



KENGEDE MAFIC DYKE SWARM AND EXPANSION OF THE 1.50 Ga KUONAMKA LARGE IGNEOUS PROVINCE OF NORTHERN SIBERIA

M.D. Tomshin ¹, R.E. Ernst ^{2,3}, U. Söderlund⁴, A.V. Okrugin ¹✉

¹ Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 39 Lenin Ave, Yakutsk 677000, Russia

² Carleton University, Ottawa K1S 5B6, Ontario, Canada

³ National Research Tomsk State University, 36 Lenin Ave, Tomsk 634050, Russia

⁴ Lund University, Lund 223 62, Sweden

ABSTRACT. Within the Anabar shield in the northern part of the Siberia, Late Precambrian mafic igneous units are widespread, which form dyke swarms of different ages of different trends. This paper presents new data on the composition, structure and U-Pb dating of the E-W trending Kengede dyke swarm. Three new U-Pb ID-TIMS baddeleyite ages (1496±7, 1494±3 and 1494±5 Ma) were obtained from three dykes, indicating that the Kengede swarm is part of the 1500 Ma Kuonamka large igneous province (LIP). The previously recognized Kuonamka Large Igneous Province (LIP) extends for 700 km from the Anabar shield to the Olenek uplift in the northern part of the Siberia and is potentially linked to coeval dykes and sills of the São Francisco craton and the Congo craton. The newly dated Kengede swarm is parallel to but offset by 50 km from the previously dated 1501±3 Ma Kuonamka swarm, and the identification of these two subparallel dyke subswarms of the Kuonamka LIP supports the earlier interpretation that mantle plume centre was located along the extrapolated trend of the dykes near the eastern or western margin of the Siberia. The paper examines features of sulfide Cu-Ni mineralization in dolerites of the Kengede and East Anabar dyke swarms and discusses potential Cu-Ni-sulfide mineralization linked to the Precambrian mafic dyke swarms of different ages in the north-east of the Siberia.

KEYWORD: basite; dike swarm; large igneous province; plume; Anabar shield; Siberian craton

FUNDING: Geological and petrological section of the work was carried out within the framework of the DPMGI SB RAS (0381-2019-0003) and the LIPs-Industry Consortium project (www.supercontinent.org), section on Cu-Ni-sulfide mineralization was carried out within the framework of the Russian Science Foundation project (Regional contest) 22-27-20151.



RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Alexander V. Okrugin, okrugin@diamond.ysn.ru

Received: November 14, 2022

Revised: March 27, 2023

Accepted: April 11, 2023

FOR CITATION: Tomshin M.D., Ernst R.E., Söderlund U., Okrugin A.V., 2023. Kengede Mafic Dyke Swarm and Expansion of the 1.50 Ga Kuonamka Large Igneous Province of Northern Siberia. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (4), 0707. doi:10.5800/GT-2023-14-4-0707

English version: see article page online

КЕНГЕДИНСКИЙ МАФИЧЕСКИЙ ДАЙКОВЫЙ РОЙ И РАСШИРЕНИЕ КУОНАМСКОЙ КРУПНОЙ ИЗВЕРЖЕННОЙ ПРОВИНЦИИ (1500 МЛН ЛЕТ) СЕВЕРНОЙ СИБИРИ

М.Д. Томшин¹, Р.Е. Эрнст^{2,3}, У. Сёдерлунд⁴, А.В. Округин¹

¹ Институт геологии алмазов и благородных металлов СО РАН, 677000, Якутск, пр-т Ленина, 39, Россия

² Карлтонский университет, K1S 5B6, Оттава, Онтарио, Канада

³ Томский государственный университет, 634050, Томск, пр-т Ленина, 36, Россия

⁴ Лундский университет, 223 62, Лунд, Швеция

АННОТАЦИЯ. В пределах Анабарского щита в северной части Сибирского кратона широко распространены позднедокембрийские базиты, которые формируют разновозрастные дайковые рои различного направления. В статье приводятся новые данные по составу, строению и U-Pb датировкам даек Кенгединского роя. Три новых возраста по бадделеиту (1496 ± 7 , 1494 ± 3 и 1494 ± 5 млн лет) из трех даек указывают на то, что Кенгединский рой даек является частью Куонамской крупной магматической провинции (КМП). Ранее выделенная Куонамская КМП простирается на 700 км от Анабарского щита до Оленекского поднятия в северной части Сибирской платформы и потенциально связана с синхронными дайками и силлами кратонов Сан-Франциско и Конго. Вновь датированный Кенгединский рой расположен параллельно в 50 км южнее от Куонамского роя даек (1501 ± 3 млн лет), и идентификация этих двух самостоятельных субпараллельных дайковых роев Куонамской КМП подтверждает более раннюю интерпретацию того, что центр мантийного плюма располагался вдоль экстраполированного тренда даек вблизи восточной или западной окраины Сибирского кратона. В связи с этим в статье также рассматриваются особенности сульфидной Cu-Ni-минерализации в долеритах Кенгединского и Восточно-Анабарского дайковых роев и обсуждается потенциальное Cu-Ni-сульфидное оруденение, связанное с разновозрастными докембрийскими роями мафических даек на северо-востоке Сибирской платформы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: базиты; дайковый рой; крупные изверженные провинции; плюм; Анабарский щит; Сибирский кратон

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Геолого-петрологический раздел работы выполнен в рамках НИР ИГАБМ СО РАН (№ 0381-2019-0003) и проекта LIPS-Industry Consortium (www.supercontinent.org), а раздел о Cu-Ni-сульфидной минерализации – по теме проекта РНФ (региональный конкурс) № 22-27-20151.

1. ВВЕДЕНИЕ

На Анабарском щите в северо-восточной части Сибирской платформы в пределах выходов глубокометаморфизованных пород архея, протерозойских и рифейских отложений широко развиты базитовые дайки и силлы (рис. 1). Изотопно-геохронологические данные осадочных пород западного и восточного обрамления Анабарского щита [Gorokhov et al., 2019] показывают, что они относятся к нижнему рифею (1600–1400 млн лет). Это подтверждается максимально молодым U-Pb возрастом 1681 ± 28 млн лет детритовых цирконов из базальных горизонтов мукунских песчаников восточной окраины Анабарского щита [Khudoley et al., 2015].

Позднедокембрийский K-Ar возраст базитовых даек убедительно был доказан впервые во время проведения среднемасштабного геологического картирования в 60-х годах прошлого столетия и приводится здесь на примере работ одного из первых исследователей анабарских базитов М.С. Мащак [Mashchak, 1969; Oleinikov et al., 1983]. Позднее авторами были изучены минералого-петрохимические особенности базитовых даек с определением их K-Ar датировок на большой территории Анабарского массива, в результате были выделены разновозрастные дайковые пояса длиной до 200–300 км различного направления [Okrugin

et al., 1990]. Затем на основе прецизионных U-Pb датировок был уточнен возраст этих дайковых поясов и выделены три пояса, представляющие плюмовые системы КМП:

– дайки северо-западного направления Чиэрэско-го роя с возрастом 1385 млн лет [Ernst et al., 2000] и продолжением до Таймыра [Priyatkina et al., 2017] и Уджинского палеорифта [Malyshev et al., 2018];

– субширотные дайки (и силлы) Куонамского роя с возрастом 1500 млн лет [Ernst et al., 2000, 2016b];

– северо-северо-западные дайки Восточно-Анабарского роя Тимптонской КМП с возрастом 1774–1750 млн лет [Gladkochub et al., 2010, 2019, 2022; Ernst et al., 2016a].

В статье приводятся новые U-Pb датировки даек Кенгединского роя (рис. 2), расположенного субпараллельно в 50 км южнее Куонамского роя. Необходимость проведенных исследований заключается в уточнении возраста становления Кенгединского роя с целью его сопоставления с другими разновозрастными и разнонаправленными дайковыми поясами Анабарского щита. Ранжирование всех дайковых роев Анабарского щита может быть полезным при проведении дальнейших палеотектонических построений. Кроме этого, на основе установления сульфидной Cu-Ni-минерализации

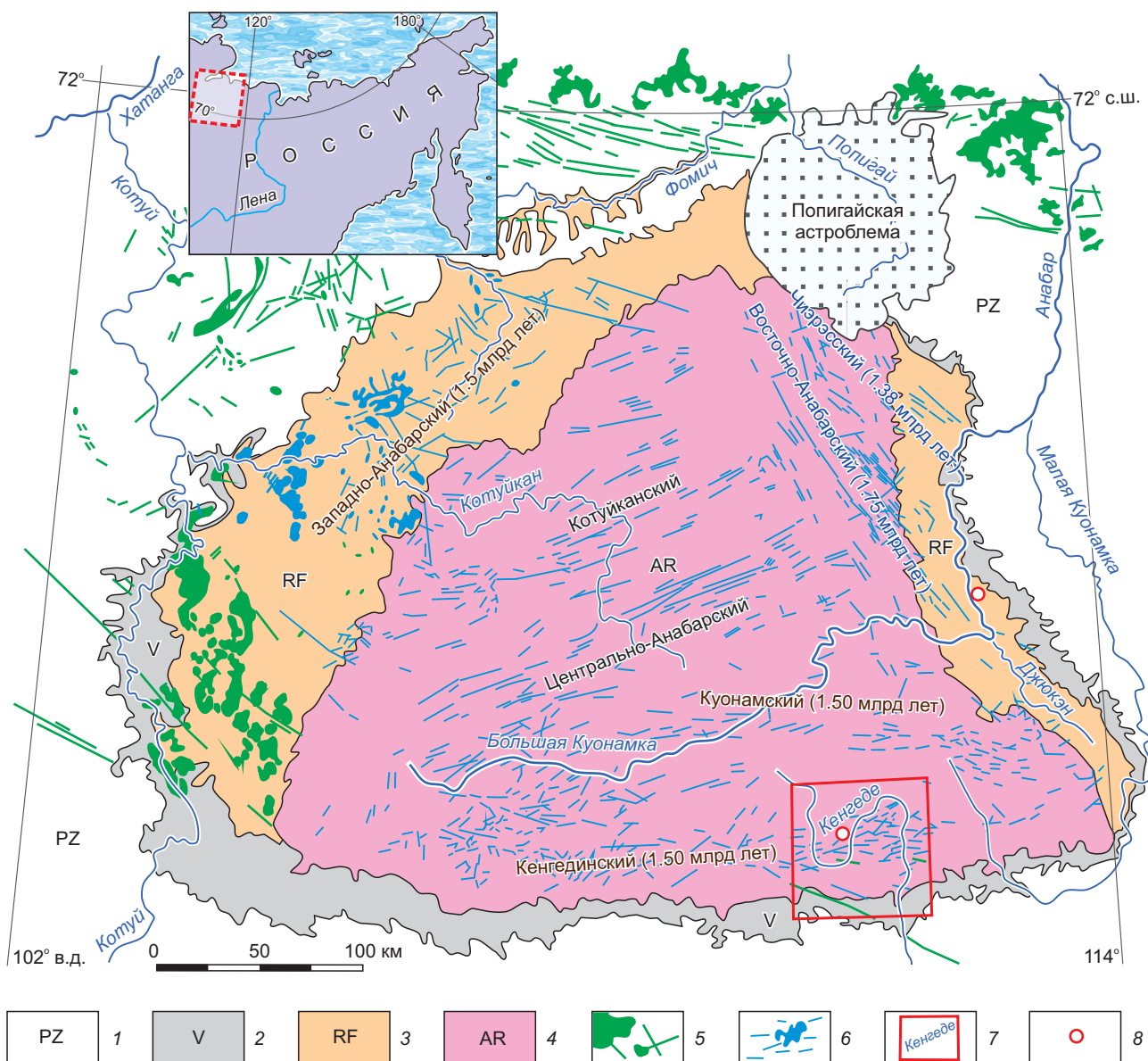


Рис. 1. Схема распространения даек и силлов базитов Анабарского щита (по [Okrugin et al., 1990; Ernst et al., 2016b]).
 1 – палеозойские доломиты, известняки, мергели и песчаники; 2 – доломиты, известняки венда; 3 – рифейские конгломераты, песчаники, алевролиты, аргиллиты и доломиты; 4 – архей-нижнепротерозойские метаморфические комплексы; 5 – пермско-триасовые силлы и дайки сибирских траппов; 6 – позднедокембрийские базитовые дайковые рои и их возраст (Куонамский (1.50 млрд лет) и др.); 7 – участок изученных даек Кенгединского роя (рис. 2); 8 – долериты с Cu-Ni сульфидной минерализацией.

Схема построена на основе Геологических карт Анабарского щита масштаба 1:1000000 [State Geological Map..., 1983] и Сибирской платформы масштаба 1:1500000 [Geological Map..., 1999] с некоторыми изменениями и дополнениями авторов.

Fig. 1. Scheme of distribution of dyke swarms and sill province in Anabar shield after [Okrugin et al., 1990; Ernst et al., 2016b].
 1 – Paleozoic dolomites, limestones, marlstones and sandstones; 2 – Vendian dolomites, sandstones, argillite, conglomerates and limestones; 3 – Riphean conglomerates, sandstones, siltstones, argillite and dolomites; 4 – Archean-Paleoproterozoic metamorphic complexes; 5 – Permian-Triassic sills and dikes of Siberian trapp; 6 – Late Precambrian dyke swarms with their age (Kuonamka (1.50 Ga) etc.); 7 – the site of the studied dykes of the Kengede swarm (Fig. 2); 8 – location of the dolerite with Cu-Ni sulfide mineralization.

Constructed on the basis of a Geological maps of the Anabar Shield, scale 1:1000000 [State Geological Map..., 1983], and Siberian platform, scale 1:1500000 [Geological Map..., 1999] with some changes and additions by the authors.

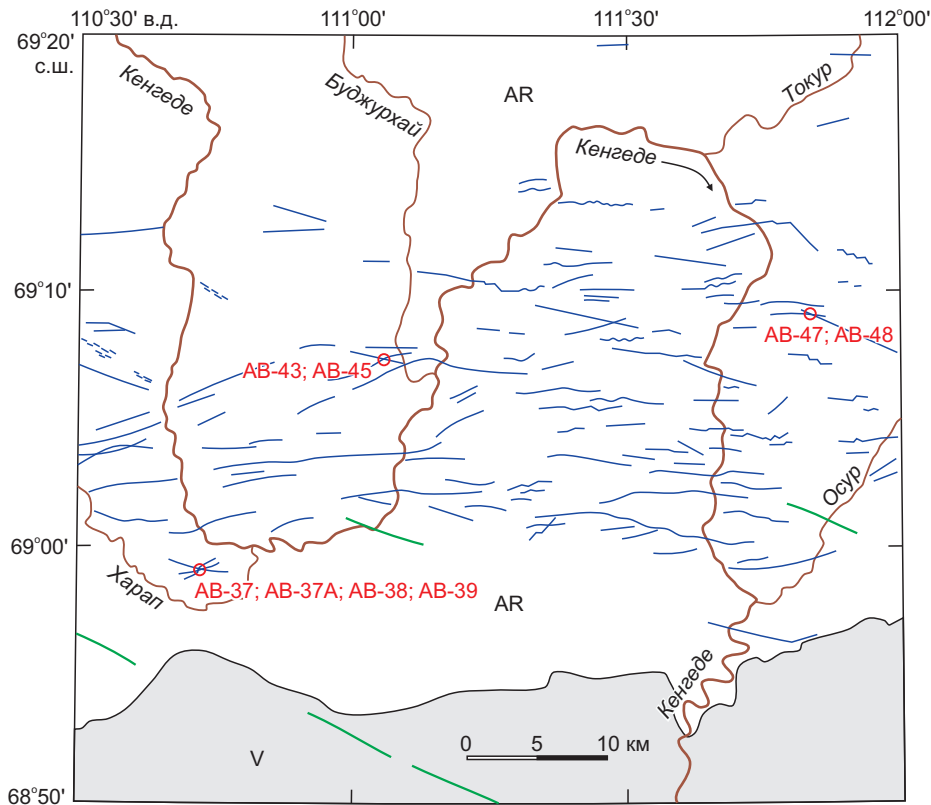


Рис. 2. Фрагмент Кенгединского дайкового роя в пределах бассейна р. Кенгеде (см. рис. 1). Расположение даек приводится по геологической карте масштаба 1:200000 [Geological Map..., 1975] с указанием трех изученных групп даек (красные кружочки) с номерами образцов (AB-37 и т.д.).

Fig. 2. Fragment of the Kengede dyke swarm in the Kengede River basin (see Fig. 1). Distribution of dykes is shown according to the geological map of scale 1:200000 [Geological Map..., 1975], with the location of three groups studied dykes (red circles) and sample numbers (AB-37, etc.).

в долеритах Бужурхайской дайки Кенгединского пояса [Mashchak, 1969] и долеритах Восточно-Анабарского роя [Okrugin et al., 2021] обсуждается потенциальная Cu-Ni-минерализация позднедокембрийских базитов в свете модели, предложенной в работах [Jowitt, Ernst, 2013; Ernst, Jowitt, 2013].

2. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ И ПЕТРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БАЗИТОВЫХ ДАЕК КЕНГЕДИНСКОГО ПОЯСА

По простиранию на Анабарском массиве выделяются разные дайковые пояса: субширотные Кенгединский и Куонамский, восток-северо-восточные Центрально-Анабарский, Котуйканский и Западно-Анабарский, север-северо-западный Восточно-Анабарский и северо-западный Чиэрэсский рой [Okrugin et al., 1990]. В пределах каждого дайкового роя ориентировка даек в основном совпадает с общим направлением пояса. Однако в Куонамском и Кенгединском роях субширотного направления дайки имеют кулисообразное расположение с простиранием преимущественно в 80–90° и 275–283°, но также встречаются дайки В-СВ и З-СЗ направлений (рис. 2). Иногда наблюдаются разновременные взаимопересекающиеся дайки, например Харапская группа трех пересекающихся даек (рис. 3).

Дайки Кенгединского роя прорывают метаморфические комплексы фундамента, но они перекрыты венд-нижнепалеозойскими терригенно-карбонатными толщами платформенного чехла. Только в редких случаях наблюдается проникновение даек долеритов северо-западного простирания, принадлежащих пермско-триасовым сибирским траппам, широко развитым за пределами Анабарского щита. Формирование докембрийских даек, судя по K-Ar определениям возраста даек (1600–1300 млн лет), охватывало ранне- и среднерифейское время [Mashchak, 1969; Oleinikov et al., 1983; Okrugin et al., 1990]. Для определения U-Pb возраста даек Кенгединского роя были отобраны образцы из трех мест среднего течения р. Кенгеде: AB-(37–39) – дайки приустьевой части руч. Харап, AB-(43, 45) – дайки приустьевой части руч. Бужурхай и AB-(47, 48) – дайки с водораздельной части рек Кенгеде и Осур (см. рис. 2).

Породы даек не подвержены метаморфическим преобразованиям и имеют свежий облик. Они характеризуются резкими секущими контактами и крутым падением, в эндоконтакте дайки сложены микродолеритами, постепенно переходящими в более крупнозернистые габбро-долериты. Мощность тел в основном колеблется от первых метров до первых десятков метров, реже достигает 100–200 м. Протяженность в

зависимости от мощности изменяется от нескольких десятков метров до нескольких километров.

Изученные авторами образцы из кенгединских даек представляют собой среднезернистые офитовые габбро-долериты, состоящие из плагиоклаза, авгита, оливина, титаномагнетита, кварц-полевошпатового мезостазиа и вторичных амфибол-слюдястых минералов. Наиболее мощные дайки имеют сложное строение, обусловленное дифференциацией расплава в протяженных магматических каналах. Это приводит к формированию даек с постепенным переходом кварцевых габбро-долеритов в краевых зонах к габбро-диоритам и монцонит-порфирам в центральной части. Например, центральная зона Харапской дайки мощностью 12–16 м состоит из кварцевых монцонит-порфиров, имеющих резкий переход от вмещающих габбро-долеритов

(рис. 3). В ней также наблюдаются многочисленные жилки аплитов толщиной до 3 см [Mashchak, 1970].

Химический состав изученных пород приведен в табл. 1, где также приводятся средневзвешенные данные по докембрийским базитовым дайкам Кенгединского и Куонамкского роев, которые по петрохимическим особенностям разделяются на толеитовые и субщелочные ряды [Oleinikov et al., 1983]. На диаграмме $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ отобранные для изотопной датировки пробы приурочены преимущественно к области базальтов субщелочного состава, но наиболее обогащенные SiO_2 долериты дайки АВ-37 из Харапской группы (рис. 3) тяготеют к полю базальтовых андезитов (рис. 4, а). Но породы из Буджурхайской дайки характеризуются повышенной суммой щелочей при относительно низкой кремнеземистости и подобно субщелочным

Таблица 1. Химический состав (мас. %) и содержание малых элементов (г/т) изученных пород Кенгединского дайкового пояса
Table 1. Chemical composition (wt. %) and content of trace elements (ppm) in the rocks of the Kengede dyke swarm

Дайка № обр.	Харапская				Буджурхайская		Осурская		Кенгединский рой		Куонамский рой	
	АВ-37	АВ-37А	АВ-38	АВ-39	АВ-43	БД*	АВ-47	АВ-48	Т-Б*	СЩБ*	94-04*	94-03*
SiO_2	51.52	49.36	49.65	48.89	47.57	47.42	48.39	49.07	51.84	49.17	52.96	49.97
TiO_2	2.99	1.81	2.56	2.02	2.55	3.60	2.23	2.08	2.45	3.51	1.75	3.09
Al_2O_3	14.12	13.75	12.71	13.00	12.09	12.22	12.9	12.79	13.77	12.70	12.75	13.60
Fe_2O_3	3.80	1.25	3.89	3.54	6.98	5.67	3.52	5.57	4.67	5.54	14.35//	13.62//
FeO	10.75	11.91	11.45	12.12	10.65	11.07	10.81	9.96	8.99	9.48	-	-
MnO	0.12	0.19	0.20	0.21	0.23	0.14	0.24	0.22	0.19	0.17	0.22	0.21
MgO	3.83	7.40	5.88	6.27	6.10	5.87	7.60	6.06	4.93	5.29	5.35	5.83
CaO	7.51	9.76	9.28	9.93	9.37	8.90	10.02	9.99	7.73	7.55	9.71	9.48
Na_2O	2.61	2.82	2.34	2.05	2.18	2.70	1.99	2.10	2.88	3.33	2.29	2.67
K_2O	1.30	0.34	0.61	0.42	0.47	0.62	0.63	0.75	1.36	1.17	0.45	0.92
P_2O_5	0.40	0.17	0.28	0.22	0.20	0.26	0.26	0.19	0.31	0.48	0.17	0.62
LOI	1.40	0.81	1.63	1.75	2.30	1.38	1.66	1.65	0.95	1.60	1.24	1.52
n	1	1	1	1	1	25	1	1	33	40	1	1
Total	100.35	99.57	100.48	100.42	100.69	99.85	100.25	100.43	100.07	99.97	101.24	101.53
Ni	53	100	-	-	-	82	-	-	78	59	62	89
Co	33	37	-	-	-	43	-	-	37	36	51	42
Cr	26	92	-	-	-	95	-	-	68	53	40	90
V	253	429	-	-	-	505	-	-	345	373	427	332
Sc	28	40	-	-	-	49	-	-	36	36	37	25
Zn	-	107	-	-	-	63	-	-	55	32	123	161
Cu	253	337	-	-	-	260	-	-	208	154	189	84
Pb	2.5	4	-	-	-	2.4	-	-	4.0	3.3	2	7

Примечание. * – ранее опубликованные данные: БД – средневзвешенные составы Буджурхайской дайки (n=25); Т-Б и СЩБ-дайки Кенгединского пояса соответственно толеит-базитового (n=33) и субщелочного (n=40) состава по [Oleinikov et al., 1983]; 94-04 и 94-03 соответствуют дайкам EG94-04-05 (группа 1) и EG94-03-05 (группа 2) Куонамкского роя по [Ernst et al., 2016b], где // – общее содержание $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}$. Остальные данные относятся к новым датированным дайкам Кенгединского роя. Силикатные анализы проведены методом мокрой химии, а микроэлементы определялись спектральным анализом в лабораториях ИГАБМ СО РАН. n – количество анализов.

Note. * – previously published data: BD – weighted mean values of the Budjurkhai dyke group (n=25); T-B and SAB – compositions of the tholeiite-basalt (n=33) and subalkaline basalt (n=40) respectively of the Kengede swarm dykes by [Oleinikov et al., 1983]; 94-04 and 94-03 correspond to EG94-04-05 (Group 1) and EG94-03-05 (Group 2) of the Kuonamka swarm by [Ernst et al., 2016b], where // – total $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}$. The remaining data relate to the newly dated dykes of the Kengede swarm. Silicate analyses were carried out by wet chemistry, and trace elements were determined by spectral analysis in laboratories of the DPMGI SB RAS. n – number of analysis.

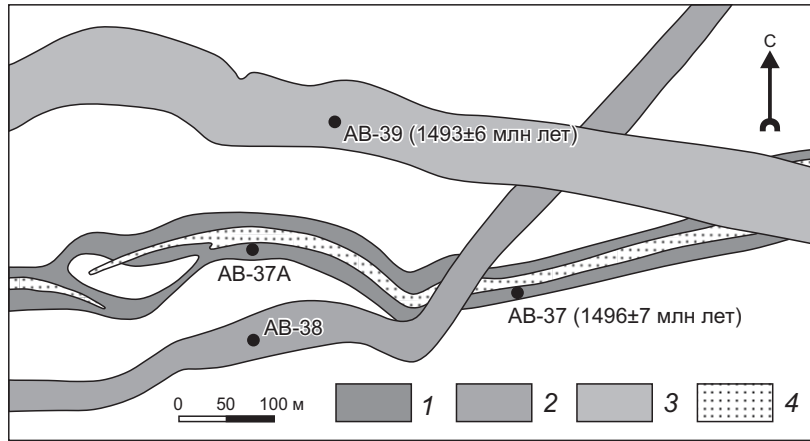


Рис. 3. Строение трех пересекающихся даек Харапской группы (по [Mashchak, 1970]). 1-3 – габбро-долериты даек АВ-37, АВ-38 и АВ-39 соответственно (с указанием U-Pb возраста); 4 – монцитит-порфиры.

Fig. 3. Field site map locating the three crosscutting dykes of the Kharap stream group of dykes after [Mashchak, 1970]. 1-3 – gabbro-dolerite of the dykes AB-37, AB-38 and AB-39, respectively with U-Pb age; 4 – monzonite-porphyrus.

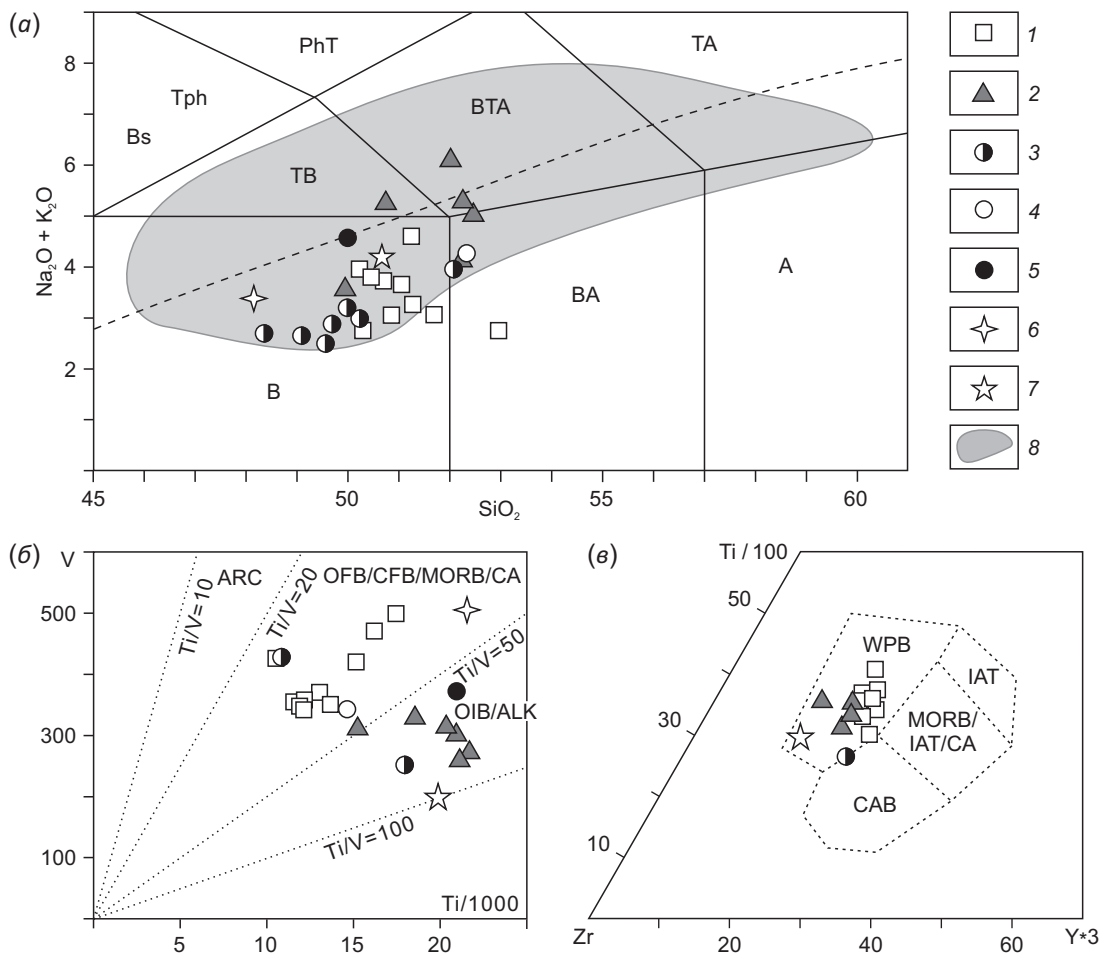


Рис. 4. Состав базитов Куонамской КМП на геохимических диаграммах. (а) – диаграмма $SiO_2-(Na_2O+K_2O)$ по систематике Международного союза геологических наук (IUGS, 2002 г.): В – базальт, ВА – базальтовый андезит, А – андезит, ТА – трахиандезит, ВТА – базальтовый трахиандезит, ТВ – трахибазальт, Bs – базанит, Trh – тефрит, PhT – фонотефрит, пунктирной линией показана граница между щелочными (выше линии) и субщелочными породами. Состав пород рассчитаны на сухой остаток; (б) – диаграмма V – Ti по [Shervais, 1982], ARC – толеиты дуг, OFB – океанические платобазальты, CFB – континентальные платобазальты, MORB – базальты срединно-океанических хребтов, CA – известково-щелочные базальты, OIB – базальты океанических островов, ALK – щелочные базальты; (в) – дискриминантная диаграмма Zr-Ti-Y по [Pearce, Cann, 1973], WPB – внутриплитные базальты, IAT – островодужные толеиты, CAB – известково-щелочные базальты. 1-2 – базиты первой (1) и второй (2) группы Куонамской КМП (по [Ernst et al., 2016b]); 3 – дайки

р. Кенгеде, изученные авторами (табл. 1); 4–6 – средневзвешенные значения для даек Кенгединского пояса толеит-базитового (4) и субщелочного (5) состава, Буджурхайской дайки (6) по [Oleinikov et al., 1983]; 7 – долериты с сульфидными нодулями, р. Большая Куонамка по [Okrugin et al., 2021]; 8 – поле составов позднедокембрийских базитов Анабарского щита [Mashchak, 1970; Oleinikov et al., 1983; Okrugin et al., 1990; Koroleva et al., 1999].

Fig. 4. Compositions of the Kuonamka LIP units on geochemical diagrams.

(a) – SiO_2 – $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ diagram based on the systematics of the International Union of Geological Sciences (IUGS, 2002): B – basalt; BA – basaltic andesite; A – andesite; TA – trachyandesite; BTA – basaltic trachyandesite; TB – trachybasalt; Bs – basanite; Tph – tephrite; PhT – phonotephrite. Dotted line shows the boundary between alkaline (above the line) and subalkaline rocks. Rock compositions are calculated for dry residual; (б) – V-Ti diagram [Shervais, 1982], ARC – arc tholeiites, OFB – oceanic flood basalt, CFB – continental flood basalt, MORB – mid-ocean-ridge basalt, CA – calc-alkaline basalt, OIB – oceanic island basalts, ALK – alkali basalt; (в) – Zr-Ti-Y discriminant diagram [Pearce, Cann, 1973], WPB – within-plate basalts, IAT – island-arc tholeiites, CAB – calc-alkaline basalts. 1–2 – basites of the first (1) and second (2) groups of the Kuonamka LIP [Ernst et al., 2016b]; 3 – dykes of the Kengede river studied by the authors (Table 1); 4–6 – weighted mean values of the Kengede swarm dykes of the tholeiite-basalt (4) and subalkaline (5) compositions, and Budjurkhai dykes (6) [Oleinikov et al., 1983]; 7 – dolerites with sulfide nodules, Bolshaya Kuonamka river [Okrugin et al., 2021]; 8 – field of compositions of the Late Precambrian basites of the Anabar shield [Mashchak, 1970; Oleinikov et al., 1983; Okrugin et al., 1990; Koroleva et al., 1999].

долеритам приближаются к полю трахибазальтов. Составы даек Кенгединского роя близки таковым даек Куонамского роя [Ernst et al., 2016b] и в целом попадают в область докембрийских базитов Анабарского щита. Более широкий диапазон анабарских базитов в сторону состава базальтовых трахиандезитов и трахиандезитов обусловлен появлением в сложных дайках поздних дифференциатов, представленных монзонит-порфирами.

По другим геохимическим параметрам долериты Кенгединского роя также идентичны дайкам Куонамского роя. Среди последних были выделены две группы пород [Ernst et al., 2016b], которые отчетливее всего проявлены на Ti-V диаграмме (рис. 4, б), где видно, что долериты первой группы преимущественно попадают в поле OFB-CFB-MORB, а группа 2 локализуется в секторе OIB-ALK. По сравнению с группой 1 породы группы 2 более обогащены титаном, калием, фосфором и РЗЭ. К сожалению, по породам Кенгединского роя даек авторы пока имеют небольшое количество анализов по микроэлементам, но единичные данные тоже вполне соответствуют таковым по куонамским дайкам. На дискриминантной диаграмме Zr-Ti-Y (рис. 4, в) точки составов пород Кенгединского роя, так же как и Куонамского, приурочены к области внутриплитных базальтов.

3. U-Pb ДАТИРОВКА ДАЕК КЕНГЕДИНСКОГО РОЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Авторами были продатированы три дайки Кенгединского роя U-Pb методом с использованием масс-спектрометрии с термической ионизацией и изотопным разбавлением (U-Pb ID-TIMS). Эти образцы были обработаны в лаборатории Университета Лунда с использованием метода разделения бадделеита [Söderlund, Johansson, 2002]. Приблизительно 30 зерен коричневого бадделеита были отделены от каждого образца, за исключением образца АВ-37, из которого было получено только шесть зерен. Зерна бадделеита хорошего качества и оптически лучшие зерна были отобраны вручную и объединены в четыре фракции для

образцов АВ-39 и АВ-45 и две фракции для образца АВ-37. В каждой фракции было объединено от двух до четырех зерен. Изотопный анализ был проведен на масс-спектрометре FinniganTRITON в Музее естественной истории в Стокгольме. Все фракции были проанализированы в режиме переключения пиков с использованием SEM (Secondary Electron Multiplier). Результаты U-Pb датировок приведены в табл. 2 и рис. 5 и обсуждаются ниже.

АВ-37: из данной пробы были подготовлены две фракции, но одна не удалась. Успешная фракция дает возраст $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 1496 ± 7 млн лет с величиной дискордантности около 1 %, что может рассматриваться в качестве минимальной оценки времени внедрения данной дайки (рис. 5, а, темно-серый эллипс).

АВ-39: все четыре проанализированные фракции на графике перекрываются с дискордантностью менее 1 % (рис. 5, а, светло-серые эллипсы). Расчет по всем фракциям дает средневзвешенный возраст $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 1493 ± 6 млн лет. Исключением является наименее радиогенная фракция (Bd-4), которая немного отклоняется от графика и имеет среднее значение 1494 ± 3 млн лет.

АВ-45: для этого образца четыре фракции перекрываются и составляют компактное поле (рис. 5, б). Средневзвешенное значение дат $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ составляет 1494 ± 5 млн лет, и это является предпочтительным возрастом этой дайки.

Можно резюмировать, что полученные новые значения возраста по бадделеиту (1496 ± 7 , 1494 ± 3 и 1494 ± 5 млн лет) из трех даек Кенгединского пояса субширотного направления вполне соответствуют возрасту (1501–1503 млн лет) долеритовой дайки EQ94-04-05, расположенной по р. Большая Куонамка [Ernst et al., 2016b]. На рис. 6 представлена сводная информация о 11 U-Pb возрастах, доступных в настоящее время для даек и силлов Куонамской КМП, включая восемь из работы [Ernst et al. 2016b], и 3 U-Pb возраста, полученные здесь по дайкам Кенгеде. Данные по 10 U-Pb ID-TIMS показывают разброс возрастов этих даек в основном между 1505 и 1495 млн лет.

Таким образом, соответствие времени формирования и минералого-геохимических особенностей даек Кенгединского роя таковым базитов соседнего Куонамского роя позволяет рассматривать их как взаимосвязанные и параллельно расположенные суброи, принадлежащие Куонамской КМП. Одним из главных вопросов, остающихся без ответа для Куонамской КМП,

является расположение центра плюма. Тот факт, что два соседних субпараллельных субпояса (Куонамский и теперь Кенгединский) разделены небольшим разрывом, обеспечивает дополнительную поддержку этим дайковым субпоясам, свидетельствуя о местоположении центра плюма, вероятно, расположенного вдоль восточного или западного продолжения данных роев

Таблица 2. U-Pb TIMS данные по бадделеиту для долеритовых даек Кенгеде
Table 2. U-Pb TIMS data for baddeleyite from the Kengede dolerites

Образец, зерно	Кол-во зерен	U/Th	Pb _c / Pb _{tot} ¹⁾	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb ²⁾	Изотопные отношения ³⁾				Возраст, млн лет				Конкордантность		
					²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±2σ
Образец АВ-39															
Bd-1	3	14.6	0.045	1485.8	3.3087	0.71	0.25731	0.66	1483.1	5.5	1476.1	8.7	1493.2	5.4	0.989
Bd-2	5	22.6	0.115	532.1	3.3083	0.72	0.25834	0.67	1483.0	5.6	1481.4	8.9	1485.4	5.7	0.997
Bd-3	4	17.0	0.069	946.2	3.3235	0.81	0.25818	0.78	1486.6	6.3	1480.5	10.3	1495.2	5.6	0.990
Bd-4	4	n.m.	0.037	1772.5	3.3403	0.46	0.25964	0.43	1490.5	3.6	1488.0	5.7	1494.2	3.7	0.996
Образец АВ-37															
Bd-1	2	13.6	0.071	928.6	3.3411	0.89	0.25945	0.85	1490.7	7.0	1487.0	11.2	1496	6.6	0.994
Образец АВ-45															
Bd-5	2	17.3	0.028	2415.8	3.3234	0.46	0.25873	0.43	1486.6	3.6	1483.4	5.7	1491.1	3.6	0.995
Bd-6	2	16.3	0.051	1253.9	3.3346	0.55	0.25937	0.47	1489.2	4.3	1486.6	6.2	1492.8	5.5	0.996
Bd-7	3	2.7	0.295	157.7	3.3605	0.67	0.26008	0.45	1495.2	5.3	1490.3	6.0	1502.3	8.9	0.992
Bd-8	4	39.3	0.032	2081.2	3.3391	0.44	0.25935	0.40	1490.2	3.4	1486.5	5.3	1495.5	3.8	0.994

Примечание. Bd – бадделеит. ¹⁾Pb_c – обычный и Pb_{tot} – суммарный (радиогенный + бланк + начальный) свинец, соответственно. ²⁾Измеренные отношения ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb скорректированы на фракционирование и спайк. ³⁾Измеренные изотопные отношения скорректированы на фракционирование (0.1 % на а.е.м. для Pb), концентрацию спайка, бланк (0.5 пг Pb и 0.05 пг U) и начальный обычный свинец. Поправки на начальный обычный свинец введены в соответствии с модельными величинами [Stacey, Kramers, 1975] и возрастом образца. n.m. – не измерено.
 Note. Bd – baddeleyite. ¹⁾Pb_c – common Pb; Pb_{tot} – total Pb (radiogenic + blank + initial). ²⁾Measured ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb ratio, corrected for fractionation and spike. ³⁾Isotopic ratios corrected for fractionation (0.1 % per amu for Pb), spike contribution, blank (0.5 pg Pb and 0.05 pg U), and initial common Pb. Initial common Pb corrected with isotopic compositions from the model of [Stacey, Kramers, 1975] at the age of the sample. n.m. – not measured.

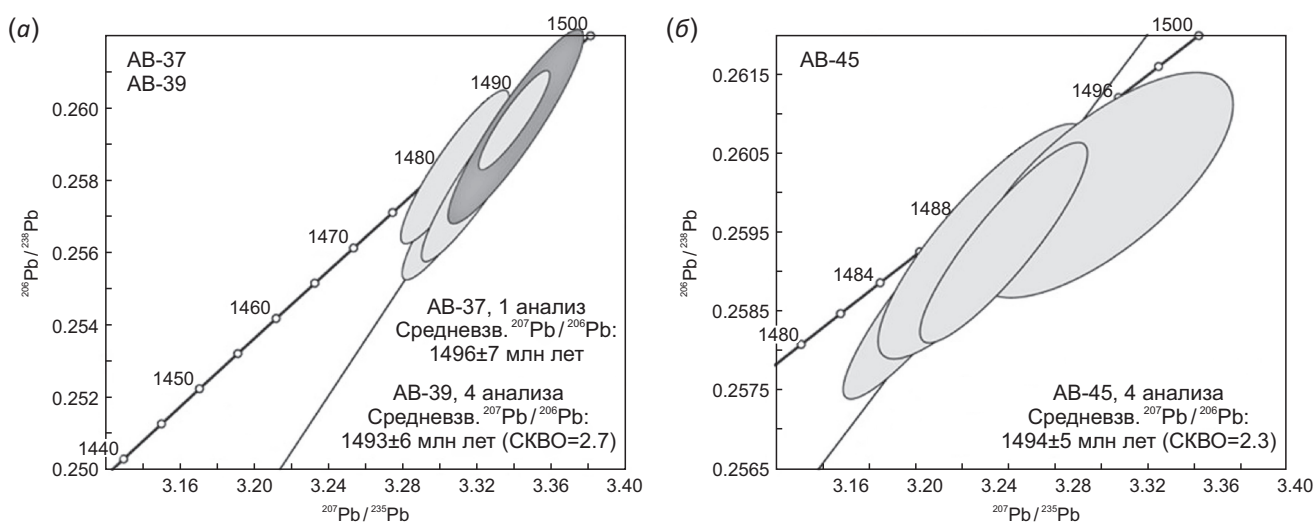


Рис. 5. Диаграммы с конкордией по результатам U-Pb ID-TIMS датирования бадделеита. (а) – данные для даек АВ-37 (темно-серый цвет) и АВ-39 (светло-серый цвет); (б) – данные для дайки АВ-45. Штриховые линии – дискордии, направленные к началу координат.

Fig. 5. Concordia diagrams showing U-Pb baddeleyite ID-TIMS results. (а) – data for samples AB-37 (dark grey) and AB-39 (light-grey); (б) – for sample AB-45. Dashed lines represent regressions anchored at 0 Ma.

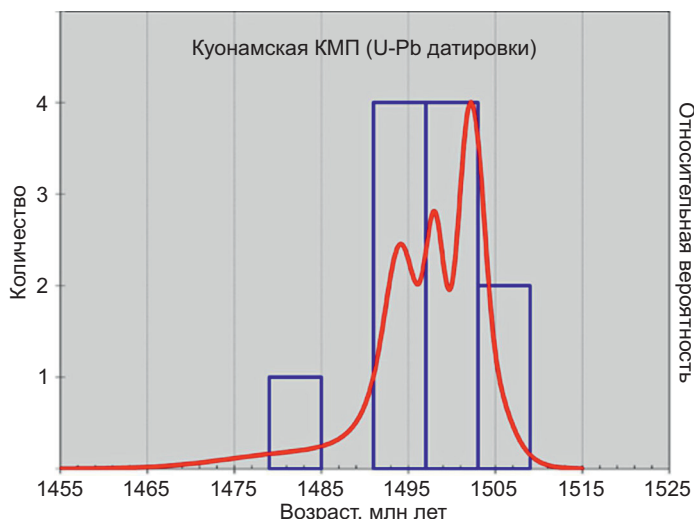


Рис. 6. Гистограмма распределения U-Pb возрастов для даек и силлов Куонамской КМП. График построен с использованием Isoplot 4.15 [Ludwig, 2012].

Fig. 6. Cumulative U-Pb age spectrum for the Kuonamka LIP. Plot produced using Isoplot 4.15 [Ludwig, 2012].

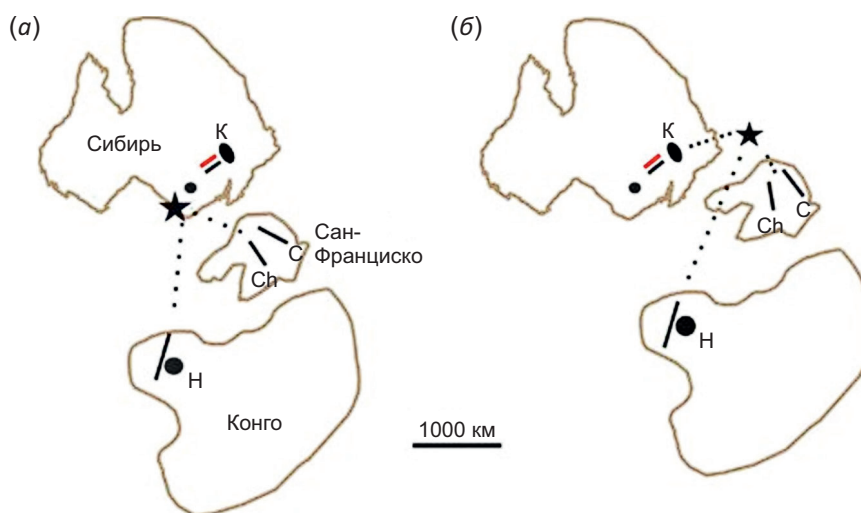


Рис. 7. Две альтернативные реконструкции магматизма возраста 1500 млн лет севера Сибири с объединенным кратоном Сан-Франциско-Конго по [Ernst et al., 2016b].

(a) – модифицированный вариант из [Ernst et al., 2013] с интерпретируемым плюмом, расположенным на востоке Сибирского кратона; (б) – модифицированный вариант по [Cederberg et al., 2016] с интерпретируемым плюмом, расположенным на западе Сибирского кратона. К – Куонамская КМП, состоящая из силлов Западного Анабара (черный овал), даек Куонамского роя (черная линия), силлов Оленекского поднятия (малый круг) и даек Кенгединского роя (красная линия), описанных в данной статье; С – дайки Курака и Ch – дайки Шапада-Диамантина (кратон Сан-Франциско); Н – дайки и силлы Хумпата кратона Конго.

Fig. 7. 1500 Ma magmatism superimposed on two alternative reconstruction of northern Siberia with the combined São Francisco-Congo craton after [Ernst et al., 2016b].

(a) – modified from [Ernst et al., 2013] with the interpreted plume located east of the Siberian craton; (б) – modified from [Cederberg et al., 2016] with the interpreted plume located to the west of the Siberian craton. K = Kuonamka LIP consisting of Western Anabar sills (black oval), Kuonamka subswarm (black line), Olenek sills (small circle) and Kengede subswarm (red line), the latter identified herein; C, Curaça; Ch, Chapada Diamantina dykes of the Sao Francisco craton; H, Humpata sills and dykes of the Congo craton.

даек у восточного или западного края Сибирского кратона. Крупномасштабная Куонамская КМП возраста 1501 млн лет, которая простирается на 700 км в Северной Сибири (от Анабарского щита до Оленекского поднятия), могла временно коррелировать с дайками и силлами в ранее присоединенном кратоне Сан-Франциско-Конго (рис. 7), что согласуется с палеомагнитными данными [Ernst et al., 2013]. Это могло привести к извержению большого объема магмы, охватившему

территорию протяженностью более 2000 км, и представило бы особо крупную КМП [Ernst et al., 2016b].

4. МЕДНО-НИКЕЛЕВОЕ СУЛЬФИДНОЕ РУДОПРОЯВЛЕНИЕ В ДОЛЕРИТАХ КЕНГЕДИНСКОГО И ВОСТОЧНО-АНАБАРСКОГО РОЕВ

С крупными изверженными провинциями нередко связаны и крупные рудные месторождения [Naldrett, 2010; Ernst, Jowitt, 2013; Smith, Maier, 2021; и др.]. Как

известно, наиболее продуктивные сульфидные PGE-Cu-Ni месторождения в основном связаны с комплексом докембрийских базит-ультрабазитовых пород: Канадский щит (Садбери, Томпсон), Балтийский (Мончегорское и др.), Австралийский – (Камбалда) и др. Протерозойские платиноносные массивы юга Сибири, приуроченные к КМП, рассмотрены в работе [Mekhonoshin et al., 2016]. Фанерозойская эпоха в целом бедна сульфидоносными магматическими образованиями, за исключением норильских месторождений – крупнейших среди подобных месторождений [Genkin et al., 1981; Distler et al., 1988; Likhachev, 2006; Smith, Maier, 2021].

Например, в пределах дайкового пояса Маккензи с возрастом 1270 млн лет [Baragar et al., 1996; Blanchard et al., 2017] наличие двух узких роев даек, разделенных бедной дайками зоной шириной 50 км, может указывать на боковое внедрение этих роев от разных расслоенных интрузивов, расположенных вокруг общего центра плюма, формирующего КМП (рис. 8). Анализ поведения халькофильных элементов и формы их минеральных выделений в таких дайковых роях может быть полезной стратегией для оценки рудного потенциала в магматических камерах потенциального источника [Jowitt, Ernst, 2013; Ernst, Jowitt, 2013]. Если истощение халькофильными элементами наблюдается в одном из этих роев или в обоих (рис. 8, S1 или S2), то соответствующая расслоенная интрузия (M-UM-1 или M-UM-2) может быть обогащена такими халькофильными элементами и, таким образом, может обладать рудным потенциалом. Радиус центральной области плюма оценивается от нескольких сотен километров до примерно 500 км, а рой даек S1 и S2 могут распространяться по меньшей мере на расстояние многих сотен километров от центра плюма.

S1 и S2 – это суброи даек 1 и 2, аналогичные Куонамскому и Кенгединскому дайковым роям в этом исследовании. M-UM-1 и 2 представляют собой расслоенные интрузии вблизи центра плюма, которые, как

предполагается, питают подземные магматические потоки. В этом случае центр шлейфа может быть расположен к востоку, но в случае Куонамского пояса остается возможным расположение центра шлейфа к западу. В связи с такой моделью формирования потенциально рудоносных магматитов рассмотрены некоторые примеры медно-никелевых сульфидных рудопроявлений в долеритах Кенгединского и Восточно-Анабарского дайковых роев. Они имеют очень ограниченное распространение и небольшие размеры, и неизвестно место расположения центра плюма, поэтому авторы не могут прогнозировать места локализации расслоенных интрузивов с потенциальной рудоносностью.

В пределах Кенгединского роя в долеритах Харапской и Буджурхайской даек были установлены зоны с вкрапленной и прожилково-вкрапленной сульфидной медно-никелевой минерализацией [Mashchak, 1969; Oleinikov et al., 1983]. Такие зоны приурочены к такситовым диабазам и прослеживаются на сотни метров, имеют ширину 2–6 м, а в локальных раздувах – до 8–9 м. Контуры оруденелых зон нечеткие, содержание сульфидов обычно составляет 1–5 %, реже достигает 10–15 %. Размер вкрапленников сульфидов колеблется от долей миллиметров до 5–10 мм. Контуры мелких вкрапленников неправильно-угловатые, обусловленные их интерстициальным положением. Состав их однообразен и представлен пирротинном (90–95 %) и халькопиритом. Крупные шлировые обособления сульфидов имеют неправильную, реже – изометричную форму размером до 15–60 мм. Главные минералы шлиров – титаномагнетит, кубанит, халькопирит, пирротин, а второстепенные – пентландит, макиновит, виоларит, валлериит, бравоит, миллерит, борнит, пирит.

Кроме этого, на восточном склоне Анабарского щита, в глыбе долеритов (образец Л-1388) на террасе р. Большая Куонамка в 18 км ниже устья притока Джюкен (см. рис. 1), были обнаружены [Okrugin et al., 2021] визуально определяемые округлые сульфидные

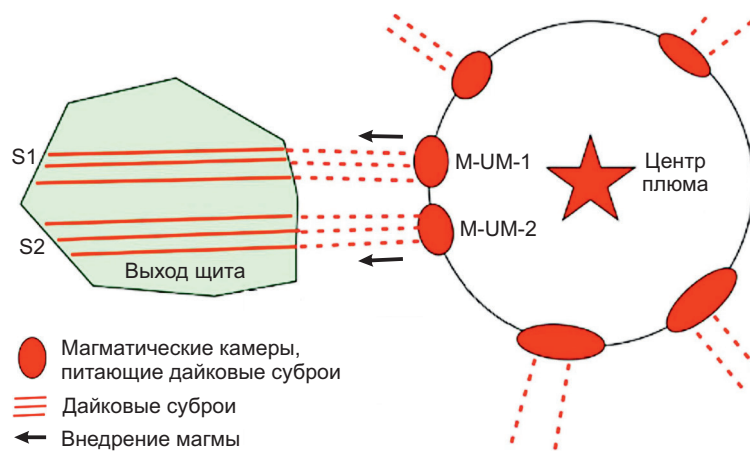


Рис. 8. Боковое питание суброев даек (S1 и S2) от кольцевых мафит-ультрамафитовых очагов (M-UM-1,2) из области центра плюма, модель по [Baragar et al., 1996; Blanchard et al., 2017; Ernst et al., 2019].

Fig. 8. Lateral feeding of subswarms (S1 and S2) from a ring of mafic-ultramafic intrusions (M-UM-1,2) in the plume centre region, model after [Baragar et al., 1996; Blanchard et al., 2017; Ernst et al., 2019].

нодули размером от 1 до 10 мм в поперечнике (рис. 9, а). Основными минералами в сульфидных желваках являются пирротин и халькопирит, образующие тесные сростания (рис. 9, б). Вокруг желвака часто формируются скопления ограненных кристаллов или оплавленных индивидов титаномагнетита, которые ассоциируют с пирротин и апатитом (рис. 9, в). Кроме крупных округлых нодулей, в долеритах наблюдаются и мелкие обособленные капельки халькопирита и пирротина размером от первых микрометров до 0.1–0.2 мм (рис. 9, г). Остальные редкие сульфидные и сульфидоарсенидные минералы представлены зигенитом, герсдорфитом, галенитом, сфалеритом и другими неполностью диагностированными фазами.

Вмещающие эти сульфидные вкрапления долериты Л-1388 представлены среднезернистыми светлосерыми породами офитовой структуры, состоящими в основном из плагиоклаза, клинопироксена и титаномагнетита, реже содержащими КППШ, амфибол, ромбический пироксен, апатит, хлорит, цеолит, кварц, кальцит и ильменит. По петрографическим и геохимическим

особенностям долерит Л-1388 вполне соответствует таковым Куонамского и Кенгединского роев (см. рис. 4), хотя пространственно тяготеет к Восточно-Анабарскому рою.

Таким образом, можно заключить, что по минеральному составу сульфидные нодули долеритов Л-1388 аналогичны прожилково-вкрапленным медно-никелевым проявлениям из даек Кенгединского дайкового роя. Подобные ассоциации и типоморфные особенности редких сульфидов характерны для платиноидно-медно-никелевых руд норильских месторождений, а также медно-никелевых минерализаций ликвационного типа, связанных с дифференцированными докембрийскими комплексами мафит-ультрамафитовых пород других регионов. Все это позволяет предположить потенциальную возможность присутствия на Анабарском щите докембрийских базитов с PGE-Cu-Ni сульфидным оруденением [Okrugin et al., 2021]. Округлые выделения сульфидных нодулей свидетельствуют об их раннемагматической ликвационной природе в результате силикат-сульфидной жидкостной несмесимости.

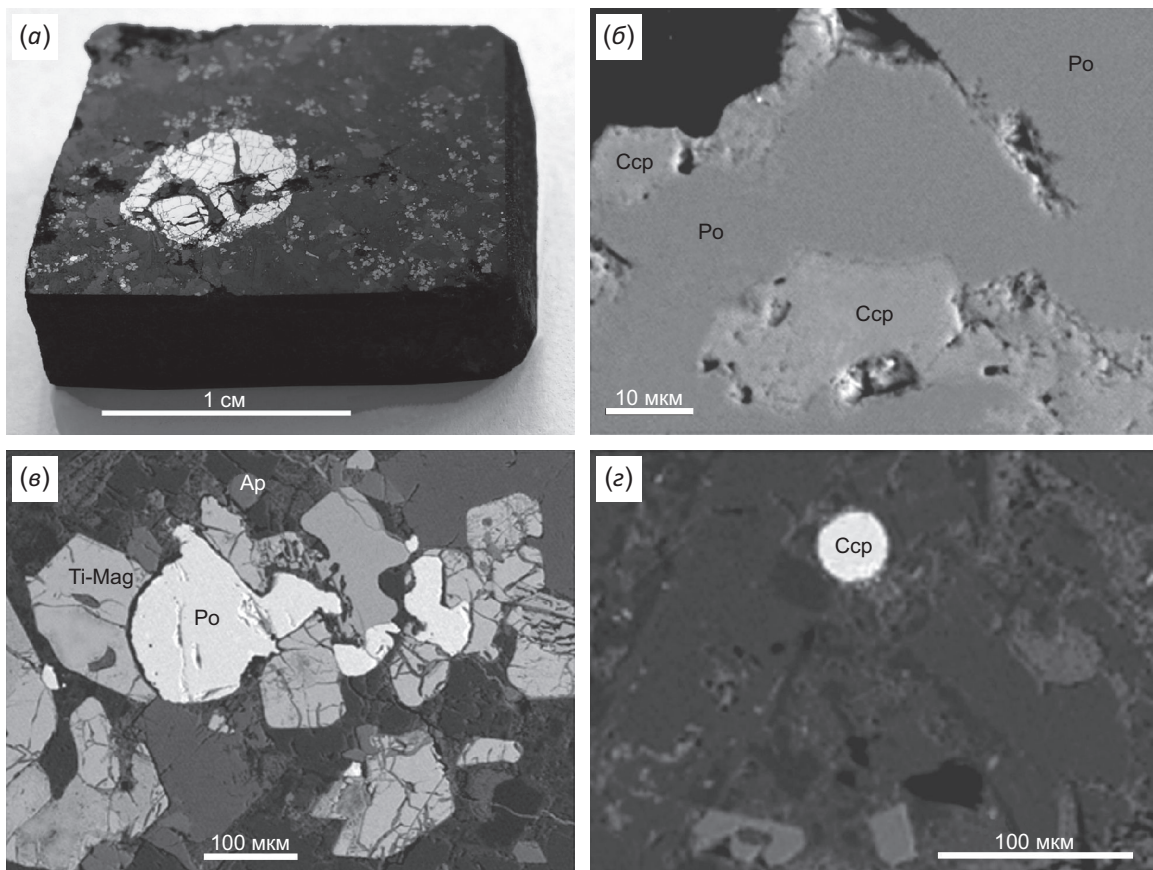


Рис. 9. Минералы сульфидного желвака в долеритах (обр. Л-1388) р. Большая Куонамка.

(а) – фотоснимок образца; (б) – сростание халькопирита (Сср) и пирротина (Ро); (в) – сегрегационный парагенезис апатита (Ар), титаномагнетита (Тi-Маг) и пирротина; (з) – каплевидное обособление халькопирита. (б, в) – снимки в обратнорассеянных электронах.

Fig. 9. Minerals of the sulfide nodule in the dolerites (sample L-1388) of the Bol'shaya Kuonamka River.

(а) – photo image of the polished sample; (б) – intergrowths of chalcopyrite (Ccp) and pyrrhotite (Po); (в) – segregation paragenesis of the apatite (Ap), titanomagnetite (Ti-Mag) and pyrrhotite; (з) – a drop-like inclusion of chalcopyrite. (б, в) – backscatter electron images.

При благоприятных условиях дифференциации больших объемов подобных ликватов могут формироваться богатые PGE-Cu-Ni сульфидные руды.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным U-Pb ID-TIMS датировок (1496 ± 7 , 1494 ± 3 и 1494 ± 5 млн лет) трех даек в ранее недатированном Кенгединском дайковом рою Анабарского щита Сибирского кратона показано, что этот рой является частью Куонамской крупной магматической провинции. Ранее выделенная Куонамская КМП простирается на 700 км от Анабарского щита до Оленекского поднятия в северной части Сибири и потенциально связана с одновозрастными дайками и силлами кратонов Сан-Франциско и Конго. Вновь датированные субширотные кенгединские дайки отделены от Куонамского роя (1501 млн лет) зоной шириной 50 км, бедной дайками, т.е. такой разрыв может быть объяснен внедрением даек этих роев в результате бокового питания из двух отдельных магматических камер, связанных с областью центра плюма, что подтверждается также сходством петрохимических особенностей даек. Расположение этого центра плюма может находиться на восточном или западном окончании указанных роев. Присутствие медно-никелевых сульфидных рудопроявлений, имеющих ограниченное значение и небольшие размеры, в долеритах Кенгединского и Восточно-Анабарского дайковых роев указывает на потенциальную возможность их связи с расслоенными интрузивами с PGE-Cu-Ni месторождениями.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны своим коллегам, принимавшим участие в полевых и лабораторных исследованиях, а также признательны рецензентам А.С. Мехоношину и А.К. Худолею за конструктивные замечания, которые позволили улучшить статью.

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

Baragar W.R.A., Ernst R.E., Hulbert L., Peterson T., 1996. Longitudinal Petrochemical Variation in the Mackenzie Dyke Swarm, Northwestern Canadian Shield. *Journal of Petrology* 37 (2), 317–359. <https://doi.org/10.1093/petrology/37.2.317>.

Blanchard J.A., Ernst R.E., Samson C., 2017. Gravity and Magnetic Modelling of Layered Mafic-Ultramafic Intrusions in Large Igneous Province Plume Centre Regions: Case Studies from the 1.27 Ga Mackenzie, 1.38 Ga Kunene-Kibaran, 0.06 Ga Deccan, and 0.13–0.08 Ga High Arctic Events. *Canadian Journal of Earth Sciences* 54 (3), 290–310. <https://doi.org/10.1139/cjes-2016-0132>.

Cederberg J., Söderlund U., Oliveira E.P., Ernst R.E., Pisarevsky S.A., 2016. U-Pb Baddeleyite Dating of the Proterozoic Pará de Minas Dike Swarm in the São Francisco Craton (Brazil) – Implications for Tectonic Correlation with Siberia, Congo and the North China Cratons. *GFF* 138 (1), 219–240. <https://doi.org/10.1080/11035897.2015.1093543>.

Distler V.V., Grokhovskaya T.L., Evstigneeva T.L., Sluzenkin S.F., Filimonova A.A., Duizikov O.A., Laputina I.P., 1988. Petrology of Sulfide Magmatic Ore Formation. Nauka, Moscow, 232 p. (in Russian) [Дистлер В.В., Гроховская Т.Л., Евстигнеева Т.Л., Служенкин С.Ф., Филимонова А.А., Дюжииков О.А., Лапутина И.П. Петрология сульфидного магматического рудообразования. М.: Наука, 1988. 232 с.].

Ernst R.E., Buchan K.L., Hamilton M.A., Okrugin A.V., Tomshin M.D., 2000. Integrated Paleomagnetism and U-Pb Geochronology of Mafic Dikes of the Eastern Anabar Shield Region, Siberia: Implications for Mesoproterozoic Paleolatitude of Siberia and Comparison with Laurentia. *The Journal of Geology* 108 (4), 381–401. <https://doi.org/10.1086/314413>.

Ernst R.E., Hamilton M.A., Söderlund U., Hanes J.A., Gladkochub D.P., Okrugin A.V., Kolotilina T., Mekhonoshin A.S., Bleeker W., LeCheminant A.N., Buchan K.L., Chamberlain K.R., Didenko A.N., 2016a. Southern Siberia and Northern Laurentia: Neighbours for a Quarter of Earth's History. *Nature Geosciences* 9, 464–469. <https://doi.org/10.1038/NNGEO2700>.

Ernst R.E., Jowitt S.M., 2013. Large Igneous Provinces (LIPs) and Metallogeny. In: M. Colpron, T. Bissig, B.G. Rusk, J.F.H. Thompson (Eds), *Tectonics, Metallogeny, and Discovery: The North American Cordillera and Similar Accretionary Settings*. Society of Economic Geologists Special Publication 17, 17–51. <https://doi.org/10.5382/SP.17.02>.

Ernst R.E., Liikane D.A., Jowitt S.M., Buchan K.L., Blanchard J.A., 2019. A New Plumbing System Framework for Mantle Plume-Related Continental Large Igneous Provinces and Their Mafic-Ultramafic Intrusions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 384, 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.07.007>.

Ernst R.E., Okrugin A.V., Veselovskiy R.V., Kamo S.L., Hamilton M.A., Pavlov V., Söderlund U., Chamberlain K.R., Rogers C., 2016b. The 1501 Ma Kuonamka Large Igneous Province of Northern Siberia: U-Pb Geochronology, Geochemistry, and Links with Coeval Magmatism on Other Crustal Blocks. *Russian Geology and Geophysics* 57 (5), 653–671. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.01.015>.

Ernst R.E., Pereira E., Hamilton M.A., Pisarevsky S.A., Rodrigues J., Tassinari C.C.G., Teixeira W., Van-Dunem V., 2013. Mesoproterozoic Intraplate Magmatic "Barcode" Record of the Angola Portion of the Congo Craton: Newly Dated Magmatic Events at 1500 and 1110 Ma and Implications

for Nuna Supercontinent Reconstructions. *Precambrian Research* 230, 103–118. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.01.010>.

Genkin A.D., Distler V.V., Gladyshev G.D., Filimonova A.A., Evstigneeva T.L., Kovalenker V.A., Laputina I.P., Smirnov A.V., Grohovskaja T.L., 1981. Sulfide Copper-Nickel Ores of the Norilsk Deposits. Nauka, Moscow, 234 p. (in Russian) [Генкин А.Д., Дистлер В.В., Гладышев Г.Д., Филимонова А.А., Евстигнеева Т.Л., Коваленкер В.А., Лапутина И.П., Смирнов А.В., Гроховская Т.Л. Сульфидные медно-никелевые руды норильских месторождений. М.: Наука, 1981. 234 с.].

Geological Map of Siberian Platform and Adjoining Areas, 1999. Scale 1:1500000. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg (in Russian) [Геологическая карта Сибирской платформы и прилегающих территорий. Масштаб 1:1500000. СПб.: ВСЕГЕИ, 1999].

Geological Map of the USSR, 1975. Scale 1:200000. Sheet R-49-XXVII, XXVIII. VSEGEI Publishing House, Leningrad (in Russian) [Геологическая карта СССР. Масштаб 1:200000. Лист R-49-XXVII, XXVIII. Л.: ВСЕГЕИ, 1975].

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Ernst R.E., Söderlund U., Mazukabzov A.M., Shokhonova M.N., 2019. Enlargement of the Area of the Timpton Large Igneous Province (ca. 1.75 Ga) of the Siberian Craton. *Geodynamics and Tectonophysics* 10 (4), 829–839 (in Russian) [Гладkochуб Д.П., Донская Т.В., Эрнст Р.Е., Седерлунд У., Мазукабзов А.М., Шохонова М.Н. Расширение ареала Тимптонской крупной магматической провинции (~1.75 млрд лет) Сибирского кратона. Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 4. С. 829–839]. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-4-0444>.

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Pisarevsky S.A., Ernst R.E., Söderlund U., Kotov A.B., Kovach V.P., Okrugin A.V., 2022. 1.79–1.75 Ga Mafic Magmatism of the Siberian Craton and Late Paleoproterozoic Paleogeography. *Precambrian Research* 370, 106557. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2022.106557>.

Gladkochub D.P., Pisarevsky S.A., Donskaya T.V., Ernst R.E., Wingate M.T., Söderlund U., Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., Hamilton M.A., Hanes J.A., 2010. Proterozoic Mafic Magmatism in Siberian Craton: An Overview and Implications for Paleocontinental Reconstruction. *Precambrian Research* 183 (3), 660–668. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.02.023>.

Gorokhov I.M., Kuznetsov A.B., Semikhatov M.A., Vasil'eva I.M., Rizvanova N.G., Lipenkov G.V., Dubinina E.O., 2019. Early Riphean Billyakh Group of the Anabar Uplift, North Siberia: C–O Isotopic Geochemistry and Pb–Pb Age of Dolomites. *Stratigraphy and Geological Correlation* 27, 514–528. <https://doi.org/10.1134/S0869593819050022>.

Jowitt S.M., Ernst R.E., 2013. Geochemical Assessment of the Metallogenic Potential of Proterozoic LIPs of Canada. *Lithos* 174, 291–307. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.03.026>.

Khudoley A., Chamberlain K., Ershova V., Sears J., Prokopyev A., MacLean J., Kazakova G., Malyshev S., Molchanov A., Kullerud K., Toro J., Miller E., Veselovskiy R., Li A., Chipley D., 2015. Proterozoic Supercontinental Restorations:

Constraints from Provenance Studies of Mesoproterozoic to Cambrian Clastic Rocks, Eastern Siberian Craton. *Precambrian Research* 259, 78–94. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.10.003>.

Koroleva O.V., Okrugin A.V., Rikhvanov L.P., 1999. Complex Dykes of the Anabar Massif – Indicators of Riftogenic Processes. In: *Geology and Tectonics of Platform and Orogenic Regions of Northeast Asia. Readings Dedicated to the 80th Anniversary of the Birth of Professor K.B. Mokshantsev. Materials of the Meeting. Vol. 2. Yakutian Scientific Center SB RAS, Yakutsk*, p. 80–84 (in Russian) [Королева О.В., Округин А.В., Рихванов Л.П. Сложные дайки Анабарского массива – индикаторы рифтогенных процессов // Геология и тектоника платформ и орогенных областей северо-востока Азии. Чтения к 80-летию со дня рождения профессора К.Б. Мокшанцева: Материалы совещания. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1999. Т. 2. С. 80–84].

Likhachev A.P., 2006. Platinum-Nickel-Copper and Platinum Deposits. Aslan, Moscow, 496 p. (in Russian) [Лихачев А.П. Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. М.: Эслан, 2006. 496 с.].

Ludwig K.R., 2012. ISOPLOT 3.75. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. User's Manual. Berkeley Geochronology Center Special Publication 5, 75 p.

Malyshev S.V., Pasenko A.M., Ivanov A.V., Gladkochub D.P., Savatenkov V.M., Meffre S., Abersteiner A., Kamenetsky V.S., Shcherbakov V.D., 2018. Geodynamic Significance of the Mesoproterozoic Magmatism of the Udzha Paleo-Rift (Northern Siberian Craton) Based on U–Pb Geochronology and Paleomagnetic Data. *Minerals* 8 (12), 555. <https://doi.org/10.3390/min8120555>.

Mashchak M.S., 1969. Sulfide Copper-Nickel Ore Occurrences in Proterozoic Diabase Dikes of the Southern Slope of the Anabar Shield. *Geology of Ore Deposits* 6, 74–78 (in Russian) [Мащак М.С. Сульфидные медно-никелевые рудопоявления в протерозойских дайках диабазов южного склона Анабарского щита // Геология рудных месторождений. 1969. № 6. С. 74–78].

Mashchak M.S., 1970. Trap Magmatism of the Southern Slope of the Anabar Shield. In: A.M. Vilenskiy (Ed.), *Geology and Petrology of Intrusive Traps of the Siberian Platform*. Nauka, Moscow, p. 34–48 (in Russian) [Мащак М.С. Трапповый магматизм южного склона Анабарского щита // Геология и петрология интрузивных траппов Сибирской платформы / Ред. А.М. Виленский. М.: Наука, 1970. С. 34–48].

Mekhonoshin A.S., Ernst R., Söderlund U., Hamilton M.A., Kolotilina T.B., Izokh A.E., Polyakov G.V., Tolstykh N.D., 2016. Relationship of Platinum-bearing Ultramafic-Mafic Intrusions and Large Igneous Provinces (exemplified by the Siberian Craton). *Russian Geology and Geophysics* 57 (5), 822–833. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.09.020>.

Naldrett A.J., 2010. Secular Variation of Magmatic Sulfide Deposits and Their Source Magmas. *Economic Geology* 105 (3), 669–688. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.669>.

Okrugin A.V., Oleinikov B.V., Savvinov V.T., Tomshin M.D., 1990. Late Precambrian Dyke Swarms of the Anabar Massif,

Siberian Platform, USSR. In: A.J. Parker, P.C. Rickwood, D.H. Tucker (Eds), *Mafic Dykes and Emplacement Mechanisms. Proceedings of the Second International Dyke Conference (September 12–16, 1990, Adelaide, South Australia)*. Balkema, Rotterdam, p. 529–533.

Okrugin A.V., Zemnukhov A.L., Zhuravlev A.I., 2021. Copper-Nickel Sulfide Mineral Occurrence in Dolerites of the Eastern Slope of the Anabar Shield. *Arctic and Subarctic Natural Resources* 26 (4), 16–28 (in Russian) [Округин А.В., Земнухов А.Л., Журавлев А.И. Медно-никелевое сульфидное рудопроявление в долеритах восточного склона Анабарского щита // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26. № 4. С. 16–28]. DOI:10.31242/2618-9712-2021-26-4-16-28.

Oleinikov B.V., Mashchak M.S., Kolodeznikov I.I., Kopylova A.G., Savvinov V.T., Tomshin M.D., Tulasynov B.N., 1983. *Petrology and Geochemistry of Basites Intrusions of the Siberian Platform*. Nauka, Novosibirsk, 208 p. (in Russian) [Олейников Б.В., Мащак М.С., Колодезников И.И., Копылова А.Г., Саввинов В.Т., Томшин М.Д., Туласынов Б.Н. Петрология и геохимия позднедокембрийских интрузивных базитов Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 1983. 207 с.].

Pearce J.A., Cann J.R., 1973. Tectonic Setting of Basic Volcanic Rocks Determined Using Trace Element Analyses. *Earth and Planetary Science Letters* 19 (2), 290–300. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(73\)90129-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(73)90129-5).

Priyatkina N., Collins W.J., Khudoley A., Zastrozhnov D., Ershova V., Chamberlain K., Shatsillo A., Proskurnin V., 2017. The Proterozoic Evolution of Northern Siberian Craton Margin: A Comparison of U-Pb-Hf Signatures from Sedimentary Units of the Taimyr Orogenic Belt and the Siberian Platform. *International Geology Review* 59 (13), 1632–1656. <https://doi.org/10.1080/00206814.2017.1289341>.

Shervais J.W., 1982. Ti-V Plots and the Petrogenesis of Modern and Ophiolitic Lavas. *Earth and Planetary Science Letters* 59 (1), 101–118. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(82\)90120-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(82)90120-0).

Smith W.D., Maier W.D., 2021. The Geotectonic Setting, Age and Mineral Deposit Inventory of Global Layered Intrusions. *Earth-Science Reviews* 220, 103736. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103736>.

Söderlund U., Johansson L., 2002. A Simple Way to Extract Baddeleyite (ZrO₂). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 3 (2). <https://doi.org/10.1029/2001GC000212>.

Stacey J.S., Kramers J.D., 1975. Approximation of Terrestrial Lead Isotope Evolution by a Two-Stage Model. *Earth and Planetary Science Letters* 26 (2), 207–221. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(75\)90088-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(75)90088-6).

State Geological Map of the USSR, 1983. Scale 1:1000000. Sheet R-48-(50) (Olenek). VSEGEI Publishing House, Leningrad (in Russian) [Государственная геологическая карта СССР. Масштаб 1:1000000. Лист R-48-(50) (Оленёк). Л.: ВСЕГЕИ, 1983].