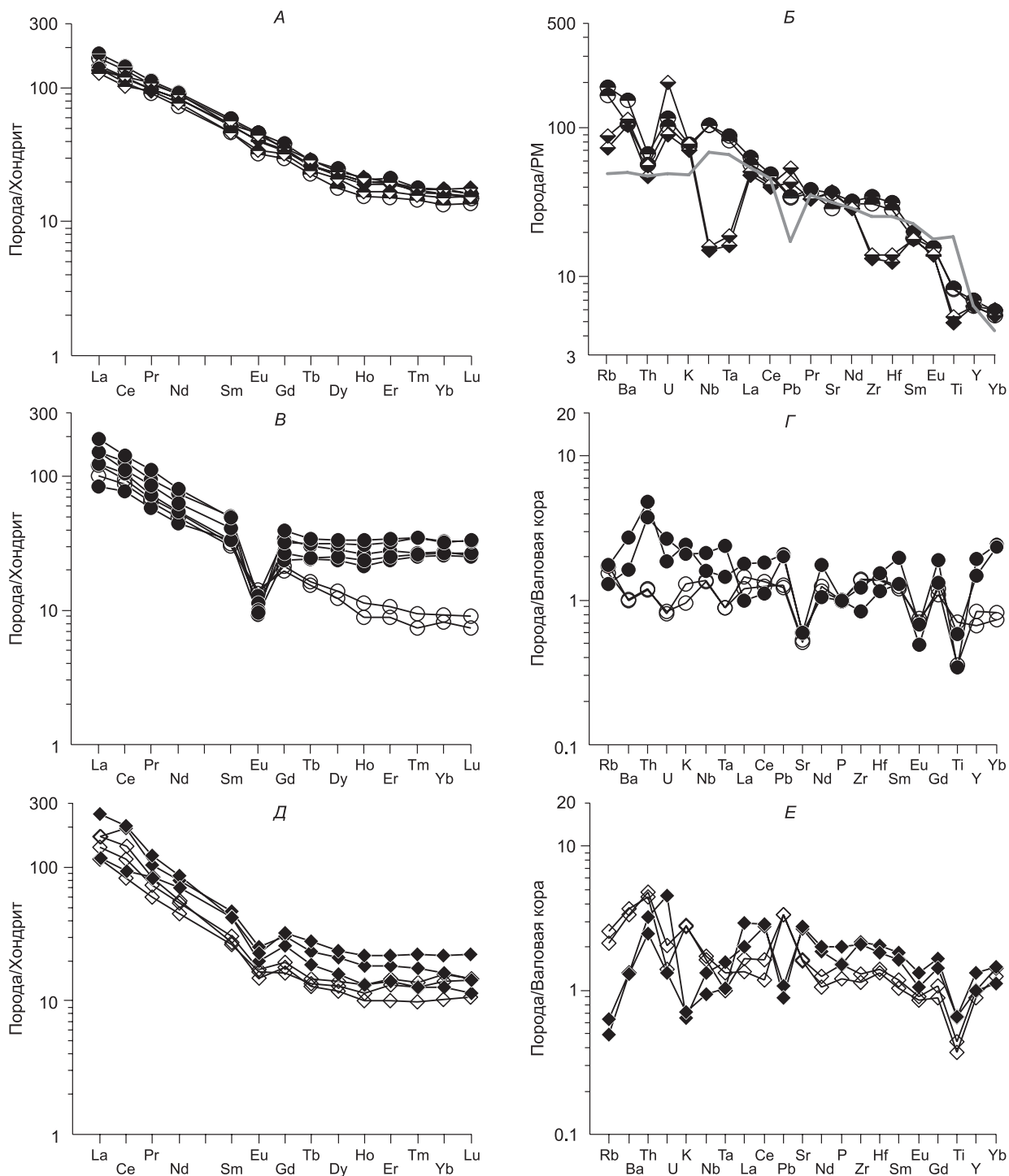


Рис. 8. Распределение редкоземельных элементов (*A, B, Д*) и спайдер-диаграммы (*Б, Г, E*) для пород комбинированных даек и вмещающих образований Западного Сангиленга.

A, B, Д — нормировано по [Sun, McDonough, 1989]; *Б* — нормировано по [Palme et al., 2003]; *Г, E* — нормировано по [Rudnick, Gao, 2003]. Усл. обозн. см. рис. 6.

Вмещающие породы обеих даек имеют контрастные различия. Порфировидные граниты и лейкограниты Матутского массива умеренно-щелочные, металюминиевые ($A/CNK = 0.89—1.06$), содержат 68—70 мас. % SiO_2 и принадлежат к высококальциевой известково-щелочной серии (6.5—9 мас. % суммы щелочей) с отношением $K_2O/Na_2O = 0.7—1.5$. Автохтонные гнейсограниты Эрзинской тектонической зоны, вмещающие комбинированную дайку на участке Сайзырал, соответствуют низкощелочным, низ-

кокалиевым, известковым, пералюминиевым ($A/CNK = 1.08 — 1.16$) лейкогранитам [Шарпенюк и др., 2013], содержащим 72—75 мас. % SiO_2 , около 5 мас. % суммы щелочей с отношением $K_2O/Na_2O = 0.48—0.8$ (см. табл. 3, рис. 6).

Содержание и характер распределения REE в базитах рассматриваемых комбинированных даек практически не различаются (рис. 8, А, Б). Для них характерно умеренно высокое суммарное содержание лантаноидов ($\Sigma \approx 197$ г/т), преобладание LREE над HREE ($(La/Yb)_n = 9.5$), отсутствие европиевой аномалии ($Eu/Eu^* = 0.96$). Индикаторные отношения $(Gd/Yb)_n$ и $(La/Sm)_n$ составляют 2.12 и 2.13 соответственно. В противоположность этому салическая часть даек различается достаточно контрастно (см. рис. 8, В—Е): участки Сайзырал/Тавыт-Даг — ($\Sigma = 157/245$ г/т; $(La/Yb)_n = 4.4/15.1$; $Eu/Eu^* = 0.32/0.63$; $(Gd/Yb)_n = 1.08/1.96$; $(La/Sm)_n = 2.01/3.48$).

Вмещающие образования — гнейсограниты эрзинского метаморфического комплекса и порфировидные граниты Матутского массива имеют незначительные различия в содержании HREE (см. рис. 8), в меньшей мере отличаются другими параметрами редкоземельного спектра: $\Sigma = 130/138$ г/т; $(La/Yb)_n = 12.8/8.4$; $Eu/Eu^* = 0.53/0.73$; $(Gd/Yb)_n = 2.39/1.8$; $(La/Sm)_n = 2.6/3.25$.

Спайдер-диаграммы демонстрируют наиболее типичные геохимические особенности рассматриваемых пород. Базиты по характеру распределения и уровню концентраций большинства литофильных элементов сопоставимы с ОИВ (см. рис. 8, Б), отличаясь от последних более высокими концентрациями Rb, Ba, K, U, при этом максимальные содержания перечисленных элементов установлены в базитах дайки участка Сайзырал. Последние обогащены Nb, Ta, в меньшей мере Zr и Hf по сравнению с ОИВ, тогда как для базитов из дайки участка Тавыт-Даг, напротив, характерны глубокие отрицательные аномалии Nb-Ta и Zr-Hf, что, на наш взгляд, отражает разный состав источников магм. Нормированные по валовой континентальной коре [Rudnick, Gao, 2003] графики распределения литофильных элементов в парах салическая часть дайки—вмещающая порода приведены на рис. 8, Б, В. Лейкограниты из дайки участка Сайзырал характеризуются повышенными содержаниями крупноионных литофильных элементов и лантаноидов (см. рис. 8, Б) относительно вмещающих гнейсогранитов эрзинского метаморфического комплекса, при почти полном сходстве правой части спектра, за исключением Y и Yb. В дайке участка Тавыт-Даг спектры дайковых салических пород и вмещающих гранитов Матутского массива по большинству элементов комплементарны (см. рис. 8, В), однако содержания Rb и Ba в дайке существенно ниже. Диаметрально противоположно поведение калия и свинца — в дайковых салических породах наблюдается минимум калия и свинца, тогда как во вмещающих образованиях — максимум, что вполне согласуется с петрографическими особенностями пород и коррелирует с пониженными концентрациями Rb и Ba, основным концентратором которых, включая Pb, является калиевый полевой шпат.

ИЗОТОПНЫЙ ВОЗРАСТ

U-Pb изотопно-геохронологические исследования цирконов из пород комбинированных даек и вмещающих образований проводились в Геологическом институте СО РАН (г. Улан-Удэ) методом магнитно-секторной масс-спектрометрии с лазерным пробоотбором (LA-SF-ICP-MS) на масс-спектрометре высокого разрешения Element XR, фирмы Thermo Scientific. Пробоотбор проводился с помощью устройства лазерной абляции UP-213 фирмы New Wave Research. Детали аналитической процедуры и параметры измерения приведены в [Хубанов и др., 2016]. Анализ каждой пробы цирконов сопровождался измерением эталонных образцов 91500 (1065 млн лет) [Wiedenbeck et al., 1995] и Plešovice (337 млн лет) [Slama et al., 2008], которые использовались в качестве внешнего стандарта и контрольного образца. Возраст рассчитывался по средневзвешенным значениям изотопных отношений $^{206}Pb/^{238}U$ и $^{207}Pb/^{235}U$. Погрешность измерения этих отношений в контрольном образце варьировала от 1.05 до 2.12 % и от 2.53 до 4.61 %. Погрешность средневзвешенных значений конкордантных возрастов циркона Plešovice составляла 0.01 — 0.88 % от его аттестованного возраста.

Участок Сайзырал. Для изотопно-геохронологических исследований отобраны пробы из вмещающих гнейсогранитов (пр. ER-02-15), примерно в 30—40 см от контакта с дайкой; из базитов (пр. ER-02/3-15) и из лейкогранитов салической части дайки (пр. ER-02/4-15). Результаты U-Pb изотопных исследований приведены в табл. 4.

В пр. ER-02-15 (гнейсогранит эрзинского метаморфического комплекса) присутствуют цирконы двух типов: 1) короткопризматические светло-розовые прозрачные зерна размером 180—315 мкм с коэффициентом удлинения (K_y) 1.1—1.5. Среднее содержание HfO_2 (по данным энергодисперсионной спектроскопии) составляет 1.3 мас. %; 2) длиннопризматические бледно-розовые полупрозрачные кристаллы размером 180—205 мкм с $K_y = 1.5—3.0$. Содержание гафния ниже предела обнаружения. Значения U-Pb изотопного возраста, полученные по 24 точкам, независимо от морфологии зерен, дают широкий разброс от ~679 до 934 млн лет (рис. 9). Кроме того, по нескольким зернам получены значительно

Таблица 4. Результаты LA-ICP-MS датирования цирконов из пород комбинированных даек, гранитов Матугского массива и гнейсогранитов Эрзинской тектонической зоны Западного Саянстана

№ п/п	Изотопные отношения						Rho	Возраст						D	²⁰⁷ Pb _{кор.} возраст			
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±1σ		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±1σ		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±1σ		
	2	3	4	5	6	7		8	9	10	11	12	13		14	15	16	17
Пр. ER-02-15																		
1	0.06720	2.11	1.24521	2.03	0.13436	1.23	0.60	843.90	43.35	821.20	11.45	812.70	9.36	1.05	811.74	9.74		
2	0.06465	2.20	1.30468	2.12	0.14633	1.25	0.59	763.00	45.72	847.80	12.18	880.40	10.29	-3.70	884.19	10.78		
3	0.06437	2.22	1.13441	2.14	0.12779	1.25	0.58	753.70	46.31	769.90	11.55	775.30	9.14	-0.70	775.84	9.50		
4	0.06714	2.61	1.15145	2.50	0.12435	1.36	0.54	842.20	53.23	777.90	13.57	755.60	9.68	2.95	753.14	10.04		
5	0.06398	2.49	1.18593	2.39	0.13440	1.32	0.55	741.10	51.65	794.10	13.16	812.90	10.06	-2.31	815.04	10.50		
8	0.06871	2.12	1.38525	2.05	0.14619	1.24	0.60	890.10	43.35	882.70	12.07	879.60	10.21	0.35	879.22	10.63		
9	0.06442	2.10	1.14762	2.02	0.12918	1.22	0.60	755.50	43.57	776.10	10.94	783.20	8.97	-0.91	783.97	9.31		
10	0.06535	2.33	1.00097	2.23	0.11107	1.28	0.57	785.70	48.02	704.30	11.32	678.90	8.22	3.74	676.38	8.49		
11	0.05687	2.41	0.62481	2.32	0.07967	1.27	0.55	485.90	52.40	492.90	9.04	494.20	6.04	-0.26	494.27	6.18		
12	0.06573	2.51	1.06626	2.41	0.11763	1.33	0.55	797.90	51.73	736.90	12.62	716.90	9.03	2.79	714.82	9.36		
13	0.06671	3.54	1.15390	3.40	0.12545	1.62	0.48	828.60	72.19	779.10	18.52	761.80	11.65	2.27	759.98	12.10		
14	0.06907	3.84	1.12329	3.88	0.11794	2.18	0.56	900.80	77.15	764.50	20.83	718.70	14.80	6.37	713.82	15.26		
15	0.07178	2.97	1.39870	2.85	0.14131	1.49	0.52	979.80	59.31	888.40	16.86	852.00	11.89	4.27	847.77	12.42		
16	0.06861	2.70	1.33059	2.59	0.14064	1.40	0.54	887.10	54.75	859.10	15.01	848.30	11.14	1.27	847.02	11.62		
17	0.06847	3.37	1.32600	3.24	0.14046	1.59	0.49	882.70	68.15	857.10	18.74	847.20	12.67	1.17	846.11	13.25		
18	0.06588	2.46	1.21757	2.37	0.13404	1.33	0.56	802.50	50.82	808.70	13.21	810.90	10.12	-0.27	811.12	10.54		
19	0.06472	2.02	1.28295	1.94	0.14377	1.21	0.62	765.20	41.92	838.20	11.07	865.90	9.84	-3.20	869.17	10.25		
21	0.06629	3.06	1.42427	2.95	0.15584	1.51	0.51	815.40	62.72	899.20	17.57	933.60	13.13	-3.68	937.83	13.83		
22	0.06942	3.14	1.21269	3.02	0.12670	1.53	0.51	911.20	63.44	806.40	16.78	769.00	11.09	4.86	764.87	11.52		
23	0.06703	2.42	1.28333	2.32	0.13886	1.33	0.57	838.70	49.46	838.30	13.22	838.20	10.41	0.01	838.20	10.86		
24	0.06533	2.66	1.24605	2.55	0.13833	1.39	0.54	785.00	54.86	821.60	14.38	835.20	10.85	-1.63	836.76	11.36		
25	0.06548	2.41	1.29152	2.31	0.14306	1.32	0.57	789.80	49.75	842.00	13.24	861.90	10.67	-2.31	864.26	11.15		
26	0.06816	2.79	1.33256	2.67	0.14180	1.43	0.54	873.50	56.55	860.00	15.48	854.80	11.47	0.61	854.23	11.97		
27	0.06663	2.57	1.27283	2.46	0.13857	1.37	0.56	826.10	52.57	833.70	13.98	836.60	10.74	-0.35	836.89	11.22		
28	0.05829	2.76	0.60969	2.64	0.07587	1.40	0.53	540.00	59.77	483.40	10.15	471.40	6.32	2.55	470.40	6.49		
30	0.06647	2.74	1.20340	2.63	0.13133	1.42	0.54	821.10	56.20	802.20	14.57	795.40	10.62	0.85	794.69	11.03		
Пр. ER-02/4-15																		
1	0.05698	3.07	0.64393	2.96	0.08194	1.54	0.52	490.2	66.87	504.7	11.77	507.7	7.53	-0.59	507.97	7.72		
2	0.05902	2.88	0.63192	2.79	0.07764	1.51	0.54	567.7	61.66	497.3	10.96	482	6.98	3.17	480.64	7.16		

Продолжение табл. 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
13	0.05537	3.31	0.61635	3.18	0.08072	1.62	0.51	426.8	71.86	487.6	12.32	500.4	7.83	-2.56	501.59	8.04
14	0.05612	3.53	0.61569	3.38	0.07954	1.68	0.50	456.9	76.19	487.1	13.09	493.4	7.99	-1.28	493.95	8.23
18	0.05781	3.62	0.64712	3.46	0.08118	1.74	0.50	522.4	77.65	506.7	13.82	503.2	8.39	0.70	502.84	8.64
19	0.05776	4.32	0.63507	4.14	0.07996	1.93	0.47	514.2	92.7	499.2	16.33	495.9	9.16	0.67	495.58	9.46
21	0.05538	3.79	0.60548	3.62	0.07931	1.79	0.50	427.3	82.22	480.7	13.85	492	8.49	-2.30	493.01	8.73
22	0.05853	3.96	0.63731	3.78	0.07899	1.85	0.49	549.7	84.39	500.6	14.96	490.1	8.71	2.14	489.12	8.96
24	0.0553	4.7	0.61046	4.48	0.08009	2.04	0.45	424.4	101.43	483.9	17.24	496.6	9.73	-2.56	497.81	10.04
25	0.05722	4.39	0.60575	4.18	0.07682	1.97	0.47	499.3	94.5	480.9	16.01	477.1	9.04	0.80	476.76	9.30
26	0.05524	4.69	0.61583	4.45	0.08091	2.05	0.46	421.7	101.18	487.2	17.21	501.6	9.88	-2.87	502.83	10.22
28	0.05797	4.38	0.62345	4.14	0.07807	1.99	0.48	528.2	93.46	492	16.15	484.6	9.25	1.53	483.89	9.53
30	0.05513	4.46	0.60842	4.22	0.08012	2.01	0.48	417.6	96.58	482.6	16.2	496.8	9.61	-2.86	498.09	9.91
Ир. ER-02/3-15																
16	0.06282	3.26	1.02217	3.19	0.11815	1.64	0.51	702.20	68.02	715.00	16.39	719.90	11.18	-0.68	720.35	11.61
17	0.06374	4.46	1.04021	4.32	0.11850	1.99	0.46	733.20	91.69	724.00	22.37	721.90	13.60	0.29	721.64	14.15
18	0.06386	3.68	1.05933	3.60	0.12047	1.77	0.49	736.90	76.17	733.50	18.78	733.30	12.27	0.03	733.17	12.73
19	0.06445	4.22	0.96303	4.10	0.10851	1.93	0.47	756.40	86.69	684.90	20.44	664.10	12.17	3.13	661.93	12.57
20	0.06301	4.02	1.02123	3.91	0.11770	1.87	0.48	708.70	83.09	714.50	20.06	717.30	12.71	-0.39	717.53	13.19
4	0.05380	4.63	0.56196	4.45	0.07579	1.85	0.41	362.50	100.34	452.80	16.26	470.90	8.40	-3.84	472.46	8.65
5	0.05533	3.85	0.59566	3.72	0.07812	1.68	0.45	425.30	83.61	474.50	14.09	484.90	7.84	-2.14	485.77	8.06
6	0.05142	4.38	0.55501	4.22	0.07833	1.77	0.42	259.60	97.24	448.30	15.30	486.20	8.29	-7.80	489.33	8.59
7	0.05776	4.03	0.64906	3.90	0.08156	1.74	0.45	520.40	86.55	507.90	15.58	505.40	8.49	0.49	505.18	8.71
8	0.05811	4.13	0.62148	3.97	0.07763	1.78	0.45	533.30	88.30	490.80	15.46	481.90	8.27	1.85	481.17	8.48
1	0.05293	4.65	0.31804	4.46	0.04358	1.84	0.41	325.90	101.90	280.40	10.92	275.00	4.92	1.96	274.59	5.04
10	0.05718	3.71	0.37484	3.57	0.04758	1.66	0.46	498.00	80.22	323.20	9.90	299.70	4.87	7.84	297.86	4.94
11	0.05153	3.96	0.33471	3.83	0.04716	1.72	0.45	264.40	88.44	293.20	9.76	297.10	4.98	-1.31	297.33	5.09
13	0.05496	3.91	0.34572	3.77	0.04567	1.73	0.46	410.70	84.51	301.50	9.85	287.90	4.87	4.72	286.86	4.95
14	0.05419	4.52	0.34930	4.36	0.04680	1.88	0.43	378.90	97.91	304.20	11.46	294.80	5.41	3.19	294.13	5.52
Ир. ER-03-15																
1	0.06040	2.47	0.68376	2.38	0.08209	1.30	0.55	618.00	52.40	529.00	9.80	508.60	6.39	4.01	506.78	6.52
3	0.05845	2.63	0.66635	2.53	0.08267	1.34	0.53	546.60	56.42	518.50	10.28	512.00	6.61	1.27	511.48	6.77
5	0.05816	2.30	0.66230	2.23	0.08258	1.27	0.57	535.10	50.25	516.00	9.00	511.50	6.28	0.88	511.11	6.40

8	0.05836	2.78	0.65119	2.68	0.08090	1.40	0.52	543.40	59.69	509.20	10.73	501.50	6.72	1.54	500.83	6.91
9	0.05850	2.65	0.67214	2.55	0.08330	1.37	0.54	548.70	56.89	522.00	10.42	515.80	6.78	1.20	515.25	6.95
10	0.05721	2.29	0.66679	2.21	0.08450	1.29	0.58	499.20	50.20	518.80	8.98	522.90	6.49	-0.78	523.31	6.64
11	0.05686	2.85	0.67468	2.75	0.08603	1.43	0.52	485.30	62.44	523.60	11.24	532.00	7.28	-1.58	532.78	7.51
12	0.05812	2.91	0.68705	2.79	0.08569	1.45	0.52	534.00	62.78	531.00	11.55	530.00	7.34	0.19	529.92	7.56
13	0.05760	2.92	0.64457	2.81	0.08112	1.45	0.52	514.40	63.10	505.10	11.17	502.80	7.01	0.46	502.62	7.22
14	0.05937	3.00	0.67032	2.89	0.08185	1.48	0.51	580.70	63.85	520.90	11.76	507.10	7.20	2.72	505.96	7.39
15	0.05680	2.87	0.64673	2.76	0.08254	1.44	0.52	483.20	62.82	506.50	11.02	511.20	7.11	-0.92	511.70	7.28
17	0.05719	3.72	0.65226	3.58	0.08267	1.67	0.47	498.40	80.51	509.90	14.36	512.00	8.22	-0.41	512.25	8.45
18	0.05745	2.99	0.65687	2.88	0.08289	1.50	0.52	508.30	64.90	512.70	11.60	513.30	7.41	-0.12	513.42	7.58
19	0.05823	3.14	0.65488	3.02	0.08152	1.55	0.51	537.80	67.80	511.50	12.13	505.20	7.49	1.25	504.66	7.70
20	0.05815	3.20	0.64774	3.08	0.08074	1.56	0.51	534.80	69.10	507.10	12.30	500.60	7.53	1.30	499.99	7.71
21	0.05969	3.47	0.67170	3.34	0.08156	1.66	0.50	592.90	72.99	521.70	13.62	505.40	8.02	3.23	504.01	8.25
22	0.05938	3.96	0.69299	3.81	0.08458	1.77	0.47	581.20	83.77	534.60	15.82	523.40	8.93	2.14	522.43	9.17
23	0.05685	3.29	0.61582	3.16	0.07851	1.60	0.51	485.10	71.53	487.20	12.23	487.20	7.55	0.00	487.25	7.72
24	0.05776	3.27	0.64344	3.15	0.08074	1.61	0.51	520.50	70.49	504.40	12.53	500.50	7.78	0.78	500.22	7.95
25	0.05605	3.30	0.63519	3.19	0.08213	1.63	0.51	454.10	71.83	499.30	12.57	508.80	7.97	-1.87	509.68	8.20
26	0.05449	3.29	0.58324	3.17	0.07757	1.65	0.52	391.40	71.44	466.50	11.86	481.60	7.63	-3.14	482.91	7.86
27	0.05534	4.03	0.60866	3.88	0.07972	1.83	0.47	425.60	87.31	482.70	14.90	494.40	8.70	-2.37	495.48	8.97
28	0.05749	3.65	0.64801	3.51	0.08169	1.75	0.50	509.90	78.63	507.30	14.02	506.20	8.51	0.22	506.14	8.75
29	0.05821	4.43	0.64166	4.26	0.07988	1.95	0.46	537.20	94.82	503.30	16.93	495.40	9.32	1.59	494.74	9.57

Ип. ER-03/9-15

1	0.06044	2.78	0.63643	2.68	0.07635	1.35	0.50	619.30	59.03	500.10	10.57	474.30	6.15	5.44	472.08	6.30
2	0.06512	1.89	1.26190	1.83	0.14050	1.17	0.64	778.10	39.35	828.80	10.36	847.50	9.31	-2.21	849.66	9.73
3	0.06777	2.20	1.29121	2.11	0.13813	1.25	0.59	861.60	44.87	841.80	12.09	834.10	9.79	0.92	833.21	10.20
4	0.06496	2.06	0.99180	1.98	0.11069	1.20	0.61	772.90	42.67	699.60	10.01	676.80	7.74	3.37	674.44	7.95
5	0.06489	2.31	0.97896	2.22	0.10937	1.26	0.57	770.80	47.87	693.10	11.16	669.10	8.03	3.59	666.68	8.26
6	0.06589	1.81	1.26239	1.75	0.13891	1.16	0.66	802.70	37.51	829.00	9.93	838.50	9.11	-1.13	839.61	9.48
7	0.06678	2.05	1.30025	1.98	0.14115	1.22	0.62	831.00	42.12	845.80	11.35	851.20	9.70	-0.63	851.81	10.13
8	0.06321	2.06	0.95893	1.99	0.10999	1.21	0.61	715.10	43.20	682.70	9.88	672.70	7.72	1.49	671.69	7.96
9	0.06419	2.20	1.06563	2.12	0.12035	1.25	0.59	748.00	45.82	736.60	11.12	732.60	8.63	0.55	732.18	8.93
10	0.06439	1.75	1.20358	1.71	0.13551	1.15	0.67	754.50	36.77	802.20	9.47	819.20	8.84	-2.08	821.15	9.21
11	0.06729	1.90	1.32859	1.84	0.14315	1.19	0.65	846.60	39.02	858.30	10.66	862.40	9.58	-0.48	862.96	9.99
12	0.06587	1.96	1.32199	1.89	0.14550	1.20	0.63	802.30	40.44	855.40	10.95	875.70	9.83	-2.32	878.10	10.29
13	0.06299	1.87	1.14765	1.82	0.13209	1.17	0.65	707.80	39.33	776.10	9.85	799.80	8.85	-2.96	802.40	9.18

Окончание табл. 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
14	0.06317	1.95	1.00322	1.89	0.11514	1.19	0.63	713.90	40.90	705.40	9.60	702.50	7.95	0.41	702.25	8.17
15	0.06705	1.74	1.41752	1.70	0.15328	1.15	0.68	839.20	35.93	896.30	10.10	919.30	9.91	-2.50	922.14	10.36
17	0.06617	2.16	1.24261	2.10	0.13613	1.26	0.60	811.90	44.70	820.10	11.82	822.80	9.72	-0.33	823.08	10.10
18	0.06556	2.14	1.24238	2.08	0.13738	1.25	0.60	792.50	44.28	820.00	11.67	829.80	9.77	-1.18	830.98	10.16
19	0.06834	1.90	1.14963	1.85	0.12195	1.20	0.65	879.00	38.94	777.10	10.05	741.80	8.41	4.76	737.99	8.64
20	0.06568	2.42	1.10720	2.35	0.12222	1.33	0.57	796.10	50.04	756.80	12.51	743.30	9.31	1.82	741.90	9.64
21	0.06381	2.29	1.05047	2.22	0.11936	1.29	0.58	735.20	47.73	729.10	11.54	726.90	8.89	0.30	726.66	9.18
22	0.06600	2.45	1.26620	2.39	0.13909	1.34	0.56	806.30	50.70	830.70	13.54	839.50	10.59	-1.05	840.55	11.04
23	0.06368	2.36	0.99281	2.28	0.11302	1.31	0.57	731.20	49.02	700.20	11.52	690.30	8.58	1.43	689.28	8.85
24	0.06637	2.08	1.23831	2.02	0.13527	1.25	0.62	818.00	42.72	818.10	11.33	817.90	9.61	0.02	817.85	9.98
25	0.05612	2.66	0.60248	2.58	0.07783	1.36	0.53	456.90	58.06	478.80	9.84	483.20	6.33	-0.91	483.54	6.50
26	0.06906	2.45	1.23614	2.38	0.12978	1.36	0.57	900.50	49.68	817.10	13.33	786.60	10.06	3.88	783.22	10.40
27	0.05906	2.74	0.71128	2.65	0.08732	1.40	0.53	569.30	58.46	545.50	11.18	539.60	7.24	1.09	539.15	7.43
28	0.06307	2.27	1.08275	2.20	0.12447	1.30	0.59	710.60	47.37	745.00	11.64	756.20	9.31	-1.48	757.46	9.64
29	0.06456	2.57	1.05378	2.50	0.11835	1.39	0.55	760.00	53.41	730.80	13.03	721.00	9.46	1.36	720.06	9.78
30	0.06208	2.48	0.85678	2.40	0.10006	1.36	0.57	676.90	52.02	628.40	11.27	614.80	7.95	2.21	613.47	8.19
Пр. ER-03/2-15																
6	0.06169	3.63	0.64843	3.40	0.07699	1.65	0.49	663.40	75.92	507.50	13.57	478.10	7.63	6.15	475.23	7.78
7	0.05574	3.07	0.61753	2.88	0.08115	1.47	0.51	441.50	66.76	488.30	11.16	503.00	7.09	-2.92	503.92	7.29
10	0.13216	9.55	1.89489	8.64	0.10502	4.76	0.55	2126.80	158.28	1079.30	57.43	643.70	29.17	67.67	589.38	29.00
14	0.05590	4.06	0.60715	3.83	0.07954	1.75	0.46	448.30	87.71	481.80	14.69	493.40	8.30	-2.35	494.06	8.55
16	0.05868	4.77	0.61107	4.50	0.07627	1.98	0.44	555.20	100.95	484.20	17.31	473.80	9.03	2.20	472.60	9.29
17	0.05925	5.81	0.65271	5.48	0.08068	2.31	0.42	576.30	121.52	510.10	21.96	500.20	11.09	1.98	498.96	11.43
18	0.09595	7.79	1.18370	7.16	0.09036	3.51	0.49	1546.80	139.55	793.00	39.43	557.70	18.71	42.19	532.82	18.91
19	0.07607	7.91	0.90959	7.41	0.08758	3.20	0.43	1096.90	150.79	656.80	35.86	541.20	16.61	21.36	529.68	16.99

Примечание: LA-ICP-MS U-Rb изотопное датирование цирконов выполнено в ГИИ СО РАН (г. Улан-Удэ) на масс-спектрометре Element XR (Thermo Science, Германия) с лазерной приставкой UP-213 (NewWave, США). Описание методики приведено в [Хубанов и др., 2016]. ρ_{ho} – коэффициент корреляции между ошибками отношений $^{207}\text{Rb}/^{235}\text{U}$ и $^{206}\text{Rb}/^{238}\text{U}$. D – дискордантность; $D = (\text{возраст } (^{207}\text{Rb}/^{235}\text{U})/\text{возраст } (^{206}\text{Rb}/^{238}\text{U}) - 1) \cdot 100$. Погрешности изотопных отношений приведены в процентах, возрастах, погрешности и их погрешности — в млн лет.

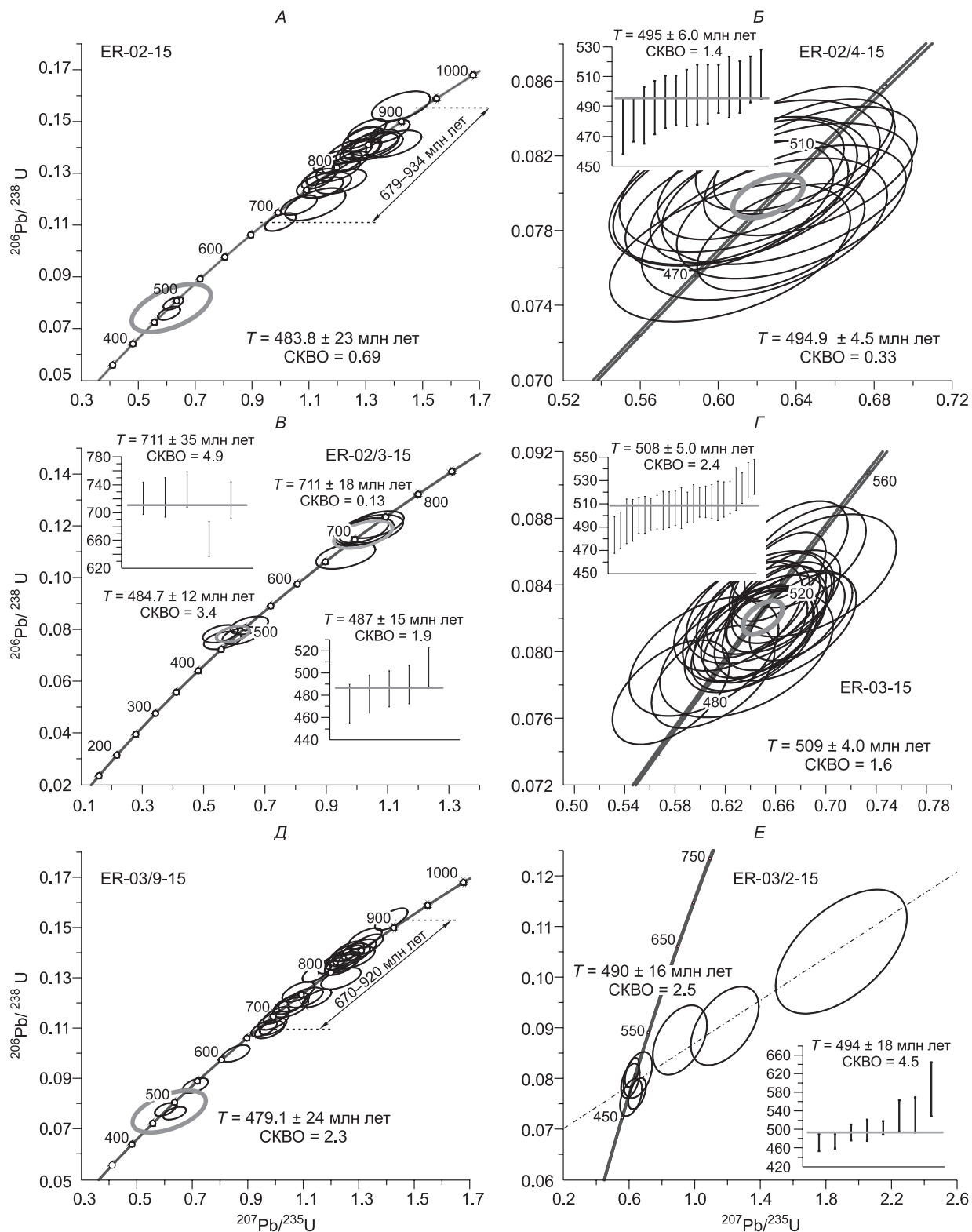


Рис. 9. Диаграммы с конкордией для цирконов из пород комбинированных даек и вмещающих образований Западного Сангилена.

Участок Сайзырал: *A* — гнейсограниты Эрзинской тектонической зоны, *B* — салическая, *B* — базитовая составляющие комбинированной дайки; участок Тавыт-Даг: *Г* — граниты Матутского массива, *Д* — салическая, *Е* — базитовая составляющие комбинированной дайки. Значения погрешностей для приведенных U-Pb датировок соответствуют 95 %-му доверительному интервалу ($\pm 2\sigma$).

более древние значения возраста — от 1113 до 2136 млн лет (не показаны), а по двум зернам более «молодая» датировка — 483.8 ± 23 млн лет.

В пробе ER-02/4-15 (лейкогранит из салической части комбинированной дайки) цирконы представлены короткопризматическими прозрачными светло-розовыми кристаллами размером 130—190 мкм с K_y от 1.4 до 2.5 и содержанием HfO_2 от 1.1 до 2.19 мас. %. U-Pb изотопный возраст, полученный по 14 точкам, составляет 494.9 ± 4.5 млн лет, СКВО = 0.33 (см. рис. 9).

В пробе ER-02/3-15 (базитовая составляющая комбинированной дайки) обнаружены коричневые практически непрозрачные дипирамидальные кристаллы цирконов размером не более 70 мкм с K_y от 1.3 до 2.4. Содержание HfO_2 ниже предела обнаружения. Аналитические точки располагаются вдоль конкордии, образуя два самостоятельных кластера с возрастaми 711 ± 18 млн лет (СКВО = 0.13; $N = 5$); 484.7 ± 12 млн лет (СКВО = 3.4; $N = 4$) (см. рис. 9).

Участок Тавыт-Даг. Для изотопно-геохронологических исследований отобраны пробы порфировидных гранитов Матутского массива (пр. ER-03-15), салической части комбинированной дайки (пр. ER-03/9-15) и из базитовой составляющей комбинированной дайки (пр. ER-03/2-15).

В пробе ER-03-15 (вмещающий гранит) присутствуют короткопризматические прозрачные светло-розовые кристаллы цирконов размером 190—320 мкм, $K_y = 1.5—2.5$. Содержание HfO_2 варьирует от 1.8 до 2.0 мас. %. Конкордантный возраст, полученный по 24 точкам, составляет 509 ± 4.0 млн лет, СКВО = 1.6.

Из пробы ER-03/9-15 (салическая часть комбинированной дайки) выделены длиннопризматические розовые замутненные кристаллы циркона размером 130—210 мкм, $K_y = 2.0—3.0$. Характерны многочисленные включения апатита. Содержание HfO_2 достигает 1.6 мас. %. По 29 аналитическим точкам получен широкий разброс значений возраста — от 474 до 920 млн лет (см. рис. 9). При этом большая часть аналитических точек лежит в диапазоне от 670 до 920 млн лет. Наиболее молодые значения образуют кластер из двух точек с возрастом 479.1 ± 24 млн лет, СКВО = 2.3.

В пробе ER-03/2-15 (базитовая часть дайки) цирконы дипирамидальные, серые, почти непрозрачные размером 80—100 мкм с $K_y = 1.5—2.4$. Содержание HfO_2 составляет 0.5—1.3 мас. %. Цирконов в пробе оказалось очень мало, часть из них резко дискордантна. По пяти измерениям (зернам) получен возраст 490 ± 16 млн лет, СКВО = 2.5 (см. рис. 9).

ОБСУЖДЕНИЕ

Ключевой вопрос, который решался в рамках настоящего исследования — это определение изотопного возраста комбинированных даек Западного Сангилена. Из полученных данных следуют два основных вывода: 1) комбинированные дайки формировались 495—480 млн л. н.; 2) в изученных цирконах кроме каледонских фиксируются неопротерозойские, а возможно, и более древние события. Рассмотрим эти выводы подробнее.

Возраст комбинированных даек. На участке Сайзырал достаточно надежно установлен U-Pb изотопный возраст цирконов из салической части дайки. Полученные значения образуют единый кластер с конкордантным возрастом 494.9 ± 4.5 млн лет. В базитовой части дайки цирконов сравнительно мало либо они слишком мелкие. Полученные значения образуют два самостоятельных кластера — 711 и 485 млн лет. Следует подчеркнуть, что каждый из этих кластеров включает не более 4—5 определений, поэтому рассматривать полученные значения возраста можно лишь в качестве вероятных. Тем не менее значение 484.7 ± 12 в пределах ошибки совпадает с возрастом салической части дайки, что подтверждает структурные и петрографические наблюдения, указывающие на сосуществование контрастных по составу магм. Таким образом, в качестве времени формирования дайки может быть принят изотопный возраст ее салической части, т. е. 495 млн лет. Если это так, то древние цирконы в базитовой части дайки, скорее всего, являются захваченными из вмещающих пород, что подтверждается данными по вмещающим образованиям.

Вмещающие дайку породы на участке Сайзырал представлены автохтонными и параавтохтонными гнейсогранитами эрзинского метаморфического комплекса. В этих породах обнаружены цирконы очень широкого возрастного диапазона — от палеопротерозойских до раннекаледонских. Среди этого многообразия четко фиксируется неопротерозойский кластер с широким возрастным диапазоном 679—934 млн лет и раннекаледонский, которому отвечают лишь два зерна (см. рис. 9) со средним возрастом 484 млн лет. Этот возраст с учетом большой погрешности совпадает с периодом формирования даек и внедрения гранитоидов, в частности Матутского массива. Судя по наиболее древним единичным значениям, в метаморфических породах сохранились цирконы протолита с возрастом не менее 0.9 млрд лет. Таким образом, можно сделать вывод, что породы эрзинского комплекса могут представлять собой метаморфизованные осадки, сформировавшиеся за счет разрушения и сноса докембрийских образований, скорее всего, Тувино-Монгольского массива. Примечательно, что изотопный состав кислорода в цирко-

нах из гнейсогранитов эрзинского метаморфического комплекса, по нашим данным**, имеет мантийное значение ($\delta^{18}\text{O} = 5.4 \text{ ‰}$), тогда как в кварце 12.7 ‰. Эти данные, с одной стороны, указывают на ювенильный состав протолита, с другой, — на неравновесность изотопного состава циркона и кварца, вероятно, возникшую в результате каледонских тектонометаморфических преобразований. В целом полученные данные, на наш взгляд, поддерживают представления о существовании докембрийского Тувино-Монгольского массива, большая часть которого переработана более поздними процессами.

Возраст Матутского гранитоидного массива (509 ± 4.0 млн лет), отвечает коллизийному периоду развития Западного Сангилен [Владимиров и др., 2017]. Изотопный состав кислорода $\delta^{18}\text{O}$ в цирконе и кварце (8.4 и 10.2 ‰) заметно отличается от метаморфических пород эрзинского комплекса ($\delta^{18}\text{O} = 5.4 \text{ ‰}$). Различия подчеркиваются относительно высококалийным составом гранитов Матутского массива и низкокалийным составом гнейсогранитов эрзинского комплекса. Из этого следует, что гранитоиды Матутского массива не могли сформироваться лишь за счет пород эрзинского комплекса. Появление кислых расплавов могло быть обеспечено за счет смешанных источников и на более глубоких уровнях земной коры.

В салической части комбинированной дайки участка Тавыт-Даг доминируют «древние» неопротерозойские цирконы, возраст которых варьирует от 670 до 920 млн лет, что практически совпадает с «древними» датировками гнейсоплагиигранитов участка Сайзырал (679—934 млн лет). Из этого следует, что салическая часть дайки содержит в основном захваченные древние цирконы, тогда как собственно времени формирования дайки отвечают единичные определения со средним возрастом 479 млн лет. Из этих данных напрашивается вывод, что салическая часть дайки Тавыт-Даг образована из продуктов парциального плавления эрзинских гнейсогранитов, т. е. пород вмещающих (подстилающих) Матутский гранитоидный массив. При этом существенные минералого-петрографические и геохимические различия салической части рассматриваемых даек, по-видимому, связаны как с гетерогенностью протолита, так и с разной степенью его плавления и разной степенью сегрегации расплава. Не противоречит этому и изотопный состав кислорода в кварце из салической части дайки, составляющий 10.2 ‰. Возрастные данные по базитовой составляющей дайки не очень надежны (см. выше). Тем не менее перекрытие с салической частью (490 ± 16 млн лет) в пределах погрешности определения указывает на реалистичность полученных значений.

Таким образом, полученные U-Pb изотопно-геохронологические данные приводят к выводу, что комбинированные дайки участков Сайзырал и Тавыт-Даг формировались примерно в одно и то же время — 490—485 млн л. н.

Согласно существующим представлениям о тектонической эволюции структур региона, именно в это время произошла смена геодинамических обстановок — коллизийное сжатие сменилось синдвиговым растяжением [Владимиров и др., 2005, 2017]. Внедрение комбинированных даек является индикатором начала постколлизийного растяжения, приведшем в итоге к развалу горно-складчатого сооружения Западного Сангилен [Владимиров и др., 2017].

Источники базитовых магм. В предыдущем разделе коротко затронут вопрос источников салических магм рассматриваемых комбинированных даек. Однако с петрологической точки зрения больший интерес вызывает происхождение базитовых магм, особенно учитывая тот факт, что собственно базитовый магматизм в регионе (524 млн л. н. [Изох и др., 2001]) начался значительно раньше времени внедрения даек (490—485 млн л. н.).

Для детального анализа геохимических типов мантийных источников базитов даек Эрзинской тектонической зоны данных пока явно недостаточно. Поэтому мы сосредоточим внимание на наиболее контрастных геохимических различиях, которые определяются, скорее всего, разным составом источников магм. Базиты рассматриваемых даек при явном геохимическом сходстве (см. выше) кардинально различаются содержаниями индикаторных элементов, таких как Rb, Nb, Ta, Zr, Hf, в меньшей мере Ti (см. табл. 1, рис. 8, Б). Эти различия не могут быть обусловлены ассимиляцией корового материала либо химическим взаимодействием (mixing) с салическим расплавом самих даек. Проиллюстрируем это на примере Nb. Содержание Nb в базитах дайки Сайзырал в среднем составляет примерно 63 г/т, тогда как в салической части дайки и вмещающих гнейсогранитах почти в 5 раз меньше (около 13 г/т). В дайке участка Тавыт-Даг (базиты, лейкограниты) и гранитах Матутского массива содержание Nb варьирует в одном и том же диапазоне от 6 до 15 г/т (в одной пробе 30 г/т, см. табл. 2). Такими образом, ни обогащение Nb (Ta) базитов участка Сайзырал (больше, чем в ОИБ, см. рис. 8, Б), ни, наоборот, деплетированность этими элементами не могут быть следствием каких-либо процессов ассимиляции/контаминации коровым материалом. Из этого следует, наш взгляд, единственно возможный вывод, суть которого в том, что наблюдаемые геохимические характеристики базитов комбинированных даек обусловлены

** Определения выполнены в ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ) на масс-спектрометре FINNIGAN MAT 253 с использованием метода лазерного фторирования [Sharp, 1990].

особенностями состава мантийного субстрата. Это подтверждается анализом канонических отношений высоконесовместимых элементов [Коваленко и др., 2009], величина которых определяется составом мантийного протолита. Так, например отношения Nb/Y в базитах Сайзырала и Тавыт-Дага в среднем составляют 2.3 и 0.37 соответственно; Zr/Y — 12.0 и 5.2; Th/Ta — 1.4—6.1; Zr/Nb — 5.0—13.9; Nb/Th — 12.0—2.5, т. е. различаются в разы или даже кратно. В целом геохимические характеристики базитов участка Сайзырал тяготеют к источникам OIB типа, тогда как для участка Тавыт-Даг они явно обнаруживают присутствие корового компонента в мантийном источнике [Halliday et al., 1995; Condie, 1997, 2005; Zhang et al., 2008]. Представляется, что такие различия в разновозрастных пространственно сопряженных проявлениях базитового магматизма могут быть обусловлены лишь геохимической стратификацией верхней мантии и вовлечением в процесс магмообразования ее разноглубинных уровней.

ВЫВОДЫ

Установлен U-Pb изотопный возраст комбинированных даек Западного Сангилен и вмещающих дайки метаморфических и магматических образований. Становление комбинированных даек происходило в период 485—490 млн л. н. Граниты Матутского массива имеют изотопный возраст 509 млн лет. В цирконах из гнейсогранитов эрзинского метаморфического комплекса зафиксированы термальные события рифейского (679—934 млн лет назад) и раннепалеозойского (484 млн лет назад) возраста.

В формировании базитовых компонентов комбинированных даек участвовали базитовые магмы, имеющие различия в петрогеохимических характеристиках, которые обусловлены особенностями состава мантийного субстрата. При этом коровая контаминация, скорее всего, не играла существенной роли.

Протолитом салической части комбинированных даек, по-видимому, были породы, близкие по составу к автохтонным и параавтохтонным гнейсогранитам эрзинского метаморфического комплекса. Заметные минералогическо-петрографические и геохимические различия салических частей рассматриваемых даек могут быть связаны с гетерогенностью метаморфической толщи, с разной степенью плавления гнейсогранитного протолита и разной степенью сегрегации расплава.

Авторы благодарны С.В. Хромых и анонимному рецензенту за конструктивные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Исследования выполнены при поддержке РФФ №15-17-10010, грантов РФФИ-Сибирь (проект 15-45-04208), РФФИ (проект 16-05-01011), проекта Министерства образования и науки РФ (№ 5.1688.2017/ПЧ).

ЛИТЕРАТУРА

Владимиров А.Г., Крук Н.Н., Владимиров В.Г., Гибшер А.С., Руднев А.С. Синкинематические граниты и коллизионно-сдвиговые деформации Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува) // Геология и геофизика, 2000, т. 41 (3), с. 398—413.

Владимиров В.Г., Владимиров А.Г., Гибшер А.С., Травин А.В., Руднев С.Н., Шемелина И.В., Барабаш Н.В., Савиных Я.В. Модель тектонометаморфической эволюции Сангилен (Юго-Восточная Тува, Центральная Азия) как отражение раннекаледонского аккреционно-коллизионного тектогенеза // ДАН, 2005, т. 405, № 1, с. 82—88.

Владимиров В.Г., Кармышева И.В., Яковлев В.А., Травин А.В., Цыганков А.А., Бурмакина Г.Н. Термохронология минглинг-даек Западного Сангилен (ЮВ Тува): свидетельства развала коллизионной системы на Северо-Западной окраине Тувино-Монгольского массива // Геодинамика и тектонофизика, 2017, т. 8, № 2, с. 283—310.

Гоникберг В.Е. Палеотектоническая природа северо-западной окраины Сангиленского массива Тувы в позднем докембрии // Геотектоника, 1997, № 5, с. 72—84.

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. Новосибирск, 2001а, с. 68—72.

Изох А.Э., Поляков Г.В., Мальковец В.Г., Шелепаев Р.А., Травин А.В., Литасов Ю.Д., Гибшер А.А. Позднеордовикский возраст камптонитов агардагского комплекса Юго-Восточной Тувы — свидетельство проявления плюмового магматизма при коллизионных процессах // ДАН, 2001б, т. 379, № 5, с. 511—514.

Ильин А.В., Моралев В.М. Докембрийские толщи Алтае-Саянской области // Советская геология, 1963, № 21, с. 51—58.

Кармышева И.В. Синкинематические граниты и коллизионно-сдвиговые деформации Западного Сангилен (ЮВ Тува): Автореф. дис.... к.г.-м.н. Новосибирск, ИГМ СО РАН, 2012, 16 с.

Кармышева И.В., Владимиров В.Г., Владимиров А.Г. Синкинематический гранитоидный магматизм Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува) // *Петрология*, 2017, т. 25, № 1, с. 92—118.

Коваленко В.И., Козловский А.М., Ярмолюк В.В. Отношения элементов-примесей как отражение смесимости источников и дифференциации магм щелочных гранитоидов и базитов Халдзан-Бурегтейского массива и одноименного редкометаллического месторождения, Западная Монголия // *Петрология*, 2009, т. 17, № 2, с. 175—196.

Козаков И.К., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Бибилова Е.В., Ковач В.П., Киризова Т.И., Бережная Н.Г., Лыхин Д.А. Возраст метаморфизма кристаллических комплексов Тувино-Монгольского массива: результаты U-Pb геохронологических исследований гранитоидов // *Петрология*, 1999а, т. 7, № 2, с. 174—190.

Козаков И.К., Сальникова Е.Б., Бибилова Е.В., Киризова Т.И., Котов А.Б., Ковач В.П. О полихронности развития палеозойского гранитоидного магматизма в Тувино-Монгольском массиве: результаты U-Pb геохронологических исследований // *Петрология*, 1999б, т. 7, № 6, с. 631—643.

Козаков И.К., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Ковач В.П., Натман А., Бибилова Е.В., Киризова Т.И., Тодт В., Кренер А., Яковлева С.З., Лебедев В.И., Сугоракова А.М. Возрастные рубежи структурного развития метаморфических комплексов Тувино-Монгольского массива // *Геотектоника*, 2001, № 3, с. 22—43.

Кузьмичев А.Б. Тектоническая история Тувино-Монгольского массива: раннебайкальский, позднебайкальский и раннекаледонский этапы. М., ПРОБЕЛ-2000, 2004, 194 с.

Лепезин Г.Г. Метаморфические комплексы Алтае-Саянской складчатой области. Новосибирск, Наука, 1978, 231 с.

Литвиновский Б.А., Занвилевич А.Н., Алакшин А.М., Подладчиков Ю.Ю. Ангаро-Витимский батолит — крупнейший гранитоидный плутон. Новосибирск, ОИГМ СО РАН, 1993, 141с.

Митрофанов Ф.П., Козаков И.К., Палей И.П. Докембрий Западной Монголии и Южной Тувы. Л., Наука, 1981, 156 с.

Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. СПб., Изд-во ВСЕГЕИ, 2009, 200 с.

Пономарева А.П., Каргополов С.А., Киреев А.Д. Гранитоидный магматизм Западного Сангилен (к вопросу о генезисе S- и A-гранитов) // *Геология и геофизика*, 2001, т. 42 (6), с. 937—950.

Травин А.В. Термохронология раннепалеозойских коллизионных, субдукционно-коллизионных структур Центральной Азии // *Геология и геофизика*, 2016, т. 57 (1), с. 553—574.

Хубанов В.Б., Буянтуев М.Д., Цыганков А.А. U-Pb изотопное датирование цирконов из PZ₃—MZ магматических комплексов Забайкалья методом магнитно-секторной масс-спектрометрии с лазерным пробоотбором: процедура определения и сопоставление с SHRIMP данными // *Геология и геофизика*, 2016, т. 57 (1), с. 241—258.

Шарпенко Л.Н., Костин А.Е., Кухаренко Е.А. TAS-диаграмма сумма щелочей — кремнезем для химической классификации и диагностики плутонических пород // *Региональная геология и металлогения*, 2013, № 56, с. 40—50.

Шелепаев Р.А. Эволюция базитового магматизма Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува): Автореф. дис.... к.г.-м.н. Новосибирск, 2006, 16 с.

Яковлев В.А., Кармышева И.В., Владимиров В.Г. Геолого-структурная характеристика минглинг-даек эрзинской тектонической зоны (Западный Сангилен, Юго-Восточная Тува) // *Петрология магматических и метаморфических формаций. Вып. 8. Материалы Всероссийской петрографической конференции с международным участием.* Томск, Изд-во Том. ЦНТИ, 2016, с. 365—370.

Bonin B. Do coeval mafic and felsic magmas in post-collisional to within-plate regimes necessarily imply two contrasting, mantle and crustal, sources? A review // *Lithos*, 2004, v. 78, p. 1—24.

Condie K.C. Source of Proterozoic mafic dyke swarms: constraints from Th/Ta and La/Yb ratios // *Precambrian Res.*, 1997, v. 81, p. 3—14.

Condie K.C. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // *Lithos*, 2005, v. 79, p. 491—504.

Didier J., Barbarin B. Enclaves and granite petrology. *Developments in petrology*, 13, Amsterdam, Elsevier, 1991, 625 p.

Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D. A geochemical classification for granitic rocks // *J. Petrol.*, 2001, v. 42, № 3, p. 2035—2048.

Halliday A.N., Lee D.-C., Tommasini S. Incompatible trace elements in OIB and MORB and source enrichment in the sub-oceanic mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1995, v. 133, p. 379—395.

Karmysheva I.V., Vladimirov V.G., Vladimirov A.G., Shelepaev R.A., Yakovlev V.A., Vasyukova E.A. Tectonic position of mingling dykes in accretion-collision system of Early Caledonides of West Sangilen (South-East Tuva, Russia) // *Geodyn. Tectonophys.*, 2015, v. 6, № 3, p. 289—310.

Kemp A.I.S., Hawkesworth C.J. Granitic perspectives on the generation and secular evolution of the continental crust // Treatise on geochemistry. Oxford, Elsevier Ltd., 2003, v. 3, p. 350—400.

Kuzmichev A.B., Bibikova E.V., Zhuravlev D.Z. Neoproterozoic (similar to 800 Ma) orogeny in the Tuva-Mongolia Massif (Siberia): island arc-continent collision at the northeast Rodinia margin // Precambrian Res., 2001, v. 110, p. 109—126.

Leake B.E., Woolley A.R., Apps C.E. Nomenclature of amphiboles: report of the Subcommittee of the Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names // Can. Miner., 1997, v. 35, p. 219—246.

Ludwig K.R. Isoplot 3.0. A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochron. Center Spec. Publ., 2003, v. 4.

Palme H., O'Neill H. St.C. Cosmochemical estimates of mantle composition // Treatise on geochemistry, Oxford, Elsevier Ltd., 2003, v. 2, p. 1—38.

Rickwood P.C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major elements // Lithos, 1989, v. 22, p. 247—263.

Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // Treatise on geochemistry. Oxford, Elsevier Ltd., 2003, v. 3, p. 1—64.

Sharp, Z. D. A laser-based microanalytical method for the *in situ* determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // Geochim. Cosmochim. Acta, 1990, v. 54, p. 1353—1357.

Slama J., Kosler J., Condon D.J., Gerdes A., Hanchan J.M., Horstwood M.S.A., Morris G.A., Nasdala L., Norberg N., Schaltegger U., Schoene B., Tubrett M.N., Whitehouse M.J. Plesovice zircon — A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis // Chem. Geol., 2008, v. 249, p. 1—35.

Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Magmatism in the ocean. basins / Eds. A.D. Saunders, M.J. Norry. Geol. Soc. London, Spec. Publ., 1989, v. 42, p. 313—345.

Wiedenbeck M., Alle P., Corfu F., Griffin W.L., Meier M., Oberli F., van Quadt A., Roddick J.C., Sriegel W. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses // Geostand. Newslett., 1995, v. 19, p. 1—23.

Zhang L.C., Zhou X.H., Ying J.F., Wang F., Gou F., Wan B., Chen Z.G. Geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes of Early Cretaceous basalts from the Great Xinggan Range, NE China: Implication for their origin and mantle source characteristics // Chem. Geol., 2008, v. 256, p. 12—23.

Рекомендована к печати 15 июня 2018 г.
А.Э. Изохом

Поступила в редакцию 15 июня 2017 г.,
после доработки — 22 декабря 2017 г.