

Медно-никелевое сульфидное рудопроявление в долеритах восточного склона Анабарского щита

А.В. Округин^{1,*}, А. Л. Земнухов², А.И. Журавлев¹

¹Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

²АО «Алмазы Анабара», Якутск, Россия

*okrugin@diamond.ysn.ru

Аннотация. Приводится описание сульфидных нодулей из глыбы долеритов, найденной на террасе р. Большая Куонамка на восточном борту Анабарского щита (северо-восток Сибирской платформы). Долериты представлены среднезернистыми породами с офитовой структурой, состоят в основном из плагиоклаза, клинопироксена и титаномagnetита, реже встречаются КППШ, амфибол, ромбический пироксен, апатит хлорит, цеолит, кварц, кальцит и ильменит. По химическому составу и структуре эти долериты похожи на докембрийские субщелочные долериты. Сульфиды в изученных долеритах встречаются в виде отдельных сегрегаций округлой формы размером до 8 мм, состоящие в основном из пирротина и халькопирита. Часто встречаются мелкие (от первых мкм до 0,5 мм) каплевидные выделения пирротина и халькопирита. Такие формы выделений сульфидных минералов свидетельствуют о том, что при слиянии первичных мелких сульфидных капелек, не смешивающихся с силикатной магмой, формируются крупные желваки. В сульфидных сегрегациях реже встречаются зигенит $(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Fe})_3\text{S}_4$, герсдорфит NiAsS с высоким содержанием Fe до 6 %, Co до 12 % и Sb до 3 %, галенит, сфалерит и другие. Сульфидные минералы часто тяготеют к скоплениям Ti-магнетита и апатита, образуя тесные сульфид-apatит-титаномagnetитовые обособления. Наличие в магматических породах ликвационных сульфидных обособлений является одним из важных критериев насыщенности магматических расплавов сульфидами, свидетельствующим об их потенциальной рудоносности. Подобная форма и аналогичная ассоциация сульфидных минералов характерна для платиноидно-медно-никелевых сульфидных месторождений Норильского района. Прожилково-вкрапленная медно-никелевая минерализация известна в такситовых габбро-долеритах Будьурхайской дайки по р. Кенгеде, что позволяет предположить возможное присутствие на Анабарском щите докембрийских базитов с Cu–Ni сульфидным оруденением.

Ключевые слова: медно-никелевые руды, сульфиды, долериты, Сибирская платформа, Анабарский щит.

Благодарности. Авторы благодарят коллег, участвовавших в выполнении полевых работ: Андросова А.Р. – начальника и Находкина А.П. – геолога горно-проходческого отряда № 1 ГРП «Куонамская», а также ведущих инженеров ИГАБМ Христофорову Н.В., Самсонову О.К., Васильеву А.С., Замийскую О.Д. и Васильеву Т.И. за проведение аналитических исследований. Работа выполнена в рамках НИР ИГАБМ СО РАН (№ 0381-2019-0003).

Введение

Крупные сульфидные PGE–Cu–Ni-месторождения в основном связаны с комплексом докембрийских базит-ультрабазитовых пород: Канадский щит (Садбери, Томпсон), Балтийский щит (Мончегорское и др.), Австралия – (Камбалда) и др. Фанерозойская эпоха в целом бедна проявлением сульфидоносных магматических образований, за исключением Норильских месторождений – крупнейших среди подобных месторождений [1–3].

Одним из важных критериев насыщенности сульфидами магматических расплавов, которые могут быть потенциальными источниками, является наличие в них ликвационных сульфидных обособлений. В связи с этим в данном сообщении нами обсуждаются типоморфные особенности сульфидных минералов, слагающих нодулярные выделения ликвационного типа, обнаруженных в долеритах на восточном склоне Анабарского щита. Также рассматриваются минералого-геохимические характеристики долеритов в сопо-

ставлении с базитами восточной части Анабарского массива с целью оценки потенциальной медно-никелевой рудоносности данного района. Подобные исследования имеют не только научное значение, но и практический интерес с точки зрения комплексного изучения металлоносности всего Восточного Прианабарья. Этот район является

одним из самых перспективных Арктических районов Якутии, где сосредоточены крупные загадочные россыпные месторождения алмазов с попутными благородными металлами – платиной и золотом, а также уникальное в мире Томторское месторождение с богатейшими содержаниями ниобий-редкоземельных металлов (рис. 1).

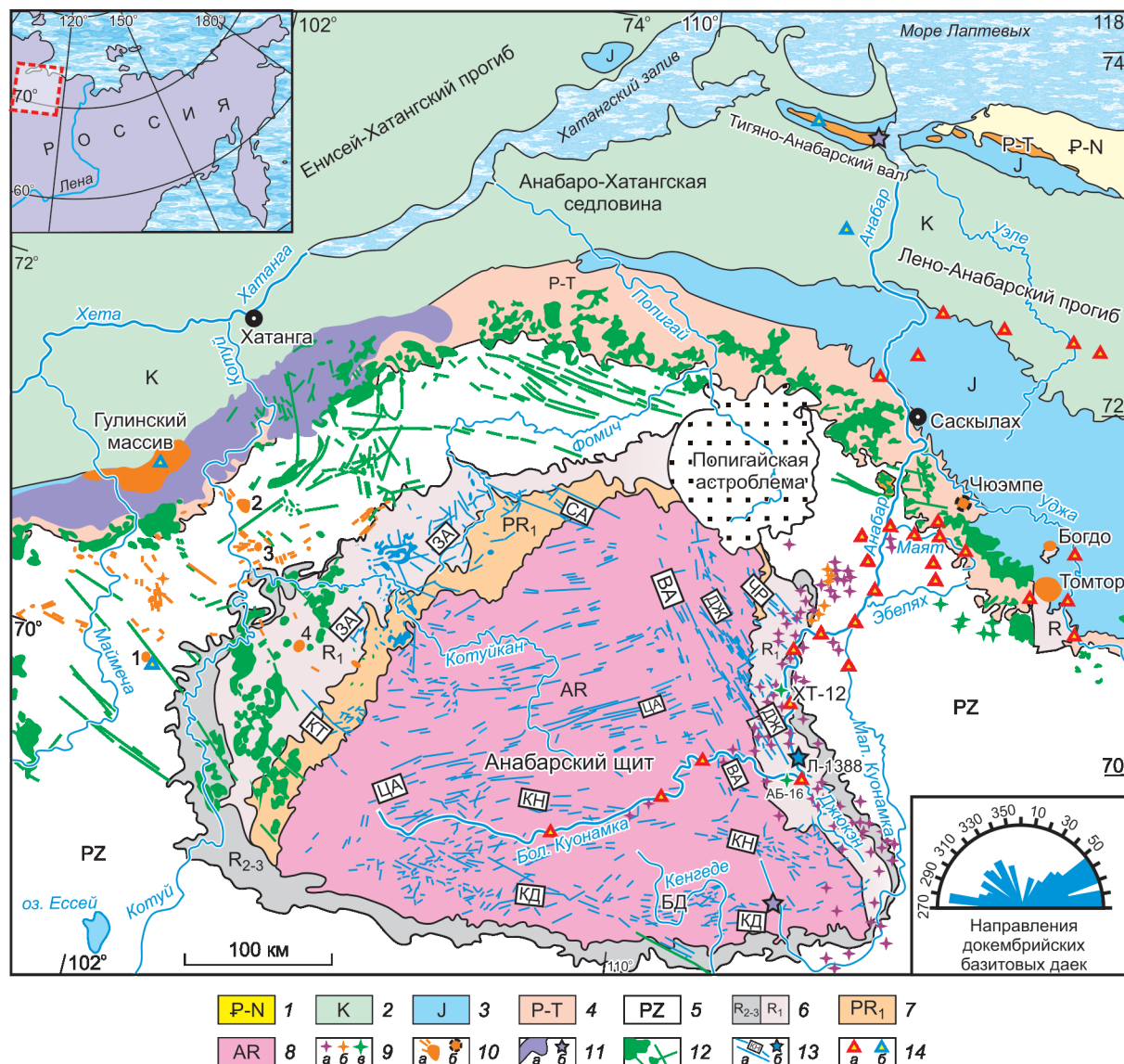


Рис. 1. Схема распространения магматитов и золотоплатиноносных россыпей проявлений на севере Сибирской платформы.

1 – палеоген-неогеновые осадки; 2 – меловые пески, алевролиты и галечники; 3 – юрские конгломераты, песчаники, алевролиты; 4 – пермские и триасовые песчаники, алевролиты; 5 – палеозойские доломиты, известняки, мергели и песчаники; 6 – средне-верхнерифейские (R_{2-3} – 1400–600 млн лет) и нижнерифейские (R_1 – 1650–1400 млн лет) конгломераты, песчаники, алевролиты, аргиллиты и доломиты; 7 – нижнепротерозойские породы (1900–1650 млн лет); 8 – архейские метаморфические комплексы; 9 – кимберлитовые (а), карбонатитовые (б) и базитовые (в – ХТ-12, АБ-16 и др.) трубки; 10 – интрузии и дайки щелочных и ультраосновных пород с карбонатами: а – установленные (1 – Гули, 2 – Бор-Урах, 3 – Одихинча, 4 – Кугда, 5 – Маган; Томгор, Богдо и др.), б – предполагаемые (8 – Чюэмпэ); 11 – эффузивы базальтов и щелочных базальтоидов (а) и пикритобазальты устья р. Анабар и дайка мейчметиподобных пород в верховьях р. Малая Куонамка [26] (б); 12 – силы и дайки Р-Т долеритов и трахидолеритов; 13 – (а) позднекокембрийские дайковые пояса (ДЖ – Джукенский, ВА – Восточно-

Анабарский, ЗА – Западно-Анабарский, КД – Кенгединский, КН – Куонамский, КТ – Котуйский, СА – Северо-Анабарский, ЧР – Чирээсский) базитов (БД – Будурхайская дайка), (б) место находки долерита Л-1388; 14 – россыпи золота с Fe-Pt (а) и Ir-Os минералами (б). Построена на основе геологической карты Сибирской платформы масштаба 1:1 500 000, 1999 г. Отделы докембрийского периода даны в соответствии с Международной стратиграфической шкалой 2006 г.

Fig. 1. Scheme of distribution of magmatites and gold-platinum-bearing placers in the north of the Siberian platform.

1 – Paleogene-Neogene sediments; 2 – Cretaceous sands, silts and gravels; 3 – Jurassic conglomerates, sandstones, siltstones; 4 – Permian and Triassic sandstones, siltstones; 5 – Paleozoic dolomites, limestones, marlstones and sandstones; 6 – middle-upper Riphean (R_{2-3} – 1400–600 Ma) and lower Riphean (R_1 – 1650–1400 Ma) conglomerates, sandstones, siltstones, argillite and dolomites; 7 – Lower Proterozoic rocks (1900–1650 Ma); 8 – Archean metamorphic complexes; 9 – kimberlite (а), carbonatite (б) and basite (в – XT-12, AB-16 et al.) pipes; 10 – intrusions and dikes of alkaline and ultrabasic rocks with carbonatites: а – founded (1 – Guli, 2 – Bor-Uryakh, 3 – Odikhincha, 4 – Kugda, 5 – Magan, 6 – Tomtor, 7 – Bogdo, etc.), б – supposed (8 – Chuempе); 11 – effusive basalts and alkaline basaltoids (а) and picrite-basalts, the estuary of the r. Anabar and similar to meimechites dyke, upper reaches of the r. Malaya Kuonamka [26] (б); 12 – sills and dikes of P – T dolerites and trachydolerites; 13 – (а) Late Precambrian dyke swarms (ДЖ – Djukensky, ВА – Vostochno-Anabarsky, ЗА – Zapadno-Anabarsky, КД – Kengedinsky, КН – Kuonamsky, КТ – Kotuysky, СА – Severo-Anabarsky, and ЧР – Chiersky swarms; КД – Budyurhai dyke); (б) – location of the dolerite sample L-1388; 14 – placers of gold with Fe-Pt (а) and Ir-Os minerals (б). Constructed on the basis of a geological map of the Siberian platform with scale 1:1500000, 1999. Precambrian divisions are given in accordance with the International Stratigraphic Chart, 2006.

Фактический материал и методы исследований

В ходе проведения АО «Алмазы Анабара» поисково-оценочных работ на участке «Средний» россыпного месторождения алмазов р. Большая Куонамка в декабре 2019 г. в глыбе долеритов (образец Л-1388), поднятой с глубины около 8 м (в шурфе 44л разведочной линии 1388) на террасе р. Большая Куонамка, в 18 км ниже устья притока Джюкен, были обнаружены визуально определяемые округлые сульфидные нодулы размером от 1 до 10 мм в поперечнике.

Подготовка проб и изучение образца Л-1388 проводились традиционными способами с применением оптических методов. Состав минералов долеритов и сульфидных обособлений в них определялся на микрозондовом анализаторе Camebax-Micro французской фирмы Cameca, а их микроструктурные взаимоотношения изучались на сканирующем микроскопе JSM-6480LV японской фирмы JEOL в лаборатории рентгено-спектральных методов анализа в ИГАБМ СО РАН. В качестве эталонов применялись стандартизированные минералы, чистые металлы и их сплавы. Режимы съемки: 20 кВ, ток 30 нА, время 7 с. Рентгенофазовый анализ выполнен на дифрактометре D2 PHASER, CuK_α -излучение, 30 кВ, 10 мА, для диагностики минералов использована база данных PDF-2. Силикатные и полуколичественные спектральные анализы долеритов выполнены также в лабораториях нашего института.

Вещественный состав долеритов Л-1388

Вмещающие сульфидные вкрапления долериты Л-1388 представлены среднезернистыми светло-серыми породами офитовой структуры

(рис. 2), состоящими в основном из плагиоклаза, клинопироксена и титаномагнетита, реже содержащими КППШ, амфибол, ромбический пироксен, апатит хлорит, цеолит, кварц, кальцит и ильменит. Пластинчатые кристаллы плагиоклаза, размером до 5 мм в удлинении занимают примерно половину объема породы. Они, по данным микрозондового анализа, имеют состав от лабрадора (An_{57}) до андезина (Ab_{65}) с ортоклазовым компонентом от 3 до 13 % соответственно и находятся в мелкозернистой основной массе, состоящей из авгита (30–35 %), Ti-магнетита (3–5 %, местами до 10 %), реже КППШ, амфибола, ромбического пироксена, псевдоморфоз по оливину (?).

Авгит состава ($\text{Wo}_{31-40}\text{En}_{40-45}\text{Fs}_{18-26}$) представлен призматическими зернами и изометричными выделениями неправильной формы размером до 1 мм. Титаномагнетит обычно образует отдельные хорошо ограниченные полигональные кристаллы размером 0,1–0,5 мм. Кроме постоянной примеси TiO_2 (19–24 %) магнетит содержит Al_2O_3 (1,2–3,3 %), MnO (0,6–1,3 %), MgO (0,2–1,3 %) и Cr_2O_3 (до 0,12 %). Редкие мелкие пластинчатые зерна ильменита содержат незначительные примеси MgO (0,9–2 %), MnO (0,6–1,2 %) и Al_2O_3 (до 0,5 %).

В породе редко встречаются псевдоморфозы по округлым зернам (оливина?) размером 0,1–0,5 мм, находящимся в виде включений в плагиоклазе или в основной массе. По пироксену развивается амфибол, по составу отвечающий обыкновенной роговой обманке. Были также зафиксированы клиноэнстатит ($\text{Wo}_{4,6}\text{En}_{64}\text{Fs}_{31,4}$) и пижонит ($\text{Wo}_{13}\text{En}_{56}\text{Fs}_{31}$), кальцит, цеолиты и кварц. В основной массе наблюдаются мельчайшие гексагональные призматические кри-

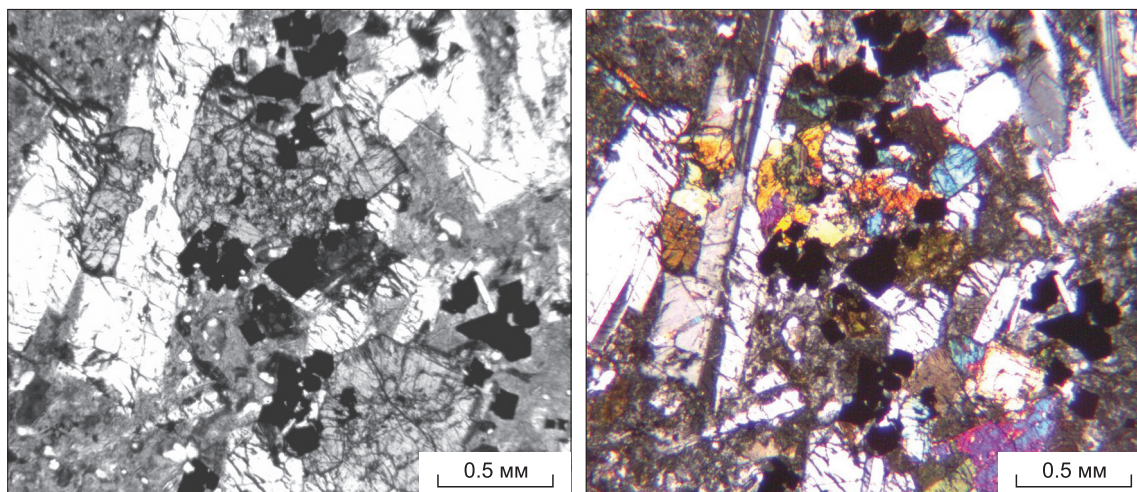


Рис. 2. Офитовая структура долеритов Л-1388, справа снимок при скрещенных николях. Белые таблитчатые вкрапления – плагиоклаз; округлые яркоокрашенные зерна – авгит; черные полигональные кристаллики – титаномagnetит; темно-серые мутные интерстиционные выделения – вторичные минералы.

Fig. 2. Ophitic texture of the dolerite L-1388, on the right is a picture with crossed nicols. White tabular phenocrysts – plagioclase; rounded vivid colored grains – augite; black polygonal crystals – titanomagnetite; dark-grey cloudy interstice precipitates – secondary minerals.

сталлики апатита до 0,1–0,5 мм в длину, содержащего F от 2,6 до 5,6 %.

Долерит Л-1388 по составу на классификационной диаграмме кремнезем–сумма щелочей (рис. 3), согласно Петрографическому кодексу России 2008 г., попадает в поле базальтов (Б). На этой диаграмме составы докембрийских базитов Анабарского массива образуют протяженную серию пород, занимающих преимущественно широкую промежуточную полосу между нормально щелочными базальтами (Б) – андезибазальтами (АБ) и трахибазальтами (ТБ) – трахиандезибазальтами (ТАБ). В редких сложных дифференцированных многофазных дайках появляются кварцевые габбро-диориты и кварцевые монзонит-порфиры, переходящие в области андезитов (А) и трахиандезитов (ТА). Это обусловлено дифференциацией расплава как *in situ*, так и в протяженных магматических каналах. Отдельные разрозненные маломощные тела сложены однородными породами, но они могут резко различаться по составу, что объясняется поступлением разных дифференциатов магмы из глубинных очагов.

Первые доказательства рифейского возраста базитов Анабарского массива были приведены в работах Е.С. Кутейникова, М.С. Машака, Л.П. Белякова, В.Л. Масайтиса и других [4, 5; и др.]. В результате проведенных нами исследований базитов бассейнов рек Большая Куонамка, Хаптасынна и Котуйкан по петрохимическим осо-

бенностям были выделены три группы базитов [6]. Проявления базитового магматизма более позднего возраста, аналогичные толеитовым долеритам трапповой формации, широко развиты в основном на западном склоне Анабарского щита (276–406 млн лет, К–Аг-определения). В пределах Анабарского щита докембрийские базиты образуют протяженные дайковые рои длиной до 200–300 км и шириной до нескольких десятков км (см. рис. 1). По простираю, геологическому положению и особенностям состава пород даек нами были выделены следующие дайковые пояса: Кенгединский (КД), Куонамский (КН), Центрально-Анабарский (ЦА), Котуйканский (КК), Северо-Анабарский (СА), Восточно-Анабарский (ВА), Джюкенский (ДЖ), Чиэрэсский (ЧР), Котуйский (КТ) и Западно-Анабарский (ЗА) [7]. Протяженность отдельных даек колеблется от десятков метров до нескольких км при мощности от первых метров до 100–200 м. Падение тел крутое, мелкие дайки имеют в плане линзовидные выклинивающиеся формы. Нашими последующими исследованиями базитов Анабарского щита на основе прецизионных определений возраста (U–Pb-датирования) даек под руководством канадского ученого Ричарда Эрнста было установлено, что на Анабарском щите формирование Куонамского (КН) дайкового пояса происходило 1500 млн лет назад [8], а Чиэрэсского (ЧР) и Восточно-Анабарского (ВА) поясов 1380 млн лет назад [9–11].

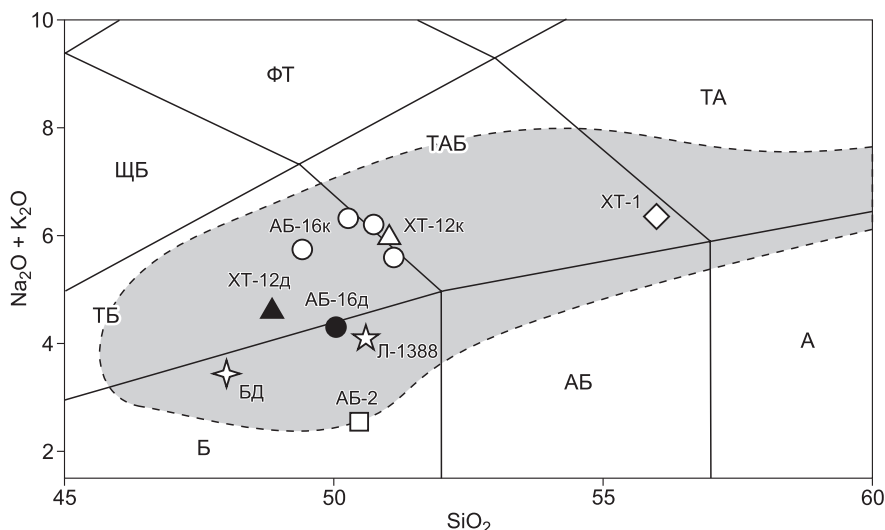


Рис. 3. Составы позднедокембрийских базитов Анабарского щита.

Номера у символов соответствуют номерам проб в табл. 1. Серое поле – составы позднедокембрийских базитов Анабарского щита, остальные пояснения в тексте.

Fig. 3. Compositions of Late Precambrian dykes in the Anabar shield.

Numbers at the symbols correspond to the numbers of the samples in Table 1. Grey field – compositions of Late Precambrian basites in the Anabar shield, other explanations in the text.

По составу изученные долериты Л-1388 (см. табл. 1) наиболее близки долеритам АБ-16д из дайки сложного строения, состоящего в основном из миндалекаменных калиевых магматитов АБ-16к. Эта дайка принадлежит Джюкенскому (ДЖ) поясу, и долериты в ней встречаются в виде обломков глыбового размера, а также при-контактные зоны этой же дайки сложены такими же долеритами, т. е. калиевые миндалекаменные магматиты образуют сложный туффизитовый аппарат. Такое же сложное строение имеет и Талахтагская диатрема (обр. ХТ-12к в табл. 1), отнесенная рядом исследователей к продуктам лампроитового магматизма. Калиевые магматиты отличаются от интродуцируемых ими долеритов, так же как и от долеритов Л-1388, более высоким содержанием MgO и K_2O , резким снижением MnO , CaO и Na_2O . Свое видение причин такого загадочного процесса мы излагали ранее [12].

От базитов других близлежащих дайковых поясов (ВА, ЧР, КН, см. табл. 1) востока Анабарского щита долериты Л-1388 отличаются повышенным содержанием TiO_2 , P_2O_5 и Ni , более умеренным количеством MgO , K_2O и Cr . Долеритам Л-1388 наиболее близки также породы Будьурхайской дайки (БД на рис. 1) Кенгединского (КД) дайкового пояса. При проведении геологической съемки в 1966–1967 гг. М.С. Машаком [4, 5] были установлены зоны с сульфидной медно-ни-

келевой минерализацией в пределах Харапской и Будьурхайской даек. Сульфидная минерализация связана с такситовыми диабазами и прослеживается на сотни метров шириной 2–3 м, иногда до 5–6 м, а в локальных раздувах до 8–9 м, в которых заметно увеличивается размер сульфидов и их содержание, достигающее до 8–10, реже 15 %.

Форма мелких вкрапленников – неправильная, обусловленная их интерстициальным положением. Основным минералом является пирротин (90–95 %), содержащий редкие линзовидные включения пентландита. Халькопирит занимает 5–10 % и развивается обычно по границе пирротина с нерудными минералами. Крупные шпировые обособления сульфидов имеют неправильную, реже изометричную форму размером 15–20 мм в среднем. Краевые части сульфидных нодулей сложены титаномagnetитом, с пластинчатыми структурами распада ильменита. Реже в сульфидах встречаются кубанит, макиновит, виоларит, бравоит, миллерит, борнит, пирит и другие. М.С. Машак [4] сопоставляет сульфидоносные такситовые диабазы с аналогичными породами норильских интрузий.

Сульфидные минералы долеритов Л-1388

Основным минералом в сульфидных желваках овальной формы размером до 8 мм (рис. 4, а) и

Химические составы позднедокембрийских базитов Анабарского щита

Table 1

Chemical composition of Late Precambrian dykes of the Anabar Shield

Элемент/ Element	Пояса ¹ /Swarms ¹								
	ДЖ	ДЖ	ДЖ	ДЖ	КД	ВА	ЧР	ЧР	КН
	Дайки/Dykes								
	Л-1388	АБ-16д ²	АБ-16к	ХТ-12к	БД ³	ХТ-1л	ХТ-11д	ХТ-11м	АБ-2
SiO ₂ , %	49,30	48,40	47,97	47,13	47,42	55,24	47,21	53,94	49,65
TiO ₂	3,32	3,27	3,42	1,86	3,60	2,13	2,20	1,44	1,82
Al ₂ O ₃	13,00	12,07	13,08	14,49	12,22	13,50	15,09	16,22	13,10
Fe ₂ O ₃	7,45	7,09	7,87	6,49	5,67	2,57	5,50	5,12	4,11
FeO	7,22	8,09	5,80	5,17	11,07	8,80	8,08	5,56	10,74
MnO	0,14	0,20	0,03	0,01	0,14	0,16	0,20	0,08	0,20
MgO	4,40	5,34	8,32	11,62	5,87	3,37	6,69	4,42	6,44
CaO	7,27	8,28	2,19	0,52	8,90	6,08	6,62	1,67	10,16
Na ₂ O	2,22	2,44	0,70	0,01	2,70	3,09	2,78	4,98	2,02
K ₂ O	1,83	1,82	5,31	5,69	0,62	3,15	2,32	2,54	0,53
P ₂ O ₅	1,14	0,81	0,91	0,20	0,26	0,76	0,44	0,56	0,19
п.п.п.	2,68	2,76	4,74	7,00	1,38	1,12	3,08	3,30	1,64
Сумма	99,97	100,57	100,34	100,19	99,85	99,97	100,21	99,83	100,60
n	3	5	6	6	25	10	10	2	7
Ni, г/т	500	59	61	136	82	33	62	13	130
Co	50	40	32	26	43	26	48	24	50
Cr	40	48	67	152	95	260	110	130	110
V	200	220	230	285	505	200	300	90	240
Sc	20	21	25	40	49	36	35	25	29
Cu	50	45	45	61	260	20	132	20	210
Zn	150	190	290	99	63	140	110	100	113
Pb	7,0	5,3	6,7	2,8	2,4	19,0	3,3	3,0	3,7
Sn	3,0	2,3	2,9	1,6	2,3	2,1	1,6	2,5	1,5
Ge	1,5	1,5	2,0	3,4	1,7	1,7	1,4	1,4	2,1
n	3	5	6	6	66	20	18	10	20

Примечание. ¹ – дайковые пояса: ДЖ – Джукенский, КД – Кенгединский, ВА – Восточно-Анабарский, ЧР – Чиэрэсский, КН – Куонамский; ² – буквенные обозначения пород в дифференцированных дайках: д – долериты; к – калиевые магматиты; л – лейкодолериты и диориты; м – монзониты. ³ – данные по Будьурхайской дайке по [5], остальные по [7, 12].

Note. ¹ – dyke swarms: ДЖ – Djukensky, КД – Kengedinsky, ВА – Vostochno-Anabarsky, ЧР – Chieresky, КН – Kuonamsky; ² – letter designations of rocks in differentiated dikes: д – dolerites; к – potassium magmatites; л – leucodolerites and diorites; м – monzonites. ³ – data on the Budyurhai dyke (БД) according to [5], the rest according to [7, 12].

мелких вкраплениях в долерите Л-1388 является пирротин, по тонким сетчатым трещинкам которого развиты вторичные минералы. Вторым по распространенности сульфидом является халькопирит, образующий тонкие (до 10–30 мкм) ка-

емки вокруг пирротина и проникающие извилистые прожилки (рис. 4, в). Вокруг желвака часто формируются скопления отдельных хорошо ограненных кристаллов до 0,5 мм или тесных сростаний многих оплавленных индивидов титано-

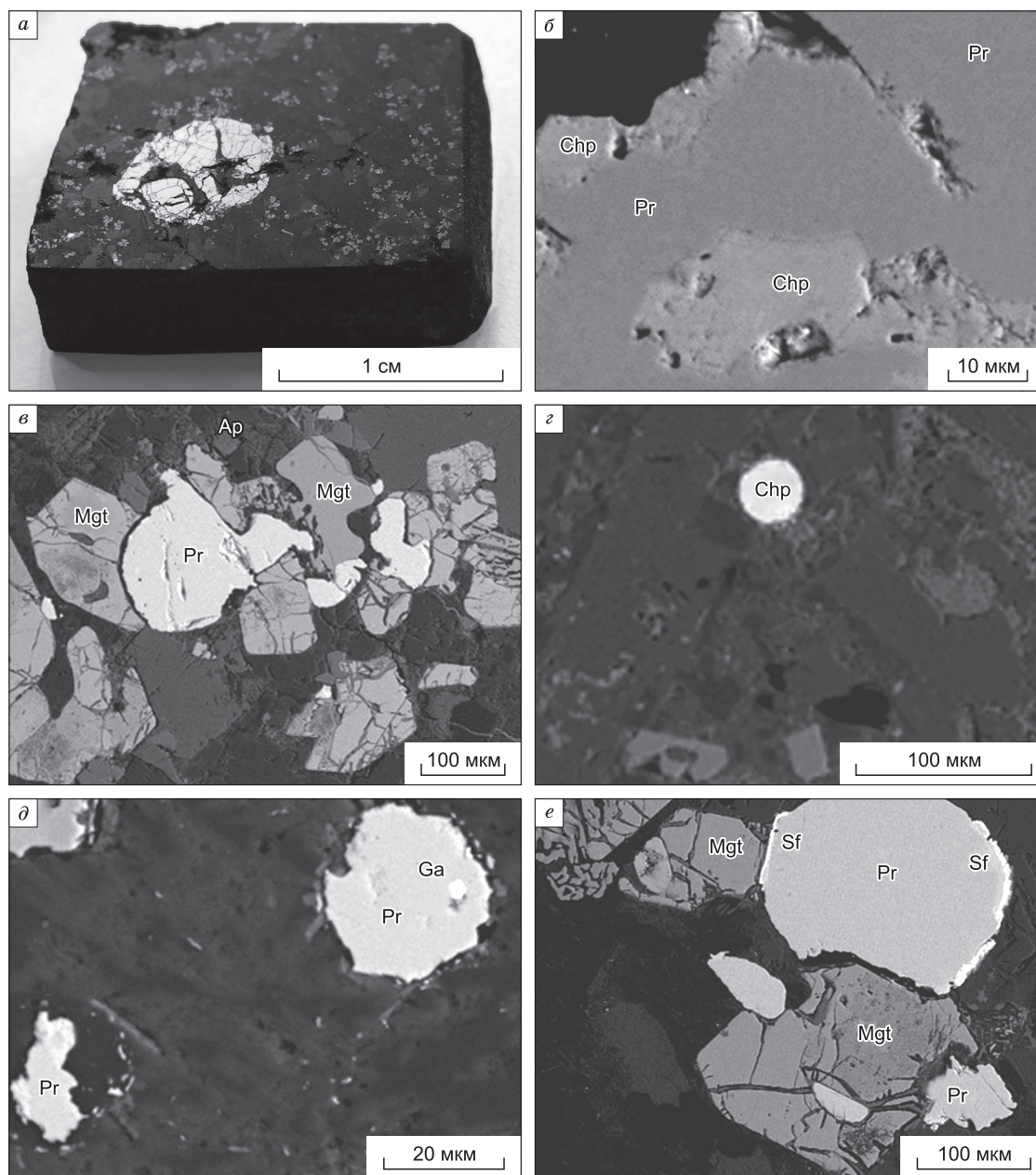


Рис. 4. Минералы сульфидного желвака (а, б) и мелких выделений апатит-титаномagnetит-сульфидной ассоциации (в–е) в долеритах р. Большая Куонамка. Минералы: Pr – пирротин, Chp – халькопирит, Mgt – магнетит, Ap – апатит, Ga – галенит, Sf – сфалерит.

Fig. 4. Minerals of the sulfide nodule (a, б) and small precipitates of the apatite-titanomagnetite-sulfide association (в–е) in the dolerites of the r. Bol'shaya Kuonamka. Minerals: Pr – pyrrhotite, Chp – chalcopyrite, Mgt – magnetite, Ap – apatite, Ga – galena, Sf – sphalerite.

магнетита, которые ассоциируют с пирротинном и апатитом (рис. 4, в).

Кроме крупных округлых нодулей в долеритах наблюдаются и мелкие обособленные капельки халькопирита и пирротина размером от первых мкм до 0,1–0,2 мм (рис. 4, з, д). Сульфидные капельки часто тяготеют к скоплени-

ям титаномagnetита и апатита, образуя тесные сульфид-apatит-титаномagnetитовые обособления (рис. 4, е). При коалесценции (coalescence – слияние, соединение) отдельных сульфидных капелек, не смешивающихся с силикатной магмой, формируются вышеописанные крупные желваки. Они состоят в основном из пирротина, окаймлен-

ного тонкой оболочкой халькопирита и пронизанные извилистыми прожилками халькопирита, а также содержащие по периферии многочисленные амёбовидные включения Тi-магнетита.

Остальные редкие сульфидные минералы представлены зигенитом – $(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Fe})_3\text{S}_4$, герсдорфитом NiAsS с высоким содержанием Fe до 6 %, Co до 12 % и Sb до 3 %, галенитом, сфалеритом и другими неопределёнными фазами. Из-за мелких размеров они трудно поддаются качественному анализу. Например, в пирротине встречаются мелкие (~3 мкм) изометричные включения галенита (см. рис. 4, д), а в одном случае вокруг «капельки» пирротина зафиксировано наличие тонкой каемки сфалерита (см. рис. 4, е).

Как показали микронзондовые анализы (табл. 2), пирротин с большим дефицитом металла и относится к моноклинному пирротину Fe_7S_8 , что подтверждается рентгенофазовым анализом. На дифрактограммах некоторые слабые линии мо-

гут быть отнесены к халькопириту, пентландиту, пириту, миллериту и ковеллину. Установлены небольшие примеси Ni и Co. Значительные количества этих примесей в некоторых анализах (1-44, см. табл. 2), возможно, объясняются присутствием в пирротине тонких структур распада, представленных пентландитом. В халькопирите значительных примесей не установлено.

В виде мелких включений обнаружены фазы, отвечающие по составу зигениту $(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Fe})_3\text{S}_4$, промежуточному члену ряда полидимит Ni_3S_4 – линнеит Co_3S_4 – минералов группы тиошпинелей. По составу этот минерал из долерита Л-1388 очень похож на зигенит из ликвационных «капелек», сложенных пирротинном, халькопиритом, пентландитом, борнитом, пиритом и магнетитом, в рифейско-вендских пикритовых и пикродолеритовых комплексах Южного Урала [13, 14]. В них среди других минералов также установлены галенит и сфалерит, что сближает ассоциацию

Таблица 2

Составы сульфидных минералов, мас. %

Table 2

Composition of sulfide minerals, wt. %

Sample	Fe	Co	Ni	Cu	Sb	S	As	Total
Моноклинный пирротин/monoclinic pyrrhotite Fe_7S_8								
1-88	57,41	0,16	0,78	0,00	–	37,71	0,99	97,65
1-113	58,99	0,50	0,32	0,03	–	38,66	1,68	101,37
1-95	58,77	0,19	0,33	0,00	–	40,45	0,27	100,10
1-100	58,45	0,19	0,20	0,00	–	39,09	0,86	99,91
Халькопирит/chalcopyrite CuFeS_2								
1-47	30,29	0,08	0,02	34,56	–	33,58	0,46	99,71
1-48	30,78	0,07	0,02	34,57	–	33,64	0,21	99,35
2-20	29,78	0,05	0,02	33,80	–	33,09	0,30	97,59
Пирротин + пентландит (?)/Pyrrhotite + pentlandite (?)								
1-44	35,42	10,57	5,91	1,47	–	39,67	0,27	93,36
Зигенит /siegenite $(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Fe})_3\text{S}_4$								
2-53	8,03	28,01	17,17	8,03	–	38,65	0,22	100,13
2-58	3,92	33,96	20,92	0,20	–	38,48	0,21	97,69
Герсдорфит NiAsS с примесью Fe, Co и Sb/ gersdorffite NiAsS with impurity Fe, Co и Sb								
2-3-3	6,03	12,57	14,47	–	–	15,17	50,09	98,34
2-2-5	5,62	12,87	16,44	–	2,99	17,37	44,25	99,14
Пирит/pyrite								
2-18	46,30	0,18	0,29	0,00	–	51,46	0,15	98,48
1-93	46,69	0,08	0,01	0,01	–	53,26	0,11	100,18

сульфидных минералов из пикродолеритов Южного Урала с минералами, обнаруженными нами в долеритах Л-1388.

Обнаружен также редкий сульфоарсенид Ni, Co и Fe, близкий по составу к герсдорфиту – NiAsS. В герсдорфите Л-1388 отмечаются высокие содержания Fe до 6 %, Co до 12 % и Sb до 3 %. Герсдорфит из норильских руд содержит меньшее количество Fe – 1,2 %, Co – 1 %, но больше Sb – 4 % [1].

Попытки установить в сульфидных минералах наличие примесей элементов платиновой группы (ЭПГ) не увенчались успехом. Микросондовым анализом эти элементы в сульфидах долерита Л-1388 не обнаружены в пределах обнаружения: Pt – 0,27, Rh – 0,06 и Pd – 0,06 %. Анализы сульфидных микронавесок приближенно-количественным атомно-эмиссионным методом на аналитическом комплексе ДФС-8 также не дали положительных результатов в пределах обнаружения: Pt – 3; Ir – 30; Os – 30; Ru – 10; Rh – 3 и Pd – 1 г/т. К сожалению, мы должны признать, что наши выводы о содержании ЭПГ в сульфидах Л-1388 до 0,1 %, указанные в тезисах доклада [15], оказались преждевременными и ошибочными вследствие воздействия мешающих наложений других элементов. Практическое отсутствие в мелких сульфидных нодулях ЭПГ может указывать только на то, что процесс ликвационного отделения сульфидов находился на ранней стадии, поэтому не было существенного концентрирования ЭПГ из силикатной магмы в мелкие капельки сульфидных ликватов.

Заключение

Округлые выделения сульфидных нодулей свидетельствуют об их раннемагматической ликвационной природе, что подтверждается находками мелких сульфидных сферолитов в протокристаллах оливина и плагиоклаза в базальтах [16]. При благоприятных условиях дифференциации больших объемов подобных ликватов могут формироваться богатые PGE–Cu–Ni сульфидные руды. Образование ЭПГ-сульфидных месторождений в серонасыщенных магмах объясняется очень высокой степенью распределения ЭПГ в несмешивающейся сульфидной жидкости [17, 18] и сбором ЭПГ в сульфидные глобулы, начиная уже с раннемагматической стадии. В серонедосыщенных магматах сульфидные минералы появляются только на позднемагматической стадии кристаллизации магмы, когда в

остаточных расплавах происходит накопление летучих, в том числе и серы, что приводит к появлению в интерстиционных полостях поздних сульфидов, лишенных примесей ЭПГ.

Преимущественное концентрирование ЭПГ в сульфидах при силикат-сульфидной несмесимости обусловлено тем, что в отличие от силикатных магм, имеющих ионно-молекулярную природу, сульфидные расплавы являются типично ионно-электронными жидкостями [19]. Таким образом, в силу того, что ЭПГ в силикатном расплаве находятся в ионной и металлической форме [20], то при ликвации платиноиды будут распределяться преимущественно в сульфидную часть.

Для выяснения условий кристаллизации сульфидных расплавов, образующих при кристаллизации сложные сочетания твердых моносульфидных ассоциаций [21–25], необходимы дальнейшие детальные исследования типоморфных особенностей сосуществующих сульфидных фаз из подобных нодулярных образований ликвационного типа.

Выводы

При исследовании образца долеритов Л-1388 с крупными округлыми сульфидными вкраплениями установлено, что нодулярные выделения сульфидов формировались при слиянии мелких сульфидных «капелек», отделившихся от силикатной магмы на раннемагматической стадии. По химическому составу и особенностям порообразующих и второстепенных минералов изученный долерит похож на породы из Джукенского дайкового пояса, формировавшегося, по данным U–Pb-датировок, 1380 млн лет назад.

По минеральному составу сульфидные нодули долеритов Л-1388 аналогичны прожилково-вкрапленным медно-никелевым проявлениям, приуроченным к породам докембрийских даек Кенгединского дайкового пояса на юго-востоке Анабарского щита. Подобные ассоциации и типоморфные особенности редких сульфидов характерны платиноидно-медно-никелевым рудам Норильских месторождений, а также медно-никелевым минерализациям ликвационного типа, связанным с дифференцированными докембрийскими комплексами мафит-ультрамафитовых пород других регионов. Все это позволяет предположить потенциальную возможность присутствия на восточном борту Анабарского щита докембрийских базитов с PGE–Cu–Ni сульфидным оруденением.

Литература

1. Генкин А.Д., Дистлер В.В., Гладышев Г.Д. и др. Сульфидные медно-никелевые руды норильских месторождений. М.: Наука, 1981. 234 с.
2. Дистлер В.В., Гроховская Т.Л., Евстигнеева Т.Л. и др. Петрология сульфидного магматического рудообразования. М.: Наука, 1988. 232 с.
3. Лихачев А.П. Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. М.: Эслан, 2006. 496 с.
4. Мащак М.С. Сульфидные медно-никелевые рудопроявления в протерозойских дайках диабазов южного склона Анабарского щита // Геология рудных месторождений. 1969. № 6. С. 74–78.
5. Олейников Б.В., Мащак М.С., Колодезников И.И. и др. Петрология и геохимия позднедокембрийских интрузивных базитов Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 1983. 207 с.
6. Округин А.В., Саввинов В.Т., Олейников Б.В., Ненашев Н.И. Позднедокембрийские интрузивные базиты анабарского массива / Базитовый магматизм Сибирской платформы и его металлогения. Тез. докл. Якутск, 1989. С. 67–69.
7. Okrugin A.V., Oleinikov B.V., Savvinov V.T., Tomshin M.D. Late precambrian dyke swarms of the Anabar massif, Siberian Platform // Mafic dykes and emplacement mechanisms. Rotterdam Brockfield: A.A.Balkema, 1990. P. 529–534.
8. Эрнст Р.Е., Округин А.В., Веселовский Р.В., Камо С.Л., Гамильтон М.А., Павлов В.Э., Сёдерлунд У., Чемберлейн К.Р., Роджерс К. Куонамская крупная изверженная провинция (север Сибири, 1501 млн лет): U-Pb геохронология, геохимия и корреляция с синхронным магматизмом других кратонов // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 5. С. 833–855. DOI: 10.15372/gig20160502. РИНЦ.
9. Ernst R.E., Buchan K.L., Hamilton M.A., Okrugin A.V., Tomshin M.D. Integrated paleomagnetism and U-Pb geochronology of mafic dykes of the eastern Anabar Shield Region, Siberia: Implications for the Mesoproterozoic paleolatitude of Siberia and comparison with Laurentia // Journal of Geology. 2000. Vol. 108. P. 381–401.
10. 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. Long-lived connection between southern Siberia and northern Laurentia in the Proterozoic // Nature Geoscience. 2016. Vol. 9. No. 6. P. 464–469. DOI: 10.1038/NGeo2700.
11. Округин А.В., Якубович О.В., Эрнст Р., Дружинина Ж.Ю. Платиноносные россыпи Сибирской платформы: минеральные ассоциации и их возрастные характеристики как индикаторы проявления крупных изверженных провинций на древней платформе // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2018. № 3. С. 36–52.
12. Округин А.В., Королева О.В. Вещественный состав и генезис калиевых высокомагнезиальных базитов Анабарского массива // Отечественная геология. 2000. № 5. С. 70–74.
13. Ковалев С.Г., Пучков В.Н., Ковалев С.С. Первые находки зигенита (CoNi_2S_4) в пикритовых и пикродолеритовых комплексах Южного Урала // Докл. РАН. 2014. Т. 437, № 3. С. 308–314.
14. Ковалев С.Г., Пучков В.Н., Ковалев С.С., Высоцкий С.И. Минералы системы Fe–Ni–Co–Cu–S в пикритовых интрузиях Южного Урала: свидетельства ликвации и дифференциации сульфидного расплава // Докл. РАН. 2020. Т. 492, № 1. С. 29–34. DOI: 10.31857/S2686739720050084
15. Округин А., Земнухов А., Журавлев А. Ликвационное PGE–Cu–Ni сульфидное рудопроявление в долеритах восточного склона Анабарского щита // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции. Якутск, 2021. С. 213–216.
16. Вахрушев В.А., Латин Б.Н. Первично магматические сульфидные образования в лавах Камчатки и Курильских островов // Геология рудных месторождений. 1967. № 3. С. 74–78.
17. Bezmen N.L., Asif M., Brugmann G.E., Romanenko I.M., Naldrett A.J. Distribution of Pd, Rh, Ru, Ir, Os and Au between sulfide and silicate melts. Geochim. Cosmochim. Acta. 1994. Vol. 58. P. 1251–1260.
18. Fleet M.E., Crockett J.H., Liu M., Stone W.E. Laboratory partitioning of platinum-group elements (PGE) and gold with application to magmatic sulfide-PGE deposits // Lithos. 1999. Vol. 47. P. 127–142.
19. Ольшанский Я.И. Об ионно-электронных жидкостях // Докл. АН СССР. 1950. Т. 71, № 4. С. 701–704.
20. Borisov A., Palme H. Solubilities of noble metals in Fe-containing silicate melts as derived from experiments in Fe-free systems // Amer. Mineral. 2000. Vol. 85. P. 1665–1673.
21. Крейг Дж., Куллеруд Дж. Система Cu–Fe–Ni–S // Экспериментальная петрология и минералогия. Труды Геофизической лаборатории Института Карнеги. Вып. 63–65. М.: Недра, 1971. С. 272–278.
22. Куллеруд Дж. Система Fe–Ni–S // Экспериментальная петрология и минералогия. Труды Геофизической лаборатории Института Карнеги. Вып. 62. М.: Недра, 1969. С. 138–154.
23. Воган Д., Крейг Дж. Химия сульфидных минералов. М.: Мир, 1981. 575 с.
24. Ballhaus C., Tredoux M., Spath A. Phase relations in the Fe–Ni–Cu–PGE–S system at magmatic temperature and application to massive sulphide ores of the Sudbury igneous complex // Journal of Petrology. 2001. Vol. 42. P. 1911–1926. DOI: 10.1093/petrology/42.10.1911
25. Косяков В.И., Синякова Е.Ф. Физико-химические предпосылки образования первичной зональности рудных тел в медно-никелевых сульфидных

месторождениях (на примере систем Fe–Ni–S и Cu–Fe–S) // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, № 9. С. 1126–1153.

26. Музыка Г.М., Чумирин К.Г. К вопросу о проявлении аналогов меймечитов на южной окраине Ана-

барского массива // Геология, петрография и минералогия магматических образований северо-восточной части Сибирской платформы. М.: Наука, 1970. С. 183–190.

Поступила в редакцию 29.09.2021

Принята к публикации 16.11.2021

Об авторах

ОКРУГИН Александр Витальевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677000, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия,

<https://orcid.org/0000-0002-1248-8993>, e-mail: okrugin@diamond.ysn.ru;

ЗЕМНУХОВ Алексей Леонидович, начальник отдела минералогических исследований, АО «Алмазы Анабара», 677000, Якутск, ул. Чернышевского, д. 6, e-mail: zemnuhovAL@alanab.ru;

ЖУРАВЛЕВ Анатолий Иванович, младший научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677000, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-0115-5146>, e-mail: ai.zhuravlevgeo@gmail.com.

Информация для цитирования

Округин А.В., Земнухов А.Л., Журавлев А.И. Медно-никелевое сульфидное рудопоявление в долеритах восточного склона Анабарского щита // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 4. С. 16–28. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-16-28>

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-4-16-28

Copper-nickel sulfide mineral occurrence in dolerites of the eastern slope of the Anabar shield

A.V. Okrugin^{1,*}, A.L. Zemnukhov², A.I. Zhuravlev¹

¹Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

²AO Almazы Anabara, Yakutsk, Russia

*okrugin@diamond.ysn.ru

Abstract. A description of sulfide nodules from the block of dolerites, found on the terrace of the Bolshaya Kuonamka river on the eastern side of the Anabar shield (north-east of the Siberian platform) is given. Dolerites are represented by medium-grained rocks with ophitic texture, consist mainly of plagioclase, augite, and Ti-magnetite; potassium feldspar, amphibole, pigeonite, apatite, chlorite, zeolite, quartz, calcite, and ilmenite are less common. In terms of chemical composition and structure, these dolerites are similar to the Precambrian subalkaline dolerites. Sulfides in the studied dolerites occur in the form of separate rounded segregations up to 8 mm in size, consisting mainly of pyrrhotite and chalcopyrite. Small (from several microns to 0.5 mm) drop-shaped precipitates of pyrrhotite and chalcopyrite are often found. Such forms of sulfide mineral segregations indicate that large nodules are formed during merging of small primary sulfide droplets immiscible with silicate magma. Siegenite (Co,Ni,Fe)₃S₄, gersdorffite NiAsS with a high Fe content up to 6 %, Co up to 12 % and Sb up to 3 %, galena, sphalerite, and others are less common in sulfide segregations. Sulfide minerals are often gravitating to the accumulations of Ti-magnetite and

apatite, forming close sulfide-apatite-titanomagnetite segregations. The presence of liquation sulfide segregations in igneous rocks is one of the important criteria of the saturation of magmatic melts with sulfides, indicating their potential ore content. Platinoid-copper-nickel sulfide deposits of the Norilsk region are characterized by similar forms of segregations and sulfide mineral associations. Vein-disseminated copper-nickel mineralization in taxite gabbro-dolerites of the Budyrkhaiskaya dike along the Kengede river is known, which allows us to suggest the possible presence of Precambrian basite rocks with Cu-Ni sulfide mineralization on the Anabar shield.

Keywords: copper-nickel ores, sulfides, dolerites, Siberian platform, Anabar shield.

Acknowledgements. The authors thank all colleagues who participated in the field work: Androsov A.R. – the chief and Nakhodkin A.P. – geologist of the Kuonamskaya GRP, as well as employees of the Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS – Khristoforova N.V., Samsonova O.K., Vasilieva A.S., Zamyskaya O.D. and Vasilieva T.I. for performing analytical studies. This study was carried out within the State Assignment for Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS (No. 0381-2019-0003).

References

1. Genkin A.D., Distler V.V., Gladyshev G.D. et al. Sulfide copper-nickel ores of the Norilsk deposits. Moscow. Nauka, 1981. 234 p.
2. Distler V.V., Grokhovskaya T.L., Evstigneeva T.L. et al. Petrology of sulfide magmatic ore formation. Moscow: Nauka, 1988. 232 p.
3. Lichachev A.P. Platinum-nickel-copper and platinum deposits. Moscow: Aslan, 2006. 496 p.
4. Mashchak M.S. Sul'fidye medno-nikelevye rudoproyavleniya v proterozojских daykach diabazov yuznogo sklona Anabarskogo schita // Geologiya rudnyh mestorozhdenij. 1969. No. 6. P. 74–78.
5. Oleinikov B.V., Mashchak M.S., Kolodeznikov I.I. et al. Petrology and geochemistry of basites intrusions of the Siberian platform. Novosibirsk: Nauka, 1983. 208 p.
6. Okrugin A.V., Savvinov V.T., Oleinikov B.V., Nenashev N.I. Pozdnedokembrijskie intruzivnye bazity Anabarskogo massiva // Bazitovyy magmatizm Sibirskoj platformy i ego metallogeniya. Tez. dokl. Yakutsk, 1989. P. 67–69.
7. Okrugin A.V., Oleinikov B.V., Savvinov V.T., Tomshin M.D. Late precambrian dyke swarms of the Anabar massif, Siberian Platform // Mafic dykes and emplacement mechanisms. Rotterdam Brockfield: A.A.Balkema, 1990. P. 529–534.
8. Ernst R.E., Okrugin A.V., Veselovskiy R.V., Kamo S.L., Hamilton M.A., Pavlov V., Söderlund U., Chamberlain K.R., Rogers C. 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. 2016. Vol. 57. P. 653–671. doi.org/10.1016/j.rgg.2016.01.015.
9. Ernst R.E., Buchan K.L., Hamilton M.A., Okrugin A.V., Tomshin M.D. Integrated paleomagnetism and U–Pb geochronology of mafic dykes of the eastern Anabar Shield Region, Siberia: Implications for the Mesoproterozoic paleolatitude of Siberia and comparison with Laurentia // Journal of Geology. 2000. Vol. 108. P. 381–401.
10. 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. Long-lived connection between southern Siberia and northern Laurentia in the Proterozoic // Nature Geoscience. 2016. Vol. 9. No. 6. P. 464–469. DOI: 10.1038/NGEO2700.
11. Okrugin A.V., Yakubovich O.V., Ernst R.E., Druzhinina Zh.Yu. Platinum-bearing placers of Siberian platform: mineral associations and their age characteristics as indicators of large igneous provinces manifested in old platform // Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki. 2018. No. 3. P. 36–52.
12. Okrugin A.V., Koroleva O.V. Veshchestvennyy sostav i genezis kalievyyh vysokomagnezial'nyh bazitov Anabarskogo massiva // Otechestvennaya geologiya. 2000. No. 5. P. 70–74.
13. Kovalev S.G., Puchkov V.N., Kovalev S.S. The first finds of siegenite in picrite and picrito-dolerite complex of the Southern Urals // Doklady Earth Sciences, 2014. Vol. 457, No. 3. P. 308–314.
14. Kovalev S.G., Puchkov V.N., Kovalev S.S., Vysotsky S.I. New data on minerals of the system Fe–Ni–Co–Cu–S in differentiated intrusions of the Southern Urals // Dokl. RAN. 2020. Vol. 492, No. 1. P. 29–34. DOI: 10.31857/S2686739720050084
15. Okrugin A., Zemnuhov A., Zhuravlev A. Likvacionnoe PGE–Cu–Ni sul'fidnoe rudoproyavlenie v doleritah vostochnogo sklona Anabarskogo shchita // Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Severo-Vostoka Rossii. Materialy XI Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Yakutsk, 2021. P. 213–216.
16. Vahrushev V.A., Lapin B.N. Pervichno magmaticheskie sul'fidnye obrazovaniya v lavah Kamchatki i Kuril'skih ostrovov // Geologiya rudnyh mestorozhdenij. 1967. No. 3. P. 74–78.
17. Bezmen N.L., Asif M., Brugmann G.E., Romanenko I.M., Naldrett A.J. Distribution of Pd, Rh, Ru, Ir, Os and Au between sulfide and silicate melts // Geochim. Cosmochim. Acta. 1994. Vol. 58. P. 1251–1260.
18. Fleet M.E., Crocket J.H., Liu M., Stone W.E. Laboratory partitioning of platinum-group elements (PGE) and gold with application to magmatic sulfide-PGE deposits // Lithos. 1999. Vol. 47. P. 127–142.

19. Ol'shansky Ya.I. On ionic-electronic liquids // Dokl. AN SSSR. 1950. Vol. 71. P. 701–704.
20. Borisov A., Palme H. Solubilities of noble metals in Fe-containing silicate melts as derived from experiments in Fe-free systems // Amer. Mineral. 2000. Vol. 85. P. 1665–1673.
21. Kreig J., Kullerud G. Sistema Cu–Fe–Ni–S // Eksperimental'naya petrologiya i mineralogiya. Trudy Geofizicheskoy laboratorii Instituta Karnegi. Iss. 63–65. M.: Nedra, 1971. P. 272–278.
22. Kullerud G. Sistema Fe–Ni–S // Eksperimental'naya petrologiya i mineralogiya. Trudy Geofizicheskoy laboratorii Instituta Karnegi. Iss. 62. M.: Nedra, 1969. P. 138–154.
23. Vogan D., Kreig J. Himiya sul'fidnyh mineralov. M.: Mir, 1981. 575 p.
24. Ballhaus C., Tredoux M., Spath A. Phase relations in the Fe–Ni–Cu–PGE–S system at magmatic temperature and application to massive sulphide ores of the Sudbury igneous complex // Journal of Petrology. 2001. Vol. 42. P. 1911–1926. DOI: 10.1093/petrology/42.10.1911
25. Kosyakov V.I., Sinyakova E.F. Physicochemical prerequisites for the formation of primary orebody zoning at copper-nickel sulfide deposits (by the example of the systems Fe–Ni–S and Cu–Fe–S) // Geologiya i Geofizika. 2012. Vol. 53, No. 9. P. 1126–1153.
26. Muzyka G.M., Chumirin K.G. K voprosu o pro-
javlenii analogov mejmechitov na yuznoj okraine
Anabarskogo massiva // Geologiya, petrografiya i
mineralogia magmaticheskikh obrazovaniy severo-
vostochnoj chasti Sibirskoj platform. M.: Nauka, 1970.
P. 183–190/

About the authors

OKRUGIN, Aleksandr Vitalievich, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), chief researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk 677000, Russia,
<https://orcid.org/0000-0002-1248-8993>, e-mail: okrugin@diamond.ysn.ru;

ZEMNUKHOV, Aleksey Leonidovich, head of the Mineralogical Research Department of the JSC Almazny Anabara, 6 Chernyshevskogo str., Yakutsk 677000, Russia,
e-mail: zemnuhovAL@alanab.ru;

ZHURAVLEV, Anatoliy Ivanovich, researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk 677000, Russia,
<https://orcid.org/0000-0003-0115-5146>, e-mail: ai.zhuravlevgeo@gmail.com.

Citation

Okругин А.В., Земнухов А.Л., Журавлев А.И. Copper-nickel sulfide mineral occurrence in dolerites of the eastern slope of the Anabar shield // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021, Vol. 26, No. 4. P. 16–28. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-16-28>