ISSN 2078-502X 😇 🕛



### DOI: 10.5800/GT-2024-15-3-0760

## DIKE COMPLEXES IN THE EASTERN PART OF THE KAAKHEM MAGMATIC AREA (EASTERN TUVA): COMPOSITION, AGE, GEOLOGICAL POSITION

## V.A. Yakovlev <sup>®</sup>, I.V. Karmysheva <sup>®</sup>, S.N. Rudnev <sup>®</sup>, D.V. Semenova <sup>®</sup>, D.S. Yudin <sup>®</sup>

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

**ABSTRACT.** This paper presents the results of isotope-geochronological and petrological studies of gabbroic and combined diorite-granite dikes located in the eastern part of the Kaakhem magmatic area. Both groups of dikes cut through diorite-tonalite-plagiogranite associations of different ages (489±5 and 476±4 Ma). Zircons from granitoid of mingling dikes have an age of 477±3 Ma (LA-ICP-MS). The age of the gabbroic dikes was determined by LA-ICP-MS (zircon) and Ar-Ar (amphibole) methods and is 454±10 and 450±6.3 Ma, respectively. Similar contents of major and trace elements in basic and intermediate rocks of dikes indicate their formation from a single source with subduction characteristics. The salic rocks of the combined dikes vary in composition and are close to the heterogeneous diorite-tonalite-plagiogranite-granite associations of the host rocks. The formation of dike complexes occurred at the collisional stage of development of the Kaakhem magmatic area and is associated with the development of local extension zones.

KEYWORDS: basic magmatism; dikes; mingling; Kaakhem magmatic area

**FUNDING:** Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. Work is done on state assignment of IGM SB RAS (projects № 122041400176-0, 122041400044-2, 122041400171-5).



## **RESEARCH ARTICLE**

Correspondence: Vladislav A. Yakovlev, yakovlevva@igm.nsc.ru

Received: December 19, 2023 Revised: March 26, 2024 Accepted: April 15, 2024

**FOR CITATION:** Yakovlev V.A., Karmysheva I.V., Rudnev S.N., Semenova D.V., Yudin D.S., 2024. Dike Complexes in the Eastern Part of the Kaakhem Magmatic Area (Eastern Tuva): Composition, Age, Geological Position. Geodynamics & Tectonophysics 15 (3), 0760. doi:10.5800/GT-2024-15-3-0760

# ДАЙКОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КААХЕМСКОГО МАГМАТИЧЕСКОГО АРЕАЛА (ВОСТОЧНАЯ ТУВА): СОСТАВ, ВОЗРАСТ, ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ

### В.А. Яковлев, И.В. Кармышева, С.Н. Руднев, Д.В. Семенова, Д.С. Юдин

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

**АННОТАЦИЯ.** В статье приведены результаты изотопно-геохронологических и петрологических исследований пород габброидных и комбинированных диорит-гранитных даек, расположенных в восточной части Каахемского ареала. Обе группы даек прорывают разновозрастные диорит-тоналит-плагиогранитные ассоциации (489±5 и 476±4 млн лет). Цирконы из гранитоидов минглинг даек имеют возраст 477±3 млн лет (LA-ICP-MS). Возраст габброидных даек определен LA-ICP-MS (циркон) и Ar-Ar (амфибол) методами и составляет 454±10 и 450±6.3 млн лет соответственно. Близкие содержания петрогенных и редких элементов основных и средних пород даек указывают на их образование из единого источника, имеющего субдукционные характеристики. Салические породы комбинированных даек различаются по составу и близки неоднородным диорит-тоналит-плагиогранит-гранитным ассоциациям вмещающих пород. Формирование дайковых комплексов протекало на коллизионном этапе развития Каахемского магматического ареала и связано с развитием локальных зон растяжения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: базитовый магматизм; дайки; минглинг; Каахемский магматический ареал

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки РФ по государственному заданию ИГМ СО РАН (проекты № 122041400176-0, 122041400044-2, 122041400171-5).

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Последовательность тектономагматических событий, состав магмогенерирующих субстратов, а также связь гранитоидного и базитового магматизма при формировании крупных гранитоидных ареалов являются одними из наиболее обсуждаемых проблем геологии. В пределах Алтае-Саянской складчатой области (АССО) крупнейшим является Каахемский батолит (ареал-плутон), приуроченный к полям развития венд-раннекембрийских вулканических образований Таннуольской островной дуги (рис. 1, а).

Изотопно-геохронологическими и петрогеохимическими исследованиями гранитоидных и габброидных ассоциаций Каахемского ареала установлено, что их формирование происходило в диапазоне 570–450 млн лет [Kozakov et al., 1998; Rudnev et al., 2006; Rudnev, 2013; и др.]. Обособляются островодужный (570–520 млн лет) и аккреционно-коллизионный (510–450 млн лет) этапы. Общей чертой является тесная сопряженность гранитоидных ассоциаций с базитовым магматизмом: каждому этапу гранитообразования предшествует внедрение базитовых интрузий [Rudnev et al., 2006, 2015; Rudnev, 2013; Sugorakova, Khertek, 2017].

Наряду с крупными интрузивными образованиями, в регионе широко развиты менее изученные дайковые комплексы кислого и основного состава. Состав и морфология даек являются отражением различных процессов, проявленных в тектонических обстановках растяжения. К ним относятся процессы активного и пассивного внутриконтинентального рифтогенеза, коллизионные обстановки с формированием зон локального растяжения и активными сдвиговыми деформациями, обстановки активных континентальных окраин и зон срединно-океанических хребтов. Состав базитов в дайковых комплексах отражает специфику мантийного источника, а комбинированные дайки несут информацию о мантийно-коровом взаимодействии. Таким образом, структурные исследования дайковых комплексов и деформаций во вмещающих породах позволяют соотнести становление дайковых комплексов с этапами тектономагматической активизации [Gladkochub et al., 2007; Morozov et al., 2017; Polyansky et al., 2018; Ernst, 2014; и др.].

В работе приводятся первые данные по вещественному составу и возрасту базитовых и комбинированных даек восточной части Каахемского ареала. Рассматриваются вопросы петрогенезиса, источников расплавов и положение даек в эволюции магматических комплексов региона.

### 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования магматических пород включают в себя определение содержаний петрогенных и редких элементов, а также U-Pb и Ar-Ar методы изотопного датирования. Они выполнены в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск).

Содержание петрогенных элементов определено на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL-9900XP (Thermo Fisher Scientific Ltd). Определение содержаний редких элементов выполнено методом ИСП-МС на аппарате высокого разрешения ELEMENT фирмы Finnigan Mat (Germany). <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar геохронологические исследования выполнены по амфиболам методом ступенчатого прогрева по методике [Yudin et al., 2021].

U-Pb изотопно-геохронологические исследования цирконов выполнены методом LA-SF-ICP-MS на массспектрометре высокого разрешения Element XR (Thermo Fisher Scientific) с эксимерной системой лазерной абляции Analyte Excite (Teledyne Cetac), оснащенной двухкамерной ячейкой HelEx II. Данные о морфологии и внутреннем строении зерен получены по катодолюминесцентным изображениям. Параметры измерения масс-спектрометра оптимизировали для получения максимальной интенсивности сигнала <sup>208</sup>Pb при минимальном значении <sup>248</sup>ThO+/<sup>232</sup>Th+ (менее 2 %), используя стандарт NIST SRM612. Все измерения выполняли по массам <sup>202</sup>Hg, <sup>204</sup>(Pb+Hg), <sup>206</sup>Pb, <sup>207</sup>Pb, <sup>208</sup>Pb,



Рис. 1. Положение района исследований в структурах АССО.

(a) – схема структурно-формационного районирования Восточной Тувы [Rudnev et al., 2015]. 1 – докембрийские террейны (TMM – Тувино-Монгольский массив); 2 – раннепалеозойские образования (TOД – Таннуольская островная дуга); 3 – средне- и позднепалеозойские образования; 4 – раннепалеозойские ареал-плутоны и гранитоидные массивы. (б) – схема геологического строения Каахемского гранитоидного ареала (по [Rudnev et al., 2006], с упрощениями). 1 – рыхлые отложения; 2 – осадочные и терригенные ( $J_{1,2}$ ); 3 – осадочные и вулканогенно-осадочные ( $\mathcal{E}_1$ - $\mathcal{S}_{1,2}$ ); 4 – метаморфические образования Тувино-Монгольского массива ( $\mathcal{R}_3$ - $\mathcal{E}_1$ ); 5 – бреньский граносиенит-гранит-лейкогранитный комплекс ( $\mathcal{D}_1$ ); 6 – сархойский гранодиорит-гранитный комплекс ( $\mathcal{O}_3$ ); 7 – ранне- и позднетаннуольский диорит-тоналит-плагиогранитный комплекс ( $\mathcal{O}_{1,3}$ ]; 8 – перидотиты, пироксениты, габбро, нориты; 9 – тоналит-плагиограниты (V- $\mathcal{E}_1$ ); 10 – основные и ультраосновные магматические образования (V- $\mathcal{E}_1$ ); 11 – разломы; 12 – участок исследований.

Fig. 1. Position of the study area in the CAOB.

(a) – scheme of structural and formational zoning of Eastern Tuva [Rudnev et al., 2015]. *1* – Precambrian terraines (TMM – Tuva-Mongolian massif); *2* – Early Paleosoic geological structures (TO/I – Tannuola island arc); *3* – Middle and Late Paleosoic geological structures; *4* – Early Paleosoic areal-plutones and granitoid massifs. (*6*) – scheme of the geological structure of the Khaahem granitoid area (after [Rudnev et al., 2006], modified). *1* – Quaternary deposits; *2* – sedimentary and terrigenous (J<sub>1-2</sub>); *3* – sedimentary and volcanosedimentary ( $\epsilon_1$ -S<sub>1-2</sub>); *4* – metamorphic of the Tuva-Mongolian massif (R<sub>3</sub>- $\epsilon_1$ ); *5* – Bren' granosienite-granite-leucogranite complex (D<sub>1</sub>); *6* – Sarkhoi granodiorite-granite complex (O<sub>3</sub>); *7* – Early and Late Tannuola diorite-tonalite-plagiogranite complex (O<sub>1-3</sub>); *8* – undivided peridotite-pyroxenite-gabbronorite and gabbro-monzodiorite associations; *9* – tonalite- plagiogranite (V- $\epsilon_1$ ); *10* – mafic and ultramafic deposits (V- $\epsilon_1$ ); *11* – faults; *12* – research site.

<sup>232</sup>Th, <sup>238</sup>U. Съемка проводилась в режиме E-scan. Детектирование сигналов проводилось в режиме счета (counting) для всех изотопов, кроме <sup>238</sup>U и <sup>232</sup>Th (режим triple). Диаметр лазерного луча составлял 35 мкм, частота повторения импульсов - 5 Hz и плотность энергии лазерного излучения – 3 Дж/см<sup>2</sup>. Данные массспектрометрических измерений, в том числе расчет изотопных отношений, 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]. Для цирконов проведена коррекция на нерадиогенный свинец по [Andersen, 2002]. Погрешности единичных анализов (отношения, возраст) приведены на уровне 1о, погрешности вычисленных конкордантных возрастов и пересечений с конкордией – на уровне 2о. Диаграмма с конкордиями построена с использованием программы Isoplot [Ludwig, 2003].

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ 3.1. Геологическая характеристика даек

Каахемский магматический ареал (более 30000 км<sup>2</sup>) сложен габброидными и гранитоидными комплексами (рис. 1, б) при доминировании последних. Наиболее широко представлены образования таннуольского нерасчлененного (480–450 млн лет), а также сархойского (450 млн лет) комплекса, формировавшихся на аккреционно-коллизионной стадии.

Восточная часть Каахемского ареала, являющаяся объектом исследования в данной статье, расположена в зоне сочленения венд-раннекембрийских вулканогенно-осадочных отложений Таннуольской островной дуги и докембрийских комплексов Тувино-Монгольского массива. Среди гранитоидов таннуольского



## Рис. 2. Рои мафических даек.

(*a*, *б*) – габброидные дайки, секущие плагиогранитоиды таннуольского комплекса (476±4 млн лет); (*в*) – хрупкопластично деформированные включения базитов в гранитоидах таннуольского комплекса; (*г*) – структурная диаграмма залегания даек (нижняя полусфера, равноугольная проекция).

### Fig. 2. Cluster of mafic dikes.

(a, 6) – gabbro dikes with secant contacts in Tannuola plagiogranitoide complex (476±4 Ma); (a) – gabbro-granite structures in host rock; (a) – structural diagram of dikes (lower hemisphere, equal-angle projection).

комплекса выделяются три диорит-тоналит-плагиогранитных ассоциации (489±5, 476±4 и 450±4 млн лет) с очень пестрым составом – от биотит-амфиболовых кварцевых диоритов до плагиогранитов. Размеры и формы интрузивных тел, сложенных данными ассоциациями, крайне затруднительно проследить и выделить из-за плохой обнаженности региона и наложенных деформаций. В гранитоидах часто встречаются тела основных пород размером от первых сантиметров до десятков квадратных метров. Наложенные хрупкопластичные деформации формируют гнейсовидность в гранитоидах и обуславливают закономерную ориентировку базитовых фрагментов [Karmysheva et al., 2022].

В среднем течении р. Каа-Хем выделяется комплекс основных даек с выдержанным северо-восточным простиранием (рис. 2, г). Выходы даек прослеживаются на территории протяженностью около 10 км, мощность даек составляет 1.5–3.0 м, контакты с вмещающими породами четкие секущие (рис. 2, а, б). Вмещающие породы представлены гранитоидами таннуольского комплекса, насыщенными включениями основного состава (рис. 2, б, в). Гранитоиды вмещающих пород относятся к диорит-тоналит-плагиогранитной ассоциации таннуольского комплекса с оценкой возраста 476 ±4 млн лет [Rudnev et al., 2023].

Комбинированные дайки наблюдаются на протяжении нескольких километров в районе слияния рек Кызыл-Хем и Балыктыг-Хем, где они прорывают более древние (489±5 млн лет) разгнейсованные диорит-тоналит-плагиограниты таннуольского комплекса с отдельными горизонтами и ксенолитами основных пород, преобразованных до амфиболитов (рис. 3, а, б). Дайки расположены на расстоянии 100–200 м друг от друга, имеют мощность 3–5 м. Мафические породы слагают осевые части, гранитоиды составляют до 40 % общего объема и занимают преимущественно краевые части даек (рис. 3, в). Диориты формируют крупные (до 2 м) и более мелкие (до нескольких сантиметров) округлые тела в более кремнекислых породах.



Рис. 3. Внутреннее строение и контакты с вмещающими породами минглинг даек.

(*a*) – интенсивно деформированные вмещающие породы таннуольского комплекса (489±5 млн лет); (*б*, *в*) – минглинг дайки, секущие плагиогранитоиды таннуольского комплекса, пунктирная линия – гнейсовидность вмещающих пород; (*г*) – взаимоотношения гранитов и диоритов минглинг даек.

Fig. 3. Internal structure of mingling dikes and contacts with host rock.

(*a*) – intensely deformed Tannuola complex rocks (489±5 Ma); (*6*, *b*) – mingling dikes with secant contacts in Tannuola plagiogranitoide complex, dotted line – foliation in host rock; (*z*) – relationship between granite and diorite in mingling dike.

Крупные нодули базитов пронизаны сетью гранитных жил мощностью до 5 см (рис. 3, г). Контакты между мафическими и салическими породами преимущественно фестончатые и пламевидные.

# 3.2. Петрографическая характеристика пород даек

**Мафические дайки.** По минеральному составу породы отвечают умереннощелочным высококалиевым роговообманковым мезогаббро (Pl – 45 %, Hbl – 40 %, CPx – 5 %, Bt – 10 %), среди акцессорных минералов наи-

более распространены магнетит, апатит, сфен. Структура пород варьируется от равномерно-мелкозернистой до мелкозернистой порфировидной (вкрапленники Pl и CPx), агрегаты клинопироксена частично или полностью замещены амфиболом (рис. 4, а, б).

**Минглинг дайки.** Гранитоиды даек представлены нормально-щелочными двуполевошпатовыми гранитами (Qtz – 35 %; Pl – 30–35 %, Kfs – 30–35 %, Bt+Hbl – 1 %) и плагиогранитами (Qtz – 30–40 %; Pl – 40–55 %, Kfs – 10–15 %, Bt+Hbl – 1–5 %), из акцессорных минералов встречается апатит. Вторым компонентом минглинг



### Рис. 4. Микрофотографии пород основных (а, б) и минглинг даек (в-е).

(*a*) – роговообманковое мезогаббро равномерно-зернистое; (*б*) – роговообманковое мезогаббро порфировидное; (*в*) – волнистый контакт гранитов и диоритов. Порфировидная структура диоритов обусловлена гломероскоплениями темноцветных минералов; (*г*) – фестончатые контакты диоритов и гранитов. Изолированные фрагменты диоритов в гранитах; (*д*) – ассимиляция нодуля диоритов гранитами вблизи контакта пород; (*е*) – ксенокрист плагиоклаза в диорите.

**Fig. 4.** Microphotographs of the mafic dikes' (a, b) and mingling dikes' rocks (b-e).

(*a*) – Hbl mesogabbro with equigranular structures; (*b*) – Hbl mesogabbro with porphyritic structures; (*b*) – wavy contact of granite and diorite. The porphyritic structure of diorite is caused by clots of dark-colored minerals; (*b*) – scalloped contacts of diorite and granite. Isolated fragments of diorites in granite; (*b*) – assimilation of a diorite nodule by granite near the rock contact; (*b*) – plagioclase xenocryst in diorite.

даек являются умереннощелочные роговообманковые диориты (Pl – 50 %, Hbl+Bt – 45 %, Qtz – 5 %). Акцессорные минералы представлены игольчатым апатитом и крупными бесформенными агрегатами сфена. За счет гломероскоплений амфибола и биотита диориты имеют порфировидный облик (рис. 4, в). В приконтактовых частях в диоритах присутствуют крупные ксенокристы плагиоклаза, захваченные из салической магмы, а в гранитоидах – диоритовые нодули и ксенокристы роговой обманки (рис. 4, г, д, е).

# 3.3. Результаты изотопно-геохронологических исследований

Для определения возраста минглинг даек были проведены U-Pb изотопно-геохронологические исследования цирконов из двуполевошпатовых гранитов



**Рис. 5.** Диаграммы с конкордиями и катодолюминесцентное изображение цирконов с точками измерений и возрастом (Pb<sup>206</sup>/U<sup>238</sup>). (*a*) – плагиограниты минглинг дайки (K 471); (*б*) – габбро мафической дайки (K 497-1). **Fig. 5.** Cathodoluminescence image of zircons with measurement points and age (<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U) and a diagram with concordia. (*a*) – pla-giogranite of mingling dike (K 471); (*б*) – gabbro of dike (K 497-1).



**Рис. 6.** Результаты изотопно-геохронологического Ar-Ar датирования амфибола из габбро мафических даек (К 497-1). **Fig. 6.** <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar age spectra obtained for amphibole from gabbro of mafic dikes (К 497-1).

(проба К 471). Для основных даек были проведены исследования цирконов (U-Pb метод) и амфиболов (Ar–Ar метод) из роговообманковых мезогаббро (проба К 497-1).

Проба К 471 отобрана из плагиогранитов центральной части минглинг дайки, включения базитов в пробе отсутствуют. Монофракция циркона представлена полупрозрачными и прозрачными желтоватыми идиоморфными призматическими кристаллами с четкими ребрами и ровной поверхностью граней. Размер зерен варьируется в диапазоне 150-200 мкм по удлинению и 70-100 мкм по ширине. В режиме катодолюминесценции (CL) исследуемые цирконы характеризуются достаточно широкой осцилляторной магматической зональностью (рис. 5, а). Аналитические исследования (Прил. 1, табл. 1.1) проводились по 24 кристаллам циркона (25 локальных точек). Конкордантное значение возраста (по отношению <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U), полученное по 25 локальным точкам магматического циркона, составляет 477±3 млн лет (СКВО=0.47).

Проба К 497-1 отобрана из центральной части мафической дайки мощностью около 3 м. U-Pb методом было исследовано пять полупрозрачных бледножелтых зерен цирконов, характеризующихся идиоморфным длинно- и короткопризматическим обликом. Три кристалла характеризуются четкими ребрами и ровной поверхностью граней, у двух отмечается сглаженный облик. Размер всех зерен – 100–150 мкм по удлинению и 30-50 мкм по ширине. В режиме катодолюминесценции (CL) исследуемые цирконы характеризуются тонкой осцилляторной магматической зональностью (рис. 5, б). Аналитические исследования (Прил. 1, табл. 1.1) проведены по шести локальным точкам магматического циркона в центральной и краевой части. На диаграмме с конкордией отчетливо выделяются две группы с возрастными оценками 454 ±10 млн лет (СКВО=0.0016) и 1857±17 млн лет (СКВО= =0.055) (рис. 5, б). Более древние значения возраста получены по цирконам с неявно выраженными кристаллографическими формами, что в целом указывает на их ксеногенную природу.

Ar-Ar методом для амфибола из габбро получен спектр, в котором наблюдается относительно низкотемпературная лестница и выделяется плато (рис. 6; Прил. 1, табл. 1.2), характеризующееся значением возраста 450±6.3 млн лет, Са/К отношение составляет 10.9–25.9. Для низкотемпературной ступенчатой части фиксируются пониженные значения Са/К отношений – 0.8–11.3.

#### 3.4. ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ

Содержания петрогенных и редких элементов приведены в Прил. 1, табл. 1.3, 1.4.

Базиты мафических и минглинг даек имеют идентичные вариации в содержаниях кремнезема и щелочей, на TAS диаграмме точки составов преимущественно занимают поля габбро и габбро-диоритов (рис. 7, а). Породы обеих групп относятся к известково-щелочной серии (рис. 7, б) и имеют натровую специализацию щелочей (Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O составляет 3.24 и 2.68 в мафических и минглинг дайках соответственно).

Содержания петрогенных оксидов в габбро из простых даек и диоритах минглинг даек аналогичны. Отмечаются относительно высокие содержания  $\text{TiO}_2$  и  $P_2O_5$  (рис. 8). Уменьшение содержаний MgO сопровождается увеличением концентраций SiO<sub>2</sub> и уменьшением CaO. Концентрации щелочей, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при этом сохраняются на одном уровне.

Мафические породы обеих групп пород обладают идентичными фракционированными спектрами распределения РЗЭ без выраженных европиевых аномалий (рис. 9, а, в). Габбро даек характеризуются отношениями (La/Yb)<sub>N</sub>=5.9–10.0, (Gd/Yb)<sub>N</sub>=1.7–1.9, Eu/Eu\*= =0.84-0.90, для диоритов минглинг даек характерны (La/Yb)<sub>N</sub>=5.5–10.0, (Gd/Yb)<sub>N</sub>=1.6–2.2, Eu/Eu\*=0.93–0.97. На мультиэлементных диаграммах наблюдаются отрицательные Ta–Nb и Hf аномалии и обогащение LILE (K, Rb, Sr, Ba) (рис. 9, б, г).



Рис. 7. Классификационные диаграммы для пород мафических и минглинг даек.

(*a*) – [Middlemost, 1994]; (*б*) – [Peccerillo, Taylor, 1976]. *1* – гранитоиды минглинг даек; *2* – диориты минглинг даек; *3* – диориты габбро даек; *4* – плагиогранитоиды таннуольского комплекса (нерасчлененные) [Rudney, 2013]; *5* – гранитоиды сархойского комплекса [Rudney, 2013].

Fig. 7. Classification diagrams for rocks of mafic and mingling dikes.

(*a*) – [Middlemost, 1994]; (*b*) – [Peccerillo, Taylor, 1976]. *1* – granitoid of mingling dikes; *2* – diorite of mingling dikes; *3* – diorite gabbro of dikes; *4* – plagiogranite of Tannuola complex (undivided) [Rudney, 2013]; *5* – granitoid of Sarkhoi complex [Rudney, 2013].



Рис. 8. Вариационные диаграммы для пород мафических и минглинг даек.

1 – гранитоиды минглинг даек; 2 – диориты минглинг даек; 3 – габбро даек; 4 – плагиогранитоиды таннуольского комплекса (нерасчлененные) [Rudnev, 2013]; 5 – гранитоиды сархойского комплекса [Rudnev, 2013].

Fig. 8. Binary diagrams for rock of mafic and mingling dikes.

1 – granitoid of mingling dikes; 2 – diorite of mingling dikes; 3 – gabbro of dikes; 4 – plagiogranite of Tannuola complex (undivided) [Rudnev, 2013]; 5 – granitoid of Sarkhoi complex [Rudnev, 2013].

**Гранитоиды минглинг даек.** Имеющиеся петрохимические данные коррелируют с петрографическими наблюдениями: относительно плагиогранитов двуполевошпатовые граниты обладают более высокими содержаниями  $K_2O$  и SiO<sub>2</sub>, а также пониженными концентрациями TiO<sub>2</sub>,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3^{-T}$ , MgO и CaO. Тем не менее породы обеих групп относятся к нормально-щелочным (см. рис. 7, а) слабопералюминиевым (A/CNK=1.00–1.12; рис. 10, а) и магнезиальным (Fe#= =0.60–0.74; рис. 10, б) гранитоидам. Спектры РЗЭ гранитов и плагиогранитов даек характеризуются преобладанием легких лантаноидов над тяжелыми  $((La/Yb)_N = 9.8 - 18.6; (Gd/Yb)_N = 1.4 - 2.0)$  и слабо проявленными отрицательными европиевыми аномалиями (Eu\*=0.74–0.91; см. рис. 9, д). На мультиэлементных спектрах (см. рис. 9, е) фиксируется обогащение LILE и деплетирование высокозарядными элементами (Nb, Ta, Ti).



**Рис. 9.** Спектры распределения РЗЭ (*a*, *b*, *d*) и мультиэлементные диаграммы (*б*, *z*, *e*) пород даек [Sun, McDonough, 1989]. *1* – гранитоиды минглинг даек; *2* – диориты минглинг даек; *3* – габбро даек; *4* – плагиогранитоиды таннуольского комплекса (нерасчлененные) [Rudnev, 2013]; *5* – гранитоиды сархойского комплекса [Rudnev, 2013]. **Fig. 9.** Chondrite-normalized REE patterns (*a*, *b*, *d*) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (*b*, *z*, *e*) [Sun, McDonough, 1989].

1 – granitoid of mingling dikes; 2 – diorite of mingling dikes; 3 – gabbro of dikes; 4 – plagiogranite of Tannuola complex (undivided) [Rudney, 2013]; 5 – granitoid of Sarkhoi complex [Rudney, 2013].



Рис. 10. Классификационные диаграммы для гранитов минглинг даек.

(*a*) – I-S линия [Chappell, White, 2001]; (*b*) – [Frost et al., 2001]; (*b*) – [Whalen et al., 1987]. FG – фракционированные граниты, OGT – нефракционированные граниты М-, I- и S-типа; (*a*) – [Frost et al., 2001]. *1* – гранитоиды минглинг даек, *2* – плагиогранитоиды таннуольского комплекса (нерасчлененные) [Rudney, 2013], *3* – гранитоиды сархойского комплекса [Rudney, 2013].

Fig. 10. Classification diagrams for granite of mingling dikes.

(*a*) – I-S line [Chappell, White, 2001]; (*b*) – [Frost et al., 2001]; (*b*) – [Whalen et al., 1987]. FG – fractionated granite, OGT – unfractionated M-, I- and S-types granite; (*z*) – [Frost et al., 2001]. *1* – granitoid of mingling dikes, *2* – plagiogranite of Tannuola complex (undivided) [Rudney, 2013], *3* – granitoid of Sarkhoi complex [Rudney, 2013].

### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

### 4.1. Петрогенезис мафических пород даек

Образцы основных и средних пород даек характеризуются относительно низкими Mg# и содержаниями CaO, что предполагает происхождение обеих групп пород из магм с ранним фракционированием оливина и пироксена. Ранняя кристаллизация плагиоклаза маловероятна, так как породы обладают высокими содержаниями  $Al_2O_3$  и отсутствием значительных отрицательных европиевых аномалий (см. рис. 9, а, в). Петрографические характеристики мафических пород даек (широкое распространение первичного Amp (в диоритах Bt и Amp)) указывают на их кристаллизацию из магм, обогащенных H<sub>2</sub>O.

Для всех пород характерны фракционированные спектры распределения РЗЭ с обогащением легкими лантаноидами, для мультиэлементных спектров (см. рис. 9, 6, г) типично наличие субдукционной компоненты: обогащение LILE, а также обеднение HFSE. На диаграммах Ba/Yb-Ta/Yb и Th/Yb-Nb/Yb (рис. 11, в, г) фигуративные точки составов лежат выше поля мантийной последовательности, что также указывает на вовлечение субдукционно-модифицированного компонента в мантийный источник. Уровень содержания высокозарядных элементов, в том числе Nb, в мафических породах даек варьируется, однако большинство сопоставимы с группой Nb-обогащенных базальтов (рис. 11, а). Другие петрогеохимические характеристики пород также отличаются от значений для типичных субдукционных базальтов (обогащение Na<sub>2</sub>O, высокие содержания Zr (среднее значение (Xcp)=218.9 и 212.4 г/т), TiO<sub>2</sub> (Xcp=1.71 и 1.31 мас. %) и P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Xcp=0.60 и 0.56 мас. %)) [Sajona et al., 1994; Wang et al., 2007; Xu et al., 2002].

Существует два альтернативных источника для магм, обогащенных Nb: 1) OIB-подобный тип [Reagan, Gill, 1989]; 2) перидотиты мантийного клина, испытавшие изменения при взаимодействии с расплавами адакитового состава [Bourdon et al., 2002; Defant, Kepezhinskas, 2001; Jing et al., 2022; Wang et al., 2007, 2009; Wyman et al., 2000]. Первый сценарий маловероятен, поскольку геохимические характеристики базитов даек контрастно отличны от OIB базальтов. Во втором случае изначально деплетированный магматический источник (перидотиты мантийного клина) подвергается метасоматическим преобразованиям со стороны как флюида, так и расплавов, образующихся при плавлении слэба [Class et al., 2000; Kelemen et al., 2007].

Согласно экспериментальным данным [Perugini et al., 2008; McLeod et al., 2011], в смешанных магматических

системах возможно обогащение базитовых магм HFSE и Th. Дополнительный прогрев гранитоидной магмы и повышение фугитивности кислорода в базитовой магме в процессе смешения способны приводить к перераспределению данных элементов за счет избирательной кристаллизации апатита и сфена в магме основного состава. Протекание данных процессов возможно при смешении контрастных магм в дайковых условиях [Yakovlev et al., 2024]. Но данная модель не объясняет аналогичные содержания HFSE в мафических дайках. Формирование минглинг даек предполагает активное корово-мантийное взаимодействие, когда состав и



**Рис. 11.** Классификационные диаграммы для основных и средних пород даек. (*a*) – [Kepezhinskas et al., 1996]; (*b*) – поля пород вулканических дуг и NEB по [Defant et al., 1992]; (*b*) – [Pearce, 2008]; (*c*) – [Pearce, 2008]; (*d*) – [Cui et al., 2021]; (*e*) – [Wang et al., 2007]; (*ж*, *з*) – вариационные диаграммы. *1* – диориты минглинг даек; *2* – габбро мафических даек.

Fig. 11. Classification diagrams for mafic and intermediate dike rocks.

(a) – [Kepezhinskas et al., 1996]; (b) – rock fields of volcanic arcs and NEB (Nb-enriched basalts) according to [Defant et al., 1992]; (e) – [Pearce, 2008]; (e) – [Pearce, 2008]; (e) – [Cui et al., 2021]; (e) – [Wang et al., 2007]; (x, s) – binary diagrams. 1 – diorite of mingling dikes; 2 – gabbro of mafic dikes.



**Рис. 12.** Классификационные диаграммы для основных и средних пород даек [Hofmann et al., 1986]. *1* – диориты минглинг даек; *2* – габбро мафических даек.

**Fig. 12.** Classification diagrams for mafic and intermediate dike rocks [Hofmann et al., 1986]. *1* – diorite of mingling dikes; *2* – gabbro of mafic dikes.

физическое состояние сосуществующих магм играют определяющую роль в их возможной гибридизации.

Контактовые взаимоотношения диоритов и гранитоидов минглинг даек типичны для композитных систем, сформированных сосуществующими жидкостями с вязкостным и плотностным контрастом [Furman, Spera, 1985; Allen, Boger, 1988]. Присутствие гломероскоплений темноцветных минералов, игольчатого апатита и ксеноморфного сфена в диоритах является следствием относительно быстрой кристаллизации мафической магмы, протекавшей за счет взаимодействия с более «холодным» и кремнекислым расплавом [Hibbard, 1991; Ubide et al., 2014]. Зоны переходного состава на контакте контрастных пород отсутствуют, что указывает на непродолжительное время сосуществования магм и типично для композитных систем, формирующихся в дайковых условиях [Barbarin, 2005; Vladimirov et al., 2019]. В то же время наблюдение в контактовых зонах ксенокристаллов полевого шпата в диоритах, а также изолированных фрагментов диоритов и ксенокристаллов амфибола в гранитах указывает на то, что смешение контрастных магм сопровождалось взаимным твердофазным переносом в ограниченном объеме приконтактовых зон [Ubide et al., 2014].

Таким образом, петрографические наблюдения указывают на значительный вязкостной и температурный контраст сосуществующих магм, ограничивавший их смесимость. Иными словами, процессы гибридизации не оказали существенного влияния на конечные составы пород минглинг даек.

Зафиксированные ксеногенные зерна циркона (1857 ±17 млн лет) в мафических дайках косвенно указывают на возможную ассимиляцию корового материала при образовании пород. В то же время слабо проявленные Zr-Hf отрицательные аномалии при глубоких Ta-Nb минимумах на мультиэлементных спектрах (см. рис. 9, б, г), а также горизонтальные тренды на диаграммах La/Sm – SiO<sub>2</sub> и Nb/U – SiO<sub>2</sub> (рис. 12, а, б) в породах мафических и минглинг даек указывают на отсутствие значительного вклада процессов контаминации в состав пород [Hofmann, 2007; Rudnick, Gao, 2003].

На диаграммах Rb/Y – Nb/Y и Ba/La – Th/Yb (см. рис. 11, д, е) составы диоритов и габбродаек отвечают тренду обогащения деплетированного источника за счет взаимодействия с расплавом. Положительные корреляции между содержаниями Y и Yb относительно Nb (см. рис. 11, ж, з) предполагают обедненность метасоматизирующего агента данными элементами и соответствуют модели взаимодействия надсубдукционной мантии с адакитовыми расплавами [Wang et al., 2009].

На рубеже ~450 млн лет в восточной части Каахемского ареала, наряду с формированием комплекса базитовых даек, произошло внедрение и становление Шуйского и Майского габброидных массивов. В геохимическом плане для них также характерно наличие субдукционной компоненты (деплетирование HFSE, обогащение LILE). Изотопные данные (Sm-Nd, вал) указывают на незначительный вклад корового либо обогащенного мантийного источника [Mongush, Sugorakova, 2013].

Поскольку составы мафических пород базитовых и минглинг даек идентичны, а также близки к составам Майского и Шуйского габброидных массивов, зафиксированный перерыв в магматической активности от раннего до позднего ордовика можно интерпретировать как следствие пульсационного плавления источника с идентичными характеристиками. При этом условия магмогенерации были близки для каждого эпизода плавления.

### 4.2. Петрогенезис гранитов минглинг даек

Период 480–450 млн лет в пределах Каахемского ареала характеризуется становлением таннуольского диорит-тоналит-плагиогранитного и сархойского гранодиорит-граносиенит-гранитного комплексов. Породы, относимые к таннуольскому комплексу, являются более ранними [Rudney, 2013; Rudney et al., 2023; Kozakov et al., 1998], и их формирование по результатам геохронологических и Sr–Nd изотопных исследований [Kozakov et al., 1998, 2003; Rudnev et al., 2006, 2023] происходило за счет частичного плавления метабазитового субстрата при незначительном участии более древнего корового материала.

Породы сархойского комплекса являются более поздними, время их формирования относится к рубежу 450 млн лет [Rudnev et al., 2006; Kozakov et al., 2003]. Их формирование связывается с плавлением древнего корового источника при подчиненном участии метабазитовых субстратов [Rudnev et al., 2006, 2015, 2020; Rudnev, 2013].

Полученные значения U-Pb возраста цирконов из плагиогранитов минглинг даек (477±3 млн лет) говорят об их образовании синхронно с породами таннуольского комплекса. В то же время по содержанию редких и петрогенных элементов плагиограниты тяготеют к ассоциациям таннуольского комплекса, а граниты – к породам сархойского комплекса (см. рис. 8, 10). Имеющиеся немногочисленные анализы из гранитоидов минглинг даек не позволяют достоверно охарактеризовать состав субстрата и условия плавления, однако их вариации по составу указывают на смешанные источники и более значительный вклад корового вещества в процессы плавления, чем для гранитоидов таннуольского комплекса. Неоднородный состав вмещающих дайки гранитоидных ассоциаций также свидетельствует об отсутствии единой гомогенной магматической камеры и однородного протолита для образования гранитов в данном регионе в раннепалеозойский период.

### 4.3. Тектонические аспекты формирования дайковых комплексов

Линейно расположенные рои даек являются индикаторами тектонических этапов растяжения, связанных с разными геодинамическими обстановками. По геологическим наблюдениям структурно-вещественные комплексы восточной части Каахемского ареала обладают признаками полистадийного деформирования: 1) магматические ассоциации, вмещающие дайковые комплексы, деформированы до гнейсогранитов, амфиболитов и магматических брекчий; 2) разнонаправленная ориентировка базитовых и минглинг даек и полосчатости во вмещающих породах указывает на внедрение даек на более поздних деформационных стадиях.

На настоящий момент можно оценить только относительный возрастной интервал деформационных событий. К наиболее ранним относятся деформации, наложенные на диорит-тоналит-плагиогранитные ассоциации (489±5 млн лет) (см. рис. 2, а, б), наблюдаемые выше слияния рек Кызыл-Хем и Балыктыг-Хем. Так как возраст секущих их минглинг даек составляет 477 млн лет, можно говорить о деформационном событии на границе кембрия и ордовика, в самих минглинг дайках деформаций не наблюдается. Резкие секущие контакты с вмещающими породами свидетельствуют о их внедрении синхронно с хрупкими деформациями.

Следующий этап тектонической активности относится к периоду 477–450 млн лет, когда были деформированы габбро и граниты в верхнем течении р. Каа-Хем (см. рис. 2, в). Характер изменений свидетельствует о кратковременных хрупкопластичных деформациях, наложенных на габброиды и на гранитоиды с возрастом 476±4 млн лет [Karmysheva et al., 2022]. Становление комплекса габброидных даек (450 млн лет) с закономерной ориентировкой указывает на существование зон локального растяжения на завершающей стадии коллизионного этапа развития ареала.

Формирование надсубдукционного источника для габбро и диоритов за счет появления адакитовых магм при плавлении молодой субдуцирующей океанической плиты [Zhang et al., 2021] ограничено окончанием островодужного этапа (520 млн лет) [Rudnev et al., 2006; Sugorakova, Khertek, 2017]. Мафические породы минглинг даек (480 млн лет) и даек мезогаббро (450 млн лет) формировались соответственно спустя 40 и 70 млн лет после окончания субдукционных процессов. Данное наблюдение указывает на пульсационный характер дайкообразования, связанный с неоднократным плавлением единого мантийного источника и кратковременной активизацией постоянно проявляющихся тектонических деформаций.

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изотопно-геохронологические и петрологические исследования, проведенные для пород мафических и минглинг даек восточной части Каахемского магматического ареала, позволили сделать следующие выводы.

На аккреционно-коллизионном этапе зафиксировано два возрастных рубежа дайкообразования: 480 и 450 млн лет. На первом рубеже формировались диорит-гранитные минглинг дайки, на втором – габброидные дайки. Вмещающими породами даек являются разновозрастные (489±5 млн лет, 476±4 млн лет), сложные по составу и сильно деформированные диорит-тоналит-плагиогранитные ассоциации таннуольского комплекса.

Мафические породы минглинг и простых даек явлются продуктами неоднократного плавления единого деплетированного надсубдукционного источника, формировавшегося на субдукционном (островодужном) этапе за счет метасоматического преобразования пород мантийного клина адакитовыми расплавами.

Становление даек связано с проявлениями многочисленных кратковременных тектонических импульсов, характерных для развития Каахемского ареала.

### 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают благодарность А.М. Сугораковой за совместные полевые работы и обсуждение исследований, Ю.В. Бутанаеву (ТИКОПР СО РАН, Кызыл) за помощь при проведении экспедиционных работ и Н.Г. Кармановой, И.В. Николаевой, А.Н. Торянику, А.Т. Титову (ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН, г. Новосибирск) за помощь в аналитических исследованиях.

## 7. 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.

### 8. 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.

### 9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Allen E., Boger D., 1988. The Influence of Rheological Properties on Mobility Control in Polymer-Augmented Waterflooding. In: Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition (October 2–5, 1988, Houston, Texas). Society of Petroleum Engineers, SPE-18097-MS. https:// doi.org/10.2118/18097-ms.

Andersen T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That Do Not Report <sup>204</sup>Pb. Chemical Geology 192 (1–2), 59–79. https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02) 00195-X.

Barbarin B., 2005. Mafic Magmatic Enclaves and Mafic Rocks Associated with Some Granitoids of the Central Sierra Nevada Batholith, California: Nature, Origin, and Relations with the Hosts. Lithos 80 (1–4), 155–177. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.05.010.

Bourdon E., Eissen J.-P., Monzier M., Robin C., Martin H., Cotten J., Hall M.L., 2002. Adakite-Like Lavas from Antisana Volcano (Ecuador): Evidence for Slab Melt Metasomatism beneath Andean Northern Volcanic Zone. Journal of Petrology 43 (2), 199–217. https://doi.org/10.1093/petrology/ 43.2.199.

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.

Class C., Miller D.M., Goldstein S.L., Langmuir C.H., 2000. Distinguishing Melt and fluid Subduction Components in Umnak Volcanics, Aleutian Arc. Geochemistry, Geophysics, Geosystems 1 (6), 1004. https://doi.org/10.1029/1999GC 000010.

Cui X., Sun M., Zhao G., Zhang Y., 2021. Origin of Permian Mafic Intrusions in Southern Chinese Altai, Central Asian Orogenic Belt: A Post-Collisional Extension System Triggered by Slab Break-Off. Lithos 390–391, 106112. https:// doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106112.

Defant M.J., Jackson T.E., Drummond M.S., De Boer J.Z., Bellon H., Feigenson M.D., Maury R.S., Stewart R.H., 1992. The Geochemistry of Young Volcanism throughout Western Panama and Southeastern Costa Rica: An Overview. Journal of the Geological Society 149 (4), 569–579. https://doi. org/10.1144/gsjgs.149.4.0569.

Defant M.J., Kepezhinskas P., 2001. Adakites: A Review of Slab Melting over the Past Decade and the Case for a Slab-Melt Component in Arcs. Eos Transactions American Geophysical Union 82, 68–69.

Ernst R.E., 2014. Large Igneous Provinces. Cambridge University Press, London, 653 p. https://doi.org/10.1017/CB09781139025300.

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/PETROLOGY/42.11.2033.

Furman T., Spera F.J., 1985. Co-Mingling of Acid and Basic Magma with Implications for the Origin of Mafic I-Type Xenoliths: Field and Petrochemical Relations of an Unusual Dike Complex at Eagle Lake, Sequoia National Park, California, U.S.A. Journal of Volcanology and Geothermal Research 24 (1–2), 151–178. https://doi.org/10.1016/0377-0273(85) 90031-9.

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Mazukabzov A.M., Stanevich A.M., Sklyarov E.V., Ponomarchuk V.A., 2007. Signature of Precambrian Extension Events in the Southern Siberian Craton. Russian Geology and Geophysics 48 (1), 17–31. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2006.12.001.

Griffin W.L., Powell W.J., Pearson N.J., O'Reilly S.Y., 2008. GLITTER: Data Reduction Software for Laser Ablation ICP-MS. 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, p. 308–311.

Hibbard M.J., 1991. Textural Anatomy of Twelve Magma-Mixed Granitoid Systems. In: J. Didier, B. Barbarin (Eds), Enclaves and Granite Petrology. Elsevier, Amsterdam, p. 431–444.

Hofmann A.W., 2007. Sampling Mantle Heterogeneity through Oceanic Basalts: Isotopes and Trace Elements. Treatise on Geochemistry 2, 1–44. https://doi.org/10.10 16/B0-08-043751-6/02123-X.

Hofmann A.W., Jochum K.P., Seufert M., White W.M., 1986. Nb and Pb in Oceanic Basalts: New Constraints on Mantle Evolution. Earth and Planetary Science Letters 79 (1–2), 33–45. https://doi.org/10.1016/0012-821X(86)9 0038-5.

Jing Y, Ge W, Santosh M, Dong Y, Yang H, Ji Z, Bi J, Zhou H, Xing D., 2022. Generation of Nb-Enriched Mafic Rocks and Associated Adakitic Rocks from the Southeastern Central Asian Orogenic Belt: Evidence of Crust-Mantle Interaction. Geoscience Frontiers 13 (2), 101341. https://doi.org/10. 1016/j.gsf.2021.101341.

Karmysheva I.V., Yakovlev V.A., Rudnev S.N., Semenova D.V., Sugorakova A.M., 2022. Paleozoic Contrast Magmatism of the Eastern Part of the Kaakhem Magmatic Area (Eastern Tuva). In: Geodynamic Evolution of the Lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from Ocean to Continent). Proceedings of Scientific Meeting (October 18–21, 2022). Iss. 20. IEC SB RAS, Irkutsk, p. 124–125 (in Russian) [Кармышева И.В., Яковлев В.А., Руднев С.Н., Семенова Д.В., Сугоракова А.М. Палеозойский контрастный магматизм восточной части Каахемского магматического ареала (Восточная Тува) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научного совещания (18–21 октября 2022 г.). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2022. Вып. 20. С. 124–125].

Kelemen P.B., Hanghøj K., Greene A.R., 2007. One View of the Geochemistry of Subduction-Related Magmatic Arcs, with an Emphasis on Primitive Andesite and Lower Crust. Treatise on Geochemistry 3, 1–70. https://doi.org/10.10 16/B0-08-043751-6/03035-8.

Kepezhinskas P., Defant M.J., Drummond M.S., 1996. Progressive Enrichment of Island Arc Mantle by Melt-Peridotite Interaction Inferred from Kamchatka Xenoliths. Geochimica et Cosmochimica Acta 60 (7), 1217–1229. https:// doi.org/10.1016/0016-7037(96)00001-4.

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.

Kozakov I.K., Sal'nikova E.B., Kotov A.B., Kovalenko V.I., Lebedev V.I., Sugorakova A.M., Yakovleva S.Z., 1998. The Age of Postcollisional Magmatism in the Early Caledonides of Central Asia, with the Tuva Region as an Example. Doklady Earth Sciences 360 (4), 510–513.

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

McLeod G.W., Dempster T.J., Faithfull J.W., 2011. Deciphering Magma-Mixing Processes Using Zoned Titanite from the Ross of Mull Granite, Scotland. Journal of Petrology 52 (1), 55–82. https://doi.org/10.1093/petrology/egq071.

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)9 0029-9.

Mongush A.A., Sugorakova A.M., 2013. Age and Magma Sources of the Post-Collisional Gabbroids of the Kaakhem Magmatic Area, Eastern Tuva: First <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar and Sm-Nd Data. Geochemistry International 51, 939–943. https:// doi.org/10.1134/S0016702913110049.

Morozov Y.A., Galybin A.N., Mukhamediev S.A., Smul'skaya A.I., 2017. Tectonic and Geomechanical Control of Dikes and Sill-Like Bodes: Evidence from the North-Western Part of the Kola Peninsula. Geotectonics 51, 230–258. https:// doi.org/10.1134/S0016852117030074.

Pearce J.A., 2008. Geochemical Fingerprinting of Oceanic Basalts with Applications to Ophiolite Classification and the Search for Archean Oceanic Crust. Lithos 100 (1–4), 14–48. https://doi.org/10.1016/J.LITHOS.2007.06.016.

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.

Perugini D., De Campos C.P., Dingwell D.B., Petrelli M., Poli G., 2008. Trace Element Mobility during Magma Mixing: Preliminary Experimental Results. Chemical Geology 256 (3–4), 146–157. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008. 06.032.

Polyansky O.P., Prokopiev A.V., Koroleva O.V., Tomshin M.D., Reverdatto V.V., Babichev A.V., Sverdlova V.G., Vasiliev D.A., 2018. The Nature of the Heat Source of Mafic Magmatism during the Formation of the Vilyui Raft Based on the Ages of Dike Swarms and Results of Numerical Modeling. Russian Geology and Geophysics 59 (10), 1217–1236. https://doi. org/10.1016/j.rgg.2018.09.003.

Reagan M.K., Gill J.B., 1989. Coexisting Calcalkaline and High-Niobium Basalts from Turrialba Volcano, Costa Rica: Implications for Residual Titanates in Arc Magma Sources. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 94 (B4), 4619– 4633. https://doi.org/10.1029/JB094iB04p04619.

Rudnev S.N., 2013. Early Paleozoic Granitoid Magmatism in the Altai-Sayan Folded Area and the Lake Zone in Western Mongolia. SB RAS Publishing House, Novosibirsk, 300 p. (in Russian) [Руднев С.Н. Раннепалеозойский гранитоидный магматизм Алтае-Саянской складчатой области и Озерной зоны Западной Монголии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 300 с.].

Rudnev S.N., Karmysheva I.V., Semenova D.V., Yakovlev V.A., Sugorakova A.M., 2023. Magmatic and Xenogenic Zircons from Granitoids of the Kaa-Khem Batholith as Age Markers of the Crust in the Junction Zone of the Tannu-Ola Island Arc and the Tuva–Mongolian Microcontinent (Eastern Tuva). Russian Geology and Geophysics 64 (7), 763–776. https://doi.org/10.2113/RGG20234527.

Rudnev S.N., Kiseleva V., Serov P.A., 2015. Vendian–Early Paleozoic Granitoid Magmatism in Eastern Tuva. Russian Geology and Geophysics 56 (9), 1232–1255. https://doi. org/10.1016/j.rgg.2015.08.002.

Rudnev S.N., Mal'kovets V.G., Turkina O.M., Semenova D.V., Belousova E.A., 2020. Lu-Hf Isotope Composition of Zircon and Magma Sources of the Vendian–Early Paleozoic Granitoids in Tuva (by the Example of the Kaa-Khem and East Tannu-Ola Batholiths). Russian Geology and Geophysics 61 (10), 1088–1108. https://doi.org/10.15372/RGG20 19132.

Rudnev S.N., Vladimirov A.G., Ponomarchuk V.A., Bibikova E.V., Sergeev S.A., Matukov D.I., Plotkina Yu.V., Bayanova T.B., 2006. Kaakhemsky Polychronous Granitoid Batholith (Eastern Tuva): Composition, Age, Sources and Geodynamic Position. Lithosphere 2, 3–33 (in Russian) [Руднев С.Н., Владимиров А.Г., Пономарчук В.А., Бибикова Е.В., Сергеев С.А., Матуков Д.И., Плоткина Ю.В., Баянова Т.Б. Каахемский полихронный гранитоидный батолит (В. Тува): состав, возрасты, источники и геодинамическая позиция // Литосфера. 2006. № 2. С. 3–33].

Rudnick R.L., Gao S., 2003. Composition of the Continental Crust. Treatise on Geochemistry 3, 1–64. https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03016-4.

Sajona F.G., Bellon H., Maury R.C., Pubellier M., Cotten J., Rangin C., 1994. Magmatic Response to Abrupt Changes in Geodynamic Settings: Pliocene – Quaternary Calc-Alkaline and Nb-Enriched Lavas from Mindanao (Philippines). Tectonophysics 237 (1–2), 47–72. https://doi.org/10.1016/ 0040-1951(94)90158-9.

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.

Sugorakova A.M., Khertek A.K., 2017. The New Data to the Question of the Age of Associations Kaakhem Magmatic Area (Eastern Tuva). Geosphere Research 3, 50–60 (in Russian) [Сугоракова А.М., Хертек А.К. Новые данные к вопросу о возрасте Каахемского магматического ареала (Восточная Тува) // Геосферные исследования. 2017. № 3. С. 50–60]. https://doi.org/10.17223/25 421379/4/7.

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.

Ubide T., Galé C., Larrea P., Arranz E., Lago M., Tierz P., 2014. The Relevance of Crystal Transfer to Magma Mixing: A Case Study in Composite Dykes from the Central Pyrenees. Journal of Petrology 55 (8), 1535–1559. https://doi.org/ 10.1093/petrology/egu033.

Vladimirov V.G., Yakovlev V.A., Karmysheva I.V., 2019. Mechanisms of Magmatic Mingling in Composite Dykes: Models of Dispersion and Shear Dilatation. Geodynamics & Tectonophysics 10 (2), 325–345 (in Russian) [Владимиров В.Г., Яковлев В.А., Кармышева И.В. Механизмы магматического минглинга в композитных дайках: модели диспергирования и сдвиговой дилатации // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 2. С. 325–345]. https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-2-0417.

Wang Q., Wyman D.A., Xu J., Wan Y., Li C., Zi F., Jiang Z., Qiu H., Chu Z., Zhao Z., Dong Y., 2007. Triassic Nb-Enriched Basalts, Magnesian Andesites, and Adakites of the Qiangtang Terrane (Central Tibet): Evidence for Metasomatism by Slab-Derived Melts in the Mantle Wedge. Contributions to Mineralogy and Petrology 155, 473–490. https://doi.org/ 10.1007/s00410-007-0253-1.

Wang Q., Wyman D.A., Zhao Z.-H., Xu J.-F., Bai Z.-H., Xiong X.-L., Dai T.-M., Li C.-F., Chu Z.-Y., 2009. Petrogenesis of Carboniferous Adakites and Nb-Enriched Arc Basalts in the Alataw Area, Northern Tianshan Range (Western China): Implications for Phanerozoic Crustal Growth in the Central Asia Orogenic Belt. Chemical Geology 236 (1–2), 42–64. https://doi.org/10.1016/J.CHEMGE0.2006.08.013.

Whalen J.B., Currie K.L., Chappell B.W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. Contributions to Mineralogy and Petrology 95, 407–419. https://doi.org/10.1007/BF00402202.

Wyman D.A., Ayer J.A., Devaney J.R., 2000. Niobium-Enriched Basalts from the Wabigoon Subprovince, Canada: Evidence for Adakitic Metasomatism above an Archean Subduction Zone. Earth and Planetary Science Letters 179 (1), 21–30. https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)0 0106-0.

Xu J.-F., Shinjo R., Defant M.J., Wang Q., Rapp R.P., 2002. Origin of Mesozoic Adakitic Intrusive Rocks in the Ningzhen Area of East China: Partial Melting of Delaminated Lower Continental Crust? Geology 30 (12), 1111–1114. https:// doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<1111:00MAIR> 2.0.C0;2.

Yakovlev V.A., Karmysheva I.V., Vladimirov V.G., Semenova D.V., 2024. Geological Position, Sources, and Age of Mingling Dikes of the Northwestern Margin of the Tuva– Mongolian Massif in Western Sangilen, Southeastern Tuva. Russian Geology and Geophysics 65 (2), 214–232. https:// doi.org/10.2113/RGG20234589.

Yudin D., Murzintsev N., Travin A., Alifirova T., Zhimulev E., Novikova S., 2021. Studying the Stability of the K/Ar Isotopic System of Phlogopites in Conditions of High T, P: <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar Dating, Laboratory Experiment, Numerical Simulation. Minerals 11 (2), 192. https://doi.org/10.3390/MIN 11020192.

Zhang L., Li S., Zhao Q., 2021. A Review of Research on Adakites. International Geology Review 63 (1), 47–64. https://doi.org/10.1080/00206814.2019.1702592.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1

Образец К 471 (гранит, минглинг дайка)												
Nº	И	Ізотопные о	отношения		DI	Возраст, млн лет						
	Pb <sup>207</sup> /U <sup>235</sup>	1 σ	Pb <sup>206</sup> /U <sup>238</sup>	1 σ	KIIO	Pb <sup>206</sup> /U <sup>238</sup>	1 σ	Pb <sup>207</sup> /U <sup>235</sup>	1σ	D, %		
1	0.59356	2.2	0.076	1.9	0.85	472	17	473	17	0.19		
2	0.60802	2.2	0.07793	1.9	0.88	484	18	482	17	-0.29		
3	0.5882	1.9	0.07561	1.9	0.98	470	17	470	14	-0.04		
4	0.60422	2.2	0.07668	1.9	0.88	476	17	480	17	0.76		
5	0.60448	1.9	0.0777	1.9	0.99	482	17	480	15	-0.48		
6	0.60495	2.1	0.07711	1.9	0.91	479	17	480	16	0.33		
7	0.6074	074 2.6		1.9	0.76	481	18	482	20	0.15		
8	0.60708	2.3	0.07812	1.9	0.82	485	18	482	18	-0.66		
9	0.61016	2.2	0.07829	1.9	0.87	486	18	484	17	-0.45		
10	0.5858	2.4	0.07562	1.9	0.80	470	17	468	18	-0.36		
11	0.60505	1.9	0.07731	1.9	0.96	480	17	480	15	0.08		
12	0.61103	2.3	0.07755	1.9	0.84	482	18	484	18	0.56		
13	0.60409	2.2	0.07757	1.9	0.88	482	18	480	17	-0.37		
14	0.57621	2.1	0.07507	1.9	0.89	467	17	462	16	-0.99		
15	0.58532	2.3	0.07518	1.9	0.82	467	17	468	18	0.13		
16	0.6048	2.0	0.07737	1.9	0.93	480	18	480	16	-0.02		
17	0.5913	1.9	0.0763	1.9	0.97	474	17	472	15	-0.49		
17	0.60865	2.0	0.07715	1.9	0.96	479	17	483	15	0.75		
19	0.6081	2.0	0.07745	1.9	0.96	481	18	482	15	0.31		
20	0.59915	2.4	0.077	1.9	0.81	478	18	477	18	-0.31		
21	0.5835	2.3	0.0753	1.9	0.83	468	17	467	17	-0.28		
22	0.6085	2.1	0.07725	1.9	0.91	480	18	483	16	0.60		
23	0.60703	2.3	0.07724	1.9	0.83	480	18	482	18	0.44		
24	0.58772	2.1	0.07569	1.9	0.90	470	17	469	16	-0.19		
25	0.60936	2.1	0.07811	1.9	0.90	485	18	483	16	-0.33		
			Образе	ец К 497-1 (	габбро, м	афическая дай	ка)					
1	0.56076	0.01408	0.07274	0.00138	0.76	453	8	452	9	-0.15		
2	0.56994	0.01433	0.0733	0.00139	0.75	456	8	458	9	0.44		
3	0.5609	0.01707	0.07295	0.00143	0.64	454	9	452	11	-0.40		

Таблица 1.1. Изотопные U-Pb соотношения в цирконах и результаты определения возраста Table 1.1. U-Pb isotope ratios in zircons and age determination results

	T, °C	t, мин	<sup>40</sup> Аг, нсм <sup>3</sup>	<sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar	±1σ	<sup>38</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar	±1 σ	<sup>37</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar	±1σ	<sup>36</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar	±1 σ	Ca/K	∑ <sup>39</sup> Ar, %	Возраст, млн лет	±1σ
Навеска=55.95 мг, J=0.006048±0.000095*															
	500	10	29.2	16.5	0.044	0.032	0.00180	0.77	0.19	0.0270	0.00263	2.8	2.9	90.7	8.2
	650	10	122.7	36.8	0.029	0.023	0.00075	0.73	0.08	0.0079	0.00077	2.6	8.4	341.5	5.3
	750	10	168.8	41.9	0.026	0.014	0.00057	0.23	0.04	0.00002	0.00057	0.8	15.0	407.6	5.9
	825	10	93.4	43.3	0.044	0.025	0.00085	2.22	0.07	0.0034	0.00102	8.0	18.5	410.6	6.3
	900	10	126.9	47.5	0.035	0.029	0.00092	1.72	0.10	0.0217	0.00073	6.2	22.9	400.0	5.9
	930	10	228.6	46.6	0.019	0.017	0.00031	1.60	0.06	0.0042	0.0004	5.7	31.0	437.3	6.2
	960	10	181.2	47.1	0.027	0.025	0.00057	3.14	0.08	0.0078	0.00059	11.3	37.3	432.2	6.2
	1000	10	578.4	47.7	0.027	0.018	0.00011	7.20	0.02	0.0007	0.00070	25.9	57.2	455.8	6.6
	1030	10	417.5	47.3	0.021	0.019	0.00021	6.35	0.04	0.0021	0.00056	22.8	71.6	448.6	6.4
	1060	10	271.8	47.0	0.023	0.020	0.00019	4.79	0.04	0.0007	0.00055	17.2	81.1	449.6	6.4
	1090	10	371.8	47.2	0.013	0.018	0.00030	3.04	0.03	0.0025	0.00032	10.9	94.1	446.5	6.3
	1130	10	170.0	46.9	0.027	0.021	0.00047	1.71	0.05	0.0048	0.0006	6.2	100.0	438.2	6.3

**Таблица 1.2.** <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar аналитические данные для амфибола из габбро (мафическая дайка, образец К 497-1) **Table 1.2.** <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar analytical data of amphibole from gabbro (mafic dike, sample К 497-1)

Примечание. \* - параметр, характеризующий интегральную интенсивность нейтронного потока.

Note. \* - a parameter describing the integral intensity of the neutron flux.

Таблица 1.3. Содержание петрогенных окислов и рассеянных элементов в породах мафических даек Table 1.3. Concentrations of major oxides and trace elements in rocks of mafic dikes

Образец	К 474	К 497-1	К 498-4	К 499-1	К 500-1	К 501-4	К 502-1	К 502-2	К 537-1	К 538-1
SiO <sub>2</sub>	48.70	51.56	46.81	49.92	50.47	53.09	49.71	52.84	52.46	54.35
TiO <sub>2</sub>	2.05	1.70	2.33	1.98	1.56	1.28	1.10	1.66	1.34	1.11
$Al_2O_3$	15.89	15.92	15.47	15.80	15.87	17.02	16.82	16.16	16.76	15.75
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	12.28	11.49	13.37	11.37	10.65	8.67	9.94	10.18	9.67	9.54
MnO	0.20	0.18	0.22	0.19	0.18	0.17	0.16	0.16	0.18	0.15
MgO	5.18	4.92	6.04	5.03	6.03	5.17	6.17	4.34	4.05	4.67
CaO	8.11	7.84	8.58	7.98	7.85	5.64	10.19	7.55	7.15	7.66
Na <sub>2</sub> 0	3.78	3.69	3.80	3.94	3.32	4.10	3.41	3.74	3.46	3.33
K <sub>2</sub> 0	1.44	1.08	0.88	1.36	1.22	1.19	0.86	1.47	1.83	1.21
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.80	0.59	0.84	0.80	0.67	0.53	0.30	0.62	0.62	0.27
п.п.п.	0.84	0.64	1.47	0.76	1.62	2.64	1.35	1.02	1.60	1.04
Сумма	99.27	99.62	99.81	99.13	99.45	99.50	100.02	99.75	99.11	99.06
Rb	26.48	-	16.61	-	47.17	36.23	13.70	-	-	-
Sr	670.56	-	672.44	-	573.64	431.66	739.83	-	-	-
Y	42.03	-	43.88	-	31.47	32.54	22.78	-	-	-
Zr	265.43	-	253.35	-	213.10	259.01	103.42	-	-	-
Nb	18.93	-	17.30	-	13.82	14.77	4.03	-	-	-
Cs	1.20	-	2.50	-	3.99	2.17	0.79	-	-	-
Ва	632.44	-	555.87	-	650.56	580.89	345.21	-	-	-
La	37.17	-	34.31	-	34.16	43.44	17.87	-	-	-
Ce	82.89	-	71.66	-	69.74	85.97	37.13	-	-	-
Pr	10.62	-	9.65	-	9.36	10.90	5.23	-	-	-
Nd	42.67	-	41.53	-	36.50	42.51	22.37	-	-	-
Sm	9.06	-	8.60	-	7.14	8.03	5.19	-	-	-
Eu	2.45	-	2.75	-	2.18	2.19	1.60	-	-	-
Gd	8.57	-	8.41	-	6.71	7.05	4.48	-	-	-
Tb	1.25	-	1.28	-	0.96	1.14	0.73	-	-	-
Dy	7.44	-	7.61	-	5.59	5.80	3.98	-	-	-
Но	1.44	-	1.50	-	1.15	1.15	0.82	-	-	-
Er	4.20	-	4.42	-	3.01	3.11	2.34	-	-	-
Tm	0.61	-	0.67	-	0.48	0.47	0.32	-	-	-
Yb	3.89	-	4.20	-	2.89	3.10	2.00	-	-	-
Lu	0.60	-	0.62	-	0.43	0.44	0.30	-	-	-
Hf	5.38	-	5.28	-	4.58	5.51	2.56	-	-	-
Та	0.89	-	0.94	-	0.71	0.82	0.22	-	-	-
Th	3.16	-	2.41	-	3.02	4.52	1.98	-	-	-
U	1.44	-	1.12	-	0.82	1.36	0.52	-	-	-
La/Yb <sub>N</sub>	6.86	-	5.86	-	8.48	10.05	6.41	-	-	-
Gd/Yb <sub>N</sub>	1.82	-	1.66	-	1.92	1.88	1.85	-	-	-
δΕυ	0.84	-	0.98	-	0.95	0.87	0.99	-	-	-

**Таблица 1.4.** Содержание петрогенных окислов и рассеянных элементов в породах минглинг даек **Table 1.4.** Concentrations of major oxides and trace elements in rocks of mingling dikes

Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Образец	К 471-1	К 472	К 490-1	К 492-1	К 496-1	К 536-2	К 471	К 490-2	К 496-2	К 536-3
SiO <sub>2</sub>	55.38	50.11	54.65	50.07	56.07	49.78	-	69.83	72.81	69.25
TiO <sub>2</sub>	1.06	1.53	1.91	1.38	0.98	0.99	-	0.40	0.32	0.46
$Al_2O_3$	16.61	16.84	15.67	16.95	16.76	14.58	-	14.83	13.62	15.28
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	8.42	10.99	10.93	10.15	7.81	9.76	-	3.04	2.36	3.47
MnO	0.20	0.17	0.19	0.16	0.13	0.17	-	0.05	0.04	0.04
MgO	4.22	5.14	3.35	5.18	4.37	8.15	-	1.15	0.44	1.38
CaO	5.47	7.56	6.57	8.69	6.81	9.75	-	2.02	1.07	3.86
Na <sub>2</sub> 0	3.90	3.36	3.56	3.55	3.66	3.21	-	4.09	3.68	4.30
K <sub>2</sub> 0	1.29	1.63	0.97	1.38	1.73	1.20	-	2.60	4.33	1.06
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.56	0.62	0.60	0.70	0.43	0.43	-	0.14	0.08	0.15
п.п.п.	2.05	1.30	1.11	1.50	0.65	1.31	-	0.97	0.65	0.79
Сумма	99.16	99.25	99.51	99.70	99.41	99.33	-	99.13	99.42	100.06
Rb	49.01	32.17	26.83	-	36.66	-	-	51.31	63.44	20.22
Sr	550.54	911.50	518.01	-	752.94	-	-	434.82	292.58	680.96
Y	34.13	28.58	36.09	-	24.00	-	-	13.70	19.57	9.32
Zr	234.44	198.96	233.21	-	183.06	-	-	150.23	171.61	126.03
Nb	17.89	10.90	12.32	-	9.41	-	-	8.44	10.39	5.03
Cs	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ва	372.33	639.28	310.68	-	797.73	-	-	809.71	950.36	442.86
La	40.89	30.32	28.88	-	29.51	-	-	17.21	31.55	25.28
Ce	87.89	70.00	61.17	-	60.79	-	-	38.40	54.51	42.97
Pr	11.78	9.03	8.71	-	8.01	-	-	3.89	6.12	4.71
Nd	47.62	38.30	36.46	-	32.31	-	-	14.77	20.75	15.96
Sm	9.02	7.24	8.04	-	6.31	-	-	2.92	3.78	2.79
Eu	2.69	2.21	2.37	-	1.88	-	-	0.75	0.90	0.77
Gd	7.88	6.81	7.31	-	5.26	-	-	2.57	3.49	2.31
Tb	1.05	0.93	1.10	-	0.84	-	-	0.41	0.54	0.33
Dy	6.02	5.17	6.32	-	4.09	-	-	2.22	3.02	1.72
Но	1.17	0.98	1.27	-	0.83	-	-	0.45	0.63	0.36
Er	3.17	2.70	3.51	-	2.28	-	-	1.30	1.94	0.96
Tm	0.46	0.38	0.55	-	0.34	-	-	0.20	0.32	0.16
Yb	2.95	2.51	3.78	-	2.15	-	-	1.26	2.00	0.98
Lu	0.45	0.39	0.56	-	0.31	-	-	0.19	0.30	0.15
Hf	4.77	4.27	5.48	-	4.24	-	-	3.70	4.58	3.16
Та	0.89	0.50	0.67	-	0.52	-	-	0.54	0.79	0.41
Th	4.43	2.67	5.10	-	4.12	-	-	6.07	13.10	7.14
U	2.03	1.01	1.31	-	1.27	-	-	0.65	1.27	0.82
La/Yb <sub>N</sub>	9.95	8.68	5.48	-	9.86	-	-	9.76	11.32	18.57
Gd/Yb <sub>N</sub>	2.21	2.25	1.60	-	2.03	-	-	1.68	1.44	1.96
δΕυ	0.95	0.95	0.93	_	0.97	_	-	0.82	0.74	0.91

Примечание. 1-6 – диориты; 7-10 – граниты.

Note. 1–6 – diorites; 7–10 – granites.