МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГЕОСФЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

GEOSPHERE RESEARCH

Научный журнал

2024

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-66443 от 14 июля 2016 г.)

Журнал индексируется в Web of Science Core Collection's Emerging Sources Citation Index и SCOPUS. The Journal is indexed in the Web of Science Core Collection's Emerging Sources Citation Index and SCOPUS.

(16+)

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» 94288

Томский государственный университет 2024

Nº 3

ISSN 2542-1379 ISSN (online) 2541-9943

Учредитель – Томский государственный университет

Адрес редакции и издателя: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Национальный исследовательский Томский государственный университет, геолого-географический факультет, ауд. 242. Сайт: http://journals.tsu.ru/geo/

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор: Изох А.Э., д-р геол.-минерал. наук, Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия Заместитель главного редактора: Шпанский А.В., д-р геол.-минерал. наук, профессор Томского государственного университета, Томск, Россия

E-mail: shpansky@ggf.tsu.ru

Ответственный секретарь: Асочакова Е.М., канд. геол.-минерал. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: ev.asochakova@gmail.com

Гордиенко И.В., д-р геол.-минерал. наук, чл.-кор. РАН, Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

Гутак Я.М., д-р геол.-минерал. наук, профессор, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

Дорошкевич А.Г., д-р геол.-минерал. наук, заведующая лабораторией, Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия

Евсеева Н.С., д-р геогр. наук, профессор, Томский государственный университет, Томск, Россия

Земцов В.А., д-р геогр. наук, профессор, Томский государственный университет, Томск, Россия

Крук Н.Н., д-р геол.-минерал. наук, чл.-кор. РАН, директор, Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия

Кузьмин М.И., д-р геол.-минерал. наук, академик РАН, Институт геохимии СО РАН, Иркутск, Россия

Парначев В.П., д-р геол.-минерал. наук, профессор, Томский государственный университет, Томск, Россия

Поздняков А.В., д-р геогр. наук, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

Ревердатто В.В., д-р геол.-минерал. наук, академик РАН, Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия

Савичев О.Г., д-р геогр. наук, профессор, Томский политехнический университет, Томск, Россия

Сазонов А.М., д-р геол.-минерал. наук, профессор, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Скляров Е.В., д-р геол.-минерал. наук, чл.-кор. РАН, Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Соломина О.Н., д-р геогр. наук, чл.-кор. РАН, директор, Институт географии РАН, Москва, Россия

Худолей А.К., д-р геол.-минерал. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Цыганков А.А., д-р геол.-минерал. наук, Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

Чернышов А.И., д-р геол.-минерал. наук, профессор, Томский государственный университет, Томск, Россия

Ярмолюк В.В., д-р геол.-минерал. наук, академик РАН, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

Бэнкс Давид, CGeol, компания Holymoor Consultansy, Честерфилд, Университета Глазго, Великобритания

Гутиеррес-Алонсо Г., профессор Университета Саламанки, Саламанка, Испания

Покровский О.С., ведущий научный сотрудник, обсерватория Миди-Пиренейз Национального центра научных исследований, Тулуза, Франция

Чамберлейн К.Р., профессор, Университет Вайоминг, Ларами, США

Чан Чонг Хоа, Геологический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Вьетнам

Эрнст А.А., профессор, Гамбургский университет, Гамбург, Германия

Эрнст Р.Э., профессор, Карлтонский университет, Оттава, Канада

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Гертнер И.Ф., канд. геол.-минерал. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; Горбатенко В.П., д-р геогр. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; Краснова З.Н., канд. геогр. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; Краснова Т.С., канд. геол.-минерал. наук, начальник научного управления, Томский государственный университет, Томск, Россия; Краснова Т.С., канд. геол.-минерал. наук, начальник научного управления, Томский государственный университет, Томск, Россия; Кужевская И.В., канд. геогр. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; Лещинский С.В., д-р геол.-минерал. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; Лецинский государственный университет, Томск, Россия; Кужевская И.В., канд. геогр. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; Лецинский С.В., д-р геол.-минерал. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; Кокий государственный университет, Томск, Россия; Севастьянов В.В., д-р геогр. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; Кокий государственный университет, Томск, Россия; Севастьянов В.В., д-р геогр. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; Тишин П.А., канд. геол.-минерал. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; Севастьянов В.В., д-р геогр. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; Кокий государственный университет, Томск, Россия; Севастьянов В.В., д-р геогр. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; Тишин П.А., канд. геол.-минерал. наук, Томский государственный университет, Томск, Россия; Кокий государственный университет, Т

© Томский государственный университет, 2024

Founder – Tomsk State University

"Geosphere Research"

International standard serial edition number: 2542-1379

Languages: Russian, English

Publication are non-commercial basis (FREE)

Open access

Contacts: 36 Lenin Avenue, Tomsk, Russia, 634050. Tomsk State University. Faculty of Geology and Geography; http://journals.tsu.ru/geo

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief: **Izokh A.E.**, Professor, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia *Deputy Editor-in-Chief*: **Andrey V. Shpansky**, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor of the Tomsk State University, Tomsk, Russia E-mail: shpansky@ggf.tsu.ru

Executive Editor: Evgeniya M. Asochakova, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Assistant Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russia

E-mail: ev.asochakova@gmail.com

Gordienko I.V., Corresponding Member of RAS, Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia

Gutak Ya.M., Professor, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Doroshkevich A.G., Head of Laboratory, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

Evseeva N.S., Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russia

Zemtsov V.A., Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russia

Kruk N.N., Corresponding Member of RAS, Director, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia Kuzmin M.I., Member of RAS, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

Parnachov V.P., Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russia

Pozdnyakov A.V., Professor, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

Reverdatto V.V., Member of RAS, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

Savichev O.G., Professor, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Sazonov A.M., Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Sklyarov E.V., Corresponding Member of RAS, Institute of the Earth Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

Solomina O.N., Corresponding Member of RAS, Director of the Geography Institute RAS, Moscow, Russia

Khudoley A.K., Professor, St. Petersburg University, St. Petersburg, Russia

Tsygankov A.A., Director, Geological Institute of SB RAS, Ulan-Ude, Russia

Chernyshov A.I., Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russia

Yarmolyuk V.V., Member of RAS, Institute of the Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, Russia

David Banks, CGeol, Holymoor Consultancy, Chesterfield, UK

Gabriel Gutierrez-Alonso, Professor, Salamanca University, Salamanca, Spain

Pokrovsky O.S., Leading Scientist, the Observatory Midi-Pyrénées of CNRS, Toulouse, France

Tran Trong Hoa, Chief Scientist, Geological Institute of the Vietnam Academy of Sciences and Technologies, Hanoi, Vietnam

Chamberlain K.R., Research Professor, Department of Geology & Geophysics, University of Wyoming, Laramie, USA

Ernst A.A., Professor of the Hamburg University, Hamburg, Germany

Richard E. Ernst, Professor of the Carleton University, Ottawa, Canada

EDITORIAL COUNCIL

Gertner I.F., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; Gorbatenko V.P., Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russia; Grinev O.M., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; Tomsk State University, Tomsk, Russia; Kvasnikova Z.N., Cand. Sci. (Geogr.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; Krasnova T.S., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; Kuzhevskaya I.V., Cand. Sci. (Geogr.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; Leshchinskiy S.V., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russia; Lychagin D.V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russia; Podobina V.M., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russia; Romashova T.V., Cand. Sci. (Geogr.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; Sevast'yanov V.V., Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russia; Tat'yanin G.M., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Tomsk State University, Tomsk, Russia; Tishin P.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Tomsk State University, Tomsk, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

Памяти Василия Васильевича Врублевского	6
---	---

ПЕТРОЛОГИЯ

Горюнова В.О., Прокопьев И.Р., Дорошкевич А.Г., Старикова А.Е., Проскурнин В.Ф.,	
Салтанов В.А. Редкоземельный состав флюоритов как индикатор генезиса карбонатитов	
Центральной Тувы и Восточного Таймыра	10
Егорова В.В., Изох А.Э., Шелепаев Р.А. Щелочно-базальтоидные дайки агардагского комплекса (Западный Сангилен) как индикатор дифференциации магм в промежуточных камерах	21
Опарин Н.А., Олейников О.Б. Вещественный состав кимберлитов трубки им. А.П. Смелова (Центральная Якутия)	31

МИНЕРАЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ

Зубакова Е.А., Дорошкевич А.Г., Шарыгин В.В. Особенности состава клинопироксена и апатита из пироксенитового массива Укдуска (Алдано-Становой щит, Якутия)	42
Исакова А.Т., Старикова А.Е., Затолокина К.И., Избродин И.А., Дорошкевич А.Г. Условия образования апатит-флюоритовых пород Бурпалинского массива по данным изучения флюидных включений во флюорите (Северное Прибайкалье)	52
Савельева В.Б., Данилова Ю.В., Базарова Е.П., Данилов Б.С., Хромова Е.А. Титаномагнетит-кальцитовые срастания в айлликите трубки Южной, Восточная Сибирь: состав минералов и условия образования	65
Чеботарев Д.А., Сарыг-оол Б.Ю., Козлов Е.Н., Фомина Е.Н., Сидоров М.Ю., Редина А.А. Мобильность титана и ниобия при постмагматических низкотемпературных преобразованиях рутила, анатаза, пирохлора и луешита	77
Шарыгин В.В. Высоконатровые карбонаты и карбонат-фосфаты в породах щелочно-карбонатитовых массивов Чуктукон и Средняя Зима: включения в пирите	87

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Жмодик С.М., Лазарева Е.В., Айриянц Е.В., Белянин Д.К., Киселева О.Н., Мусияченко К.А.,	
Толстов А.В. Золото и серебро в высококалиевых нефелиновых сиенитах томторского комплекса	
(на примере массива Богдо, Арктическая Сибирь)	101
Толстов А.В., Лапин А.В. Поведение марганца в карбонатитах и их корах выветривания на примере массива Томтор	113

CONTENTS

In memory of Vassily Vas	silyevich Vrublevskii .	
--------------------------	-------------------------	--

PETROLOGY

Goryunova V.O., Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Starikova A.E., Proskurnin V.F., Saltanov V.A.	
Rare earth composition of fluorites as an indicator of the genesis of carbonatites in Central Tuva	
and Eastern Taimyr	10
Egorova V.V., Izokh A.E., Shelepaev R.A. Alkaline basalt dikes of Agardag complex as an indicator	
of magma differentiation in intermediate chambers	21
Oparin N.A., Oleinikov O.B. Composition of kimberlites from the A.P. Smelov pipe (Central Yakutia)	31

MINERALOGY, GEOCHEMISTRY

Zubakova E.A., Doroshkevich A.G., Sharygin V.V. Features of the composition of clinopyroxene and apatite from the Ukduska pyroxenite massif (Aldan-Stanovoy shield, Yakutia)	42
Isakova A.T., Starikova A.E., Zatolokina K.I., Izbrodin I.A., Doroshkevich A.G. Formation conditions of Burpala apatite-fluorite rocks: the results of fluorite-hosted fluid inclusion study (Northern Baikal region)	52
Savelyeva V.B., Danilova Yu.V., Bazarova E.P., Danilov B.S., Khromova E.A. Titanomagnetite-calcite intergrowths in aillikite of the Yuzhnaya pipe, Eastern Siberia: composition of minerals and conditions of formation	65
Chebotarev D.A., Saryg-ool B.Yu., Kozlov E.N., Fomina E.N., Sidorov M.Yu., Redina A.A. The mobility of titanium and niobium during postmagmatic low-temperature transformations of rutile, anatase, pyrochlore and lueshite	77
Sharygin V.V. Sodium-rich carbonates and carbonate-phosphates in rocks of Chuktukon and Srednia Zima alkaline-carbonatite massifs: data on study of inclusions in pyrite	87

GEOLOGY OF DEPOSITS

Zhmodik S.M., Lazareva E.V., Airiyants E.V., Belyanin D.K., Kiseleva O.N., Musiyachenko K.A.,	
Tolstov A.V., Saryg-ool B.Yu. Gold and silver in high-K nepheline syenites of the Tomtor complex	
(on the example of the Bogdo massif, Arctic Siberia)	101
Tolstov A.V., Lapin A.V. The behavior of manganese in carbonatites and their weathering crusts on the example of the Tomtor massif	113

doi: 10.17223/25421379/32/1

ПАМЯТИ ВАСИЛИЯ ВАСИЛЬЕВИЧА ВРУБЛЕВСКОГО



Василий Васильевич Врублевский (29.06.1956–18.05.2024)

Российская наука и образование понесли большую утрату: 18 мая 2024 г. на 68-м году жизни скончался доктор геолого-минералогических наук, профессор и заведующий кафедрой динамической геологии Томского государственного университета Василий Васильевич Врублевский. Он родился 29 июня 1956 г. в г. Томске в семье ученых. Его родители – Клара Григорьевна и Василий Адамович Врублевские - всю свою жизнь посвятили Томскому университету. Мать являлась научным сотрудником и ученым секретарем Научно-исследовательского института биологии и биофизики, а отец - доцентом кафедры петрографии Томского государственного университета. Долгое время семья Врублевских проживала в университетских квартирах (ныне корпус ТГУ № 9), и детские игры мальчика Василия проходили в Университетской роще - в самом центре студенческой жизни города Томска. Этот период, период покорения космоса, новых научных открытий в области физики, биологии, химии и других наук, стал рассветом научной фантастики, увлечение которой пробудило в юном Василии Васильевиче любовь к познанию нового и страсть к научному поиску.

После окончания средней школы в 1973 г. Василий Васильевич решил пойти по стопам своего отца и поступил на геолого-географический факультет Томского государственного университета, который успешно окончил в 1978 г., получив диплом с отличием по специальности «Геохимия, минералогия, петрография» с присвоением квалификации инженера-геохимика. После окончания университета был направлен на работу в лабораторию экспериментальной минералогии и геохимии ТГУ на должность младшего научного сотрудника. В составе группы В.К. Чистякова он занимался изучением типоморфизма полевых шпатов гранитоидов Южной Сибири.

В 1980 г. научная деятельность В.В. Врублевского прервалась службой в рядах Советской армии. Будучи офицером запаса, Василий Васильевич проходил срочную службу на Дальнем Востоке. Он любил вспоминать, когда с трепетом, когда с иронией, но всегда с теплом рассказывал о своем офицерстве. А в тяжелые девяностые годы, когда ему приходилось сталкиваться с неопределенностью на своем профессиональном поприще, он шутя подчеркивал, что если бы остался в армии, то уже бы сделал блестящую карьеру.

После окончания срочной службы в 1982 г. Василий Васильевич вернулся в ТГУ в лабораторию экспериментальной минералогии и геохимии. В это время по инициативе профессора М.П. Кортусова была создана группа «Нефелин», основной задачей которой было расширение минерально-сырьевой

© Асочакова Е.М., Бухарова О.В., Гертнер И.Ф., Гринёв О.М., Дорошкевич А.Г., Изох А.Э., Краснова Т.С., Крупчатников В.И., Лычагин Д.В., Сазонов А.М., Парначев В.П., Петлина А.А., Тишин П.А., Чернышов А.И., 2024

базы недавно запущенного Кия-Шалтырского месторождения нефелинового сырья. Молодой коллектив, в состав которого влился Василий Васильевич, объединил целую плеяду томских исследователей щелочного магматизма Кузнецкого Алатау, в которую вошли М.П. Кортусов, Н.А. Макаренко, П.В. Осипов, О.М. Гринев, И.Ф. Гертнер и др. Уже в первый год работы при исследовании Петропавловского щелочно-габброидного массива В.В. Врублевский обратил внимание на апатитсодержащие карбонатные породы, тесно связанные с магматическими породами. А в 1984 г. в составе коллектива авторов обосновал одну из первых на тот момент времени находок карбонатитов в складчатых областях (Кортусов М.П., Макаренко Н.А., Врублевский В.В., Осипов П.В., Рихванов Л.П., Мостовской А.И. Первая находка апатитсодержащих карбонатитов в Кузнецком Алатау // Геохимия, петрография и минералогия месторождений Сибири. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1984. С. 138-147). Именно эта находка и определила научные интересы и исследовательскую судьбу Василия Васильевича.

В 1985 г. В.В. Врублевский поступает в аспирантуру Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Академии наук СССР (ИГЕМ АН СССР, Москва), где развивалась мощная школа петрологии щелочного магматизма. Василий Васильевич вливается в коллектив незаурядных исследователей, среди которых такие яркие личности, как Евдокия Даниловна Андреева, Виктория Аббасовна Кононова, Екатерина Владимировна Свешникова, Раиса Михайловна Яшина. Под руководством Раисы Михайловны В.В. Врублевский развивает свои исследования карбонатитов Кузнецкого Алатау. Он вовлекает в свою работу не только сотрудников ИГЕМ РАН, но и других институтов, вместе с А.Д. Бабанским, И.И. Быковой, В.Н. Кулешовым, Г.Н. Муравицкой, Б.Г. Покровским и другими исследователями они готовят серию статей по расплавным включениям и изотопному составу карбонатитов. В 1989 г. В.В. Врублевский защищает диссертацию «Петрология ассоциации шелочных основных пород и карбонатитов Кузнецкого Алатау (на примере Верхнепетропавловского массива)» на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук (специальность 04.00.08 - петрография и вулканология).

В 1989 г. Василий Васильевич возвращается в Томск, где приступает к работе на кафедре динамической геологии ТГУ, сначала в должности заведующего учебно-геофизической лабораторией, а затем и старшего преподавателя. В это же время в Томском государственном педагогическом институте создается географический факультет, и его первый декан А.Н. Рудой приглашает В.В. Врублевского для развития геологического и геоэкологического направлений. В 1993 г. Василий Васильевич создает здесь кафедру геологии и геохимии ландшафта, собирает вокруг себя молодых геологов г. Томска. Позднее он становится заместителем декана географического факультета, а в период докторантуры А.Н. Рудого (1994–1996 гг.), возглавляет это подразделение. Именно здесь раскрывается талант Василия Васильевича как блестящего педагога и руководителя. Выпускники педагогического университета того времени до сих пор с восхищением вспоминают его лекции. В 1998 г. В.В. Врублевского приглашают читать курс петрографии и петрологии в Томский политехнический университет, где он работает до 2000 г.

Работа в педагогическом и политехническом университетах, хотя и ослабила исследовательскую активность В.В. Врублевского, но не остановила его движений в познании Земли. Именно с этим периодом связывается начало его исследований карбонатитов Енисейского кряжа, геохимии и минералогии лампроитов Горного Алтая и Таймыра, минералогии редкоземельных элементов и их месторождений. В этот период в геологических лабораториях Томского государственного университета вокруг Василия Васильевича сложился кружок молодых единомышленников (И.Ф. Гертнер, О.М. Гринев, В.И. Крупчатников, Т.С. Краснова, П.А. Тишин, О.В. Бухарова, Д.Н. и Н.Н. Войтенко, И.Ю. Уткин и др.). Познавая вкус новых прецизионных аналитических методов минералогических и геохимических исследований, их возможностей для решения сложных геологических задач, строча свои первые международные публикации, списываясь со всемирными корифеями геологической науки, молодые люди мечтали! Мечтали о современной аналитической базе, о международных коллаборациях, о собственных площадках для научного общения...

В 1998 г. профессор В.П. Парначев приглашает Василия Васильевича в докторантуру Томского госуларственного университета, где он продолжает свои исследования карбонатитов складчатых областей. Помимо уже известных объектов Кузнецкого Алатау и Енисейского кряжа, он изучает объекты Горного Алтая, Тянь-Шаня, Сангилена. В процессе исследований устанавливаются геохронологические рубежи щелочного и карбонатитового магматизма этих регионов, обосновывается полихронная модель его развития в условиях плюм-литосферного взаимодействия. В 2003 г. Василий Васильевич успешно защищает диссертацию «Петрология карбонатитовых комплексов консолидированных складчатых областей на примере Южной Сибири и Тянь-Шаня» на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук (специальность 25.00.04 – петрология, вулканология) и полностью возвращается в стены Томского государственного университета. Здесь его ждет масса исследовательских и инфраструктурных проектов.

С 2002 г. в сотрудничестве с учеными Института геологии и минералогии СО РАН (А.Г. Владимиров, С.Н. Руднев, О.А. Левченков и др.) и при финансовой поддержке Управления природных ресурсов по Кемеровской области В.В. Врублевский и И.Ф. Гертнер реализуют проект по геохронологическому датированию и петрологическому исследованию щелочных комплексов Кузнецкого Алатау. В рамках этого проекта удается извлечь из щелочных пород первые цирконы и достоверно установить три основных рубежа щелочного магматизма Кузнецкого Алатау. Сопоставимые результаты были получены при изучении щелочных пород Горного Алтая, которые проводились Василием Васильевичем совместно с В.И. Крупчатниковым, А.Э. Изохом, А.Г. Владимировым, Н.Н. Круком, Г.В. Поляковым и многими другими. Работы В.В. Врублевского, посвященные исследованию щелочного и карбонатитового магматизма Южной Сибири, были отмечены в 2006 г. премией Томского государственного университета в номинации «За высокие достижения в науке».

Тесное сотрудничество томских, красноярских и новосибирских геологов (И.Ф. Гертнер, Т.С. Краснова, П.А. Тишин, А.М. Сазонов, А.П. Романов, С.И. Леонтьев, Е.А. Звягина, В.В. Ревердатто, А.Э. Изох и др.) при активном участии Василия Васильевича способствовало детальному исследованию щелочно-ультраосновной ассоциации Полярной Сибири, где была установлена связь изотопно-геохимической зональности магматических пород с удаленностью от центра плюмовой активности. Для золоторудных месторождений Енисейского кряжа обоснована пространственно-временная связь с проявлением щелочного и внутриплитного магматизма.

В последнее время В.В. Врублевский уделял большое внимание изучению разновозрастного внутриплитного щелочно-базитового и карбонатитового магматизма в Алтае-Саянской складчатой области и в Монголии и обоснованию связи этого типа магматизма с крупными изверженными провинциями. При активном участии В.В. Врублевского проведен обзор новых данных по изотопному составу неопротерозойских, палеозойских и мезозойских щелочных пород и карбонатитов Центрально-Азиатского орогенического пояса. Показано, что первичные отношения изотопов Nd, Sr и Pb в магматических комплексах свидетельствуют о гетерогенных источниках расплавов со смешением вещества умеренно деплетированного и обогащенного доменов сублитосферной мантии, причем доля обогащенного компонента возрастает в производных позднепалеозойского и мезозойского магматизма. Одновременное обогащение щелочных пород и карбонатитов радиогенным ⁸⁷Sr и тяжелыми изотопами O, C и S указывает на вероятность верхнекоровой контаминации. Показано, что в неопротерозое проявлена взаимосвязь плюмовой активности и глубоко проникающих рифтов при расколе суперконтинента Родинии. Последующее развитие Палеоазиатского океана с формированием аккреционно-коллизионных комплексов Центрально-Азиатского складчатого пояса в палеозое приводило к развитию магматизма в условиях взаимодействия мантийного плюма с литосферой ранне существовавшей активной окраиной континента. Происходившие в мезозое процессы рифтогенеза могли не достигать сублитосферного уровня, и плюмовая деятельность ограничивалась плавлением только континентальной литосферной мантии. Сравнение геохимического и особенно изотопно-геохимического состава раннепалеозойского, девонского, пермо-триасового и мезозойского базитового и щелочного магматизма этих регионов позволило проследить, как эволюционировала литосферная мантия, а также участие плюмового компонента для разных этапов. Эти исследования находятся на переднем крае современных петрологических исследований.

На фоне научных исследований Василия Васильевича сбывались его профессиональные мечты и мечты его коллег. В 2005–2007 гг. при его непосредственном участии в Томском государственном университете был создан Аналитический центр геохимии природных систем, геолого-географический факультет был укомплектован новейшим оборудованием. Во многом благодаря инициативе Василия Васильевича поставлены прецизионные аналитические методики, которые позволяют проводить научные исследования на современном мировом уровне.

Поступательное развитие В.В. Врублевским научных связей Томского государственного университета с институтами Российской академии наук и ведущими геологическими школами нашей страны позволили ТГУ выйти на передовой международный уровень научных исследований. Сейчас лаборатории университета сотрудничают с лабораториями Канады (Университет Карлитон), США (Университет Вайоминга, Калифорнийский университет в Санта-Барбаре), Испании (Университет Саламанки) и многими другими. Ученые ТГУ проводят исследования на территории разных стран. Это позволило в 2017 г. выиграть Грант Правительства РФ для государственной поддержки научных исследований № 14.Ү26.31.0012 «Происхождение, металлогения, климатические эффекты и цикличность Крупных Изверженных Провинций (КИП)» под руководством ведущего ученого Р.Э. Эрнста.

С 2016 г. в Томском университете издается научный журнал «Геосферные исследования». Василий Васильевич являлся его идейным вдохновителем, основателем и главным редактором с 2017 г. Первый подход к изданию геологического журнала в Томском государственном университете Василий Васильевич предпринял в 2005 г., но в тот момент организация нового журнала столкнулась с рядом финансовых и административных проблем. В 2013 г. на фоне реализации государственной программы поддержки ведущих российских вузов 5-100 ТГУ вышел с инициативой учреждения серии собственных журналов, одним из которых стал журнал «Геосферные исследования». История журнала сложилась весьма успешно: в 2018 г. он вошел на поддерживающую платформу Web of Science, а в 2021 г. стал индексироваться в базе Scopus. Подобный успех во многом определился выверенной политикой главного редактора, выхватывающего из потока научной продукции лишь наиболее значимые работы. Следует отметить и огромный вклад, который внес В.В. Врублевский в содержание журнала в первый год его становления. Когда портфель публикаций был пуст, он вопреки конъектуре и требованиям научных фондов публиковал свои работы в «Геосферных исследованиях» - журнале, не имевшем регистрации ни в одной базе данных цитирования, и активно привлекал для публикации коллег и соратников.

Неоценима роль Василия Васильевича в подготовке кадров высшей квалификации. Несмотря на то, что только Василий Иванович Крупчатников защитил свою кандидатскую диссертацию под его руководством, целая плеяда томских геологов считает за честь называть себя учениками Василия Васильевича. Удивительная доброта, трепетное внимание и абсолютная бескорыстность в общении с молодым поколением вызывают искреннее восхищение и заслуженное уважение. Во многом благодаря принципиальной позиции В.В. Врублевского постоянно действующий семинар аспирантов и молодых ученых геолого-географического факультета не стал обыденной формальностью, а превратился в площадку актуальных научных дискуссий. В тот момент, когда в ТГУ появилась возможность возродить диссертационный совет по геологии и, в частности, по петрологии и минералогии, Василий Васильевич взял на себя ответственность по его организации. Он объединил под этой идеей ведущих ученых Томска, Сибири и России и сформировал диссертационный совет нового типа, очень тщательно подходя и к отбору защищаемых диссертаций.

Сейчас, по прошествии первых месяцев без Василия Васильевича, как никогда осознаешь тяжесть утраты не только близкого человека – друга и коллеги, но и ученого, роль которого в жизни Томского университета и геолого-географического факультета на текущий момент невосполнима. Отдавая свой долг памяти В.В. Врублевского, мы, его коллеги и ученики, должны продолжить и довести до логического завершения начатые им проекты, среди которых и исследования щелочных пород Монголии и Северо-Минусинской котловины, развитие диссертационного совета ТГУ по направлению Петрология и вулканология, а также продвижение журнала «Геосферные исследования». В рамках последней задачи хотелось бы отметить внедрение тематических выпусков журнала, посвященных актуальным проблемам, связанным с динамикой развития геосфер. Первый такой выпуск, посвященный щелочному магматизму и механизмам плюм-литосферного взаимодействия, был задуман еще при жизни В.В. Врублевского, и данный тематический номер посвящен его памяти не только как одного из основателей и первого редактора журнала «Геосферные исследования», но и как одного из ведущих ученых в области магматической петрологии.

Выражаем соболезнования родным и близким Василия Васильевича Врублевского.

Скорбим и будем помнить нашего друга, коллегу и учителя!

Е.М. Асочакова, О.В. Бухарова, И.Ф. Гертнер, О.М. Гринёв, А.Г. Дорошкевич, А.Э. Изох, Т.С. Краснова, В.И. Крупчатников, Д.В. Лычагин, А.М. Сазонов, В.П. Парначев, А.А. Петлина, П.А. Тишин, А.И. Чернышов

ПЕТРОЛОГИЯ

Научная статья УДК 552.11 doi: 10.17223/25421379/32/2

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЙ СОСТАВ ФЛЮОРИТОВ КАК ИНДИКАТОР ГЕНЕЗИСА КАРБОНАТИТОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ТУВЫ И ВОСТОЧНОГО ТАЙМЫРА

Валентина Олеговна Горюнова¹, Илья Романович Прокопьев², Анна Геннадьевна Дорошкевич³, Анастасия Евгеньевна Старикова⁴, Василий Фёдорович Проскурнин⁵, Василий Алексеевич Салтанов⁶



^{1, 2, 3, 4} Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

² Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия

^{5,6} Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

¹v.goryunova@g.nsu.ru

² prokop@igm.nsc.ru

³ doroshkevich@igm.nsc.ru

⁴a sklr@mail.ru

⁵vasily proskurnin@vsegei.ru

⁶ saltanov@vsegei.ru

Аннотация. Приведены первые данные о содержании редкоземельных элементов во флюоритах из кальцитовых карбонатитов с F-полиметаллическим оруденением Восточного Таймыра, а также Fe-F-REE сидеритовых карбонатитов Центральной Тувы. Результаты исследования показали, что флюориты имеют как сходства, так и различия в распределении редких земель, что отражает особенности среды кристаллизации минерала для каждого объекта и характеризует специфику состава флюоритов складчатых поясов формирования.

Ключевые слова: карбонатиты, флюорит, редкоземельные элементы, Таймыр, Арктика, Тува

Благодарности: мы крайне признательны аналитикам Н.С. Карманову, М.В. Хлестову (АЦ ИГМ СО РАН), а также А.Л. Рагозину и А.А. Ильину за помощь в проведенных исследованиях.

Источник финансирования: геология района изучена в рамках государственных заданий ИГМ СО РАН (122041400241-5) и ГИН СО РАН (ААААА21-121011390002-2). Исследования карбонатитов Тувы выполнены по государственному заданию ТувИКОПР СО РАН № 121031500140-2 (FUFS-2021-0002). Исследования карбонатитов Западного Забайкалья проведены за счет средств гранта РНФ 22-17-00078, https://rscf.ru/project/22-17-00078/.

Для цитирования: Горюнова В.О., Прокопьев И.Р., Дорошкевич А.Г., Старикова А.Е., Проскурнин В.Ф., Салтанов В.А. Редкоземельный состав флюоритов как индикатор генезиса карбонатитов Центральной Тувы и Восточного Таймыра // Геосферные исследования. 2024. № 3. С. 10–20. doi: 10.17223/25421379/32/2

Original article doi: 10.17223/25421379/32/2

RARE EARTH COMPOSITION OF FLUORITES AS AN INDICATOR OF THE ORIGIN OF CARBONATITES OF CENTRAL TUVA AND EASTERN TAIMYR

Valentina O. Goryunova¹, Ilya R. Prokopyev², Anna G. Doroshkevich³, Anastasiya E. Starikova⁴, Vasily F. Proskurnin⁵, Vasily A. Saltanov⁶

^{1, 2, 3, 4} V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia ^{1, 2, 3, 4} Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

² Tuva Institute for Integrated Development of Natural Resources SB RAS, Kyzyl, Russia

³N.L. Dobretsov Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia

^{5,6} A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg, Russia

¹v.goryunova@g.nsu.ru

^{1, 2, 3, 4} Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия

² prokop@igm.nsc.ru
 ³ doroshkevich@igm.nsc.ru
 ⁴ a_sklr@mail.ru
 ⁵ vasily_proskurnin@vsegei.ru
 ⁶ saltanov@vsegei.ru

Abstract. The mineral fluorite (CaF_2) has wide variations in physicochemical conditions of formation and crystallizes in magmatic, hydrothermal and sedimentary processes. Rare Earth Elements in minerals can indicate parameters of its formation, therefore it can be considered as geochemical markers or indicator of the genetic characteristics of fluorite-bearing rocks, including ore metallogenic specificity. In this work, the behavior of rare earth elements (REE) in fluorites of carbonatites of folded formation belts is studied using the example of polymetallic calciocarbonatites of Eastern Taimyr – ore fields Orientirnoye and Zeleninskoye, and Fe-F- REE siderite carbonatites of Central Tuva (Central Asian folded region) – Karasug and Ulatai ore fields. The objects have a number of similar geological and genetic characteristics: the rocks are located in tectonic fault zones formed under conditions of rifting and intraplate tectonic-magmatic activity. Carbonatite ore bodies take the form of dykes, stockworks, stocks and explosion pipes, and the main rock-forming minerals are calcite and siderite, fluorite, barite and bastnäsite-(Ce). The quantitative rare earth composition (La-Lu, Sr, Y, U and Th) of fluorites was determined using the LA-ICP MS and SEM-EPMA methods.

Studies of the rare earth composition of fluorites have shown that objects have their own characteristics of REE distribution, reflecting the specifics of crystallization of the mineral. Fluorites of the East Taimyr region are sharply different and have signs of a crustal component – low elemental contents ($\sum REE < 2.8 \text{ ppm}$), weak negative Ce and Yb anomalies. However, the predominance of medium REE over light and heavy REE, namely the dome-shaped configuration of the spectra, can be explained by atypical magmatic genesis associated with interaction with the crustal component. Fluorites of carbonatites of the Karasug and Ulatay fields are characterized by the highest concentrations of rare earth elements ($\sum REE = 502-7,352 \text{ ppm}$). Chondrite-normalized REE values showed that fluorites are divided into two types. The first type is characterized by a sharp predominance of light elements over heavy ones and a positive europium anomaly (Eu/Eu)n* up to 3.7). Depletion of light rare earth elements and a gentle slope of the spectra characterize the second type. Moreover, the only difference between the Karasug and Ulatai fluorites of the second type is the significant depletion of La in the first type.

The results of the study showed that fluorites have certain distribution configurations of rare earths, which reflects the characteristics of the mineral crystallization environment for each object and characterizes the specific composition of fluorites of folded formation belts.

Keywords: carbonatites, fluorite, rare earth, Taimyr, Arctic, Tuva

Acknowledgments: we are extremely grateful to analysts N.S. Karmanov, M.V. Khlestov (AC IGM SB RAS), as well as A.L. Ragozin and A.A. Ilyin for assistance in the research.

Source of financing: the geology of the objects was studied within the framework of state assignments from the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (122041400241-5) and the Geological Institute SB RAS (AAAA21-121011390002-2). Studies of carbonatites of Tuva were carried out according to the state order of TuviKOPR SB RAS No. 121031500140-2 (FUFS-2021-0002). Research on the carbonatites of Western Transbaikalia was carried out within the framework of the Russian Science Foundation project 22-17-00078, https://rscf.ru/project/22-17-00078/.

For citation: Goryunova V.O., Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Starikova A.E., Proskurnin V.F., Saltanov V.A. (2024) Rare earth composition of fluorites as an indicator of the genesis of carbonatites in Central Tuva and Eastern Taimyr. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research.* 3. pp. 10–20. (In Russian) doi: 10.17223/25421379/32/2

Введение

Флюорит применяется как сырье в металлургии и электронной, химической, космической и легкой промышленностях. Этот минерал используют для получения металлического алюминия и плавиковой кислоты, применяют в квантовых генераторах света и при изготовлении оптических линз и флюса [Данилов и др., 2022]. Флюорит имеет широкие вариации физико-химических условий образования и кристаллизуется в магматических, гидротермальных и осадочных условиях. В первых двух случаях флюоритовые месторождения образуются под действием ортомагматического и гидротермального флюидов. Такие флюиды, в свою очередь, генетически могут быть связаны с кислыми и щелочными магматическими породами, в том числе с карбонатитами [Prokopyev et al., 2023а].

Исследования [Fang et al., 2020] показывают, что распределение редкоземельных элементов (РЗЭ) будет различаться во флюорите в зависимости от физико-химических условий его формирования. Это позволяет использовать редкоземельный состав флюорита как индикатор генетических характеристик. Например, для месторождений, связанных с гранитоидами и пегматитами, такими как Святой Лаврентий (Канада), Манто (Мексика), Ермаковское (Бурятия), Урал (Мариинское), характерны положительная иттриевая и слабая отрицательная европиевая аномалии, в то время как флюориты месторождений, связанных с осадочными породами, например, Мадхья-Прадеш (Индия) и Пеннин (Англия), отличаются очень низкой концентрацией РЗЭ и отрицательными аномалиями Се и Yb [Magotra et al., 2017].

Геохимия РЗЭ флюоритов из карбонатитов, например, комплексы Окорусу (Намибия), Амба-Донгар (Индия), Мато-Прето (Бразилия), Сонгве-Хилл (Африка), Мушугай-Худук (Монголия), характеризуется значительным обогащением легкими РЗЭ при отсутствии отрицательной европиевой аномалии и присутствии положительной Y аномалии [Magotra et al., 2017].

Среди карбонатитовых комплексов выделяют особый геолого-промышленный тип с комплексной фтор-редкоземельной (F-Ba-(Sr)-REE) минерализацией, который образуется вследствие внутриплитного магматизма в рифтогенных обстановках в пределах складчатых поясов: например, карбонатитовые рудопроявления и месторождения Баян Обо, Ман-Опинь и Паньси (Китай) [Xu et al., 2012], Амба-Донгар (Индия), Аракса и Мато-Прето (Бразилия) [Palmer, Williams-Jones, 1996; Santos et al., 1996]. В России в пределах Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) известны карбонатитовые комплексы с REE-флюоритовой минерализацией в Западном Забайкалье (Южное, Аршан, Улан-Удэнское и др.), а также в Центральной Туве – исследуемые месторождения Карасуг и Улатай [Рипп и др., 2000; Никифоров и др., 2005]. Схожие карбонатитовые проявления с медно-полиметаллическим и флюорит-баритовым оруденением были описаны сотрудниками Института им. А.П. Карпинского (г. Санкт-Петербург) в 2006-2007 гг. в восточной части Таймыро-Североземельской складчатой области (ТСО) в ходе проведения мелкомасштабных геологоразведочных и ревизионно-поисковых работ [Проскурнин и др., 2016].

Фактический материал и методы исследования

Материалом для исследования послужили образцы карбонатитов Таймыра из коллекции Института им. А.П. Карпинского (г. Санкт-Петербург), которые были предоставлены В.Ф. Проскурниным, а также образцы карбонатитов Тувы, собранные И.Р. Прокопьевым из коллекции лаборатории № 215 ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Пробоподготовка осуществлялась следующим образом: обломки зерен флюоритов были отобраны из дробленой породы, далее были изготовлены препараты, представляющие собой полированные на алмазных пастах шайбы, в которых зерна флюоритов находились среди затвердевшей эпоксидной смолы. Текстурно-структурные характеристики пород, минеральные ассоциации и их составы были изучены с помощью оптического поляризационного микроскопа Olympus BX51 и энергодисперсионной спектрометрии (EDS), в сочетании с визуализацией электронов с обратным рассеянием (BSE) с использованием электронного микроскопа MIRA 3LMU SEM (TESCAN), снабженным INCA EDS 450 системой микроанализа с детектором EDS X-Max-80 Silicon Drift Detector. Ускоряющее напряжение составляло 20 кВ, ток пучка 1 нА, время набора спектра 20 с. Для количественной оптимизации применялся металлический Со. Исследование проводилось на базе аналитического центра многоэлементных и изотопных исследований в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Методом LA-ICP-MS определялся количественный редкоэлементный состав (Sr, Y, Th, U и все лантаноиды от La до Lu) флюоритов. Исследование проводилось на квадрупольном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой XSERIES2 (Thermo Scientific), объединённым с устройством лазерного пробоотбора (абляция) с длиной волны 212 нм (New Wave Research), диаметр лазерного пучка 50 мкм. Для калибровки прибора использовались сертифицированные стандарты NIST-612. Содержание кальция во флюорите, определенное на сканирующем электронном микроскопе MIRA 3LMU SEM, находилось в пределах 50-52 мас. % Са и использовалось в качестве внутреннего стандарта при расчетах. Для подбора наиболее подходящих областей для лазерной абляции использовались изображения зерен, которые были получены с помощью катодолюминесцентной съемки на микроскопе Carl Zeiss Axio.1, оборудованном специальной приставкой CL8200 Mk5-2. Исследования зерен флюоритов методом LA-ICP-MS проводились в Новосибирском государственном университете, а катодолюминисцентная съемка – в ЛабЭПОМ на базе НГУ (г. Новосибирск).

Геологическое строение

Восточно-Таймырские карбонатиты. Согласно петрологическим исследованиям карбонатитов Восточного Таймыра (рис. 1, *a*, *b*) [Петров и др., 2010], породы отнесены к специфичным карбонатитамкульдимитам, образующимся в результате плавления корового субстрата, и объединены в потенциальный рудный район (Подкаменно-Кульдимский район) с золотосодержащим медно-полиметаллическим и флюорит-баритовым оруденением, расположенным в юго-восточной части Южно-Таймырской складчатонадвиговой области.

Среднетриасовые карбонатиты-кульдимиты представляют собой субвертикальные дайково-жильные штокверки, мелкие штоки и некки, пластовые тела [Проскурнин и др., 2010а]. Мощность карбонатитовых тел достигает 200 м, а протяженность – 11 км. Для карбонатитов выделяют несколько фаз внедрения, которые структурно различаются по наличию секущих контактов между ними [Проскурнин и др., 20106]. В экзоконтакте со вмещающими породами в апикальных частях присутствуют угловато-округлые ксенолиты терригенных пород и метадолеритов с корочками альбит-карбонатного материала.

Центрально-Тувинские карбонатиты расположены на юге Алтае-Саянской складчатой области (АССО) и входят в состав Центрально-Азиатской позднемезозойской карбонатитовой провинции (рис. 1, *a*, *e*), которая была сформирована в результате внутриплитного магматизма [Ярмолюк, Коваленко, 2003]. Карбонатитовый пояс включает в себя три рудных узла (с севера на юг): Чайлюхемский, Карасугский и Улатай-Чозский, каждый из которых содержит несколько рудных полей (рис. 1, *e*).



Рис. 1. Схема размещения карбонатитов и особенности состава пород

а – схематическое расположение объектов в пределах Евразии после [Nikiforov, Yarmoluk, 2019], b – локализация карбонатитов Подкаменно-Кульдимского рудного поля в пределах Таймыра после [Prokopyev et al., 2023b], c, d – минеральный состав карбонатитов, e – расположение карбонатитов Центральной Тувы (Карасугского поля и Улатайского поля) в пределах Центральной Азии [Прокопьев, 2014], f–i – минеральный состав карбонатитов. Условные обозначения: Flr – флюорит, Cal – кальцит, Brt – барит, Sd – сидерит, Goe – гематит, Bsn-(Ce) – бастнезит, Prs-(Ce) – паризит, Mnz-(Ce) – монацит, Rt – ругил, K-fsp – калиевый полевой шпат, Anh – ангидрит, Qtz – кварц

Fig. 1. Layout of carbonatites and features of rock composition

a – schematic location of objects within Eurasia according to [Nikiforov, Yarmolyuk, 2019], b – localization of carbonatites of the Podkamenno-Kuldim ore field within Taimyr according to [Prokopyev et al., 2023b], c, d – mineral composition of carbonatites, e – location of carbonatites Central Tuva (Karasug field and Ulatay field) inside Central Asia according to [Prokopyev, 2014], f–i – mineral composition of carbonatites. Abbreviations: Flr – fluorite, Cal – calcite, Brt – barite, Sd – siderite, Goe – hematite, Bsn-(Ce) – bastnäsite, Prs-(Ce) – parisite. Mnz-(Ce) – monazite, Rt – rutile, K-fsp – potassium feldspar, Anh – anhydrite, Qtz – quartz

Карасугское рудное поле состоит из восьми отдельных крутопадающих трубообразных зонально-кольцевых (до 750 м в плане) и дайкообразных тел (протяженностью до 1 300 м и мощностью до 160 м) [Онтоев, 1984; Никифоров и др., 2005, 2006]. Выделяют две фазы внедрения карбонатитов: анкерит-кальцитовую (раннюю) и флюорит-барит-сидеритовую (позднюю). Первая локализуется в узлах пересечения разломов, а

вторая – вдоль штоков ранней фазы, пересекая их или образуя собственные тела. Рудоносные F-Ba-REE сидеритовые карбонатиты содержат обломки вмещающих терригенно-осадочных пород и различных по составу магматических пород (сиениты и базиты), включая обломки ранних анкерит-кальцитовых карбонатитов [Онтоев, 1984; Никифоров и др., 2005, 2006; Прокопьев, 2014]. Выходы карбонатитов в пределах Улатайского рудного поля (Улатай-Чоза, см. рис. 1, е) приурочены к крупному тектоническому выступу, который контролируется серией субширотных и северо-западных разломов [Онтоев, 1984; Никифоров и др., 2005]. Выделяют анкерит-кальцитовые и сидеритовые карбонатиты в пределах поля. Первые наблюдаются по всей площади Улатайского рудного поля, их форма тел – жилы мощностью до 5 м и дайки мощностью до 25 м. Вторая разновидность карбонатитов проявлена только в южной части поля [Никифоров и др., 2005].

Результаты

Флюоритовая минерализация Восточно-Таймырских карбонатитов. Карбонатиты Ориентирного и Зелёнинского потенциальных рудных полей Подкаменно-Кульдимского района характеризуются средне- и мелкозернистой структурой и прожилково-вкрапленной и брекчиевидно-флюидальной текстурами (рис. 1, *c*, *d*). Главными породообразующими минералами являются кальцит, доломит, флюорит, барит. Ко второстепенным относятся апатит, стронцианит, целестин, ильменит, хлорит, эпидот, кварц, рутил, титанит и сульфиды сфалерит, пирит, пирротин и халькопирит. Акцессорный минерал представлен цирконом. Флюорит образует как среднезернистые агрегаты совместно кальцитом и баритом (рис. 1, c), так и рассеянные вкрапленники зерен среди кальцита (рис. 1, *d*). Для минерала характерна неравномерная голубовато-фиолетовая местами с ритмической зональностью окраска, (рис. 2, a). Катодолюминесцентная съемка не выявила зон с осцилляторной зональностью в данных флюоритах (рис. 2, b).

Флюоритовая минерализация карбонатитов Центральной Тувы. Карбонатиты Карасугского и Улатайского рудных полей характеризуются неравномернозернистой порфировидной структурой и неоднородной брекчиевой текстурой (рис. 1, f, g). Главные породообразующие минералы: кальцит, флюорит, бастнезит-(Ce), барит. Второстепенные представлены сидеритом, ангидритом, магнетитом, калиевым полевым шпатом, пиритом, монацитом-(Ce), мусковитом, кварцем, паризит-(Ce) и синхизитом-(Ce), а также рутилом (рис. 1, h, i).



Рис. 2. Флюориты карбонатитов Таймыра и Тувы

a, b – Подкаменно-Кульдимский район, c, d – Улатайское рудное поле, e, f – Карасугское поле: a, c, e – неравномерная зональность зерен флюорита в проходящем свете, b, d, f – фотографии, полученные при катодолюминесцентной съёмке. Черные округлые полости – место анализа методом LA-ICP-MS

Fig. 2. Fluorites of carbonatites of Taimyr and Tuva

a, b – Podkamenno-Kuldimsky region, c, d – Ulatay ore field, e, f – Karasug field: a, c, e – uneven zoning of fluorite grains in transmitted light, b, d, f – cathodoluminescence photography. Black round cavities are the site of LA-ICP-MS analysis

Основная масса сложена мелкозернистым кальцитом, баритом, бастнезитом-(Се). Магнетит, по которому идут псевдоморфозы гематита, образует порфировидные индивиды субизометричной формы. В виде включений в магнетите встречаются кальцит и монацит. В срастании с кварцем находятся ангидрит, рутил и монацит. Минеральная ассоциация флюорита Карасугского рудного поля схожа с Улатайским. Общий минеральный состав: кальцит, флюорит, бастнезит, апатит, барит, сидерит, доломит, калиевый полевой шпат, магнетит, монацит, кварц, рутил, стронцианит, циркон, хлорит, гематит. Состав обломков, изучаемых образцов: биотит, плагиоклаз (олигоклаз), кварц. Флюорит на обоих проявлениях тувинских карбонатитов представлен порфировыми вкрапленниками зерен и кубическими кристаллами, расположенными среди гематита, сидерита и кальцита, магнетита, барита и бастнезита-(Се). Флюориты по морфо-текстурным признакам разделяются на две генерации: первая – идиоморфные кристаллы с концентрически-зональной окраской (см. рис. 1, f, g; 2, e) от зеленоватого в центре до светло-зеленой и фиолетовой по периферии (магматические); вторая - мелкие рассеянные зерна, агрегаты и прожилки светло-фиолетового и светло-зеленого флюорита (рис. 2, с) в ассоциации с баритом, поздним кальцитом и бастнезитом-(Се). С помощью катодолюминесцентной съемки установлены области со слабой осцилляторной зональностью (рис. 2, d, f).

Редкоземельный состав флюоритов. Общее содержания РЗЭ во флюоритах карбонатитов Восточного Таймыра низкое – от 0,11 до 2,8 г/т. На диаграмме распределения РЗЭ, нормированных на хондрит, флюориты разделились на две генерации, которые различаются конфигурацией спектров (рис. 3, а, нижние спектры). Первая генерация характеризуется резким преобладанием легких РЗЭ над тяжелыми: (La/Yb)n соотношение высокое (от 172 до 503), (Gd/Yb)n меньше (от 18 до 36). Европиевая аномалия практически отсутствует ($(Eu/Eu^*)n = 0, 7-0, 8$). Кроме того, для перовой (ранней) генерации свойственны пониженные содержания Y и Sr, 0,4-0,7 и 35-51 г/т соответственно, а также достаточно низкое отношение U/Th (0,001-0,7) (рис. 3, *a*, желтые спектры). Вторая генерация отличается существенным обеднением легкими редкоземельными элементами относительно средних элементов, за исключением La ((La/Yb)n coотношение варьирует от 0,11 до 14). Соответственно, для РЗЭ спектров флюоритов второй генерации наблюдается слабая отрицательная Се-аномалия (рис. 3, а, светло-коричневые спектры). Также для этой генерации отличительным признаком является преобладание средних РЗЭ над легкими и тяжелыми ((Gd/Yb)n = 2-22, со средним 9 и (Gd/La)n = 0,5-53 со средним 9). Однако содержания Sr и Y выше, чем для перовой генерации (12–182 и 0,8–6 г/т соответственно) (рис. 3, *a*, светло-коричневые спектры).

Флюориты Улатайского и Карасугского рудных полей Тувы имеют самые высокие концентрации РЗЭ – до 1 565 и 7 352 г/т соответственно. Кроме того, содержания РЗЭ варьируют в зависимости от окраски флюоритов. Например, для светлоокрашенных флюоритов Карасугского поля общее количество РЗЭ находится в пределах от 3 524-7 352 г/т, а для темно-фиолетовых флюоритов суммарное содержание РЗЭ заметно ниже, от 22 до 1 148 г/т (рис. 3, а, светло- и темно-синие спектры). U/Th отношение также выше у светлых флюоритов: 5-55 против 0,02-15, в то время как количество (г/т) Sr и Y выше у темнофиолетовых, чем у светлых: 450-1 536 против 644-784 и 186-3 568 против 23-93 соответственно. Улатайские флюориты имеют схожие различия: сумма РЗЭ для светлых составляет 502-1 302 г/т, а для фиолетовых 794-1 565 г/т (рис. 3, а, светло- и темно-зеленые спектры). U/Th, концентрации Sr и Y так же, как и для карасугских флюоритов, выше для темноокрашенных флюоритов: U/Th = 0,04-128, Sr варьирует от 1 005 до 1 406 г/т, а Y – от 971 до 3 188 г/т. Для светлоокрашенных флюоритов U/Th составляет 0,13-10, Sr - 128-211 г/т, Y – 98–537 г/т (рис. 3, *a*).

РЗЭ спектры флюоритов двух полей карбонатитов Центральной Тувы четко разделились на две группы (рис. 3, *a*). Первая группа (светлая окраска флюоритов) характеризуется явным преобладанием легких РЗЭ над тяжелыми и положительной европиевой аномалией.

Отношение (La/Yb)п и (Eu/Eu)п для карасугских флюоритов составляет 3–85 и 1,6–2,1, а для улатайских от 7–93 и 2,2–3,7 соответственно. Существенное различие центрально-тувинских флюоритов заключается в том, что карасугские флюориты первой группы имеют обогащение легкими РЗЭ (Ce-Sm) относительно La и Eu. Вторая группа флюоритов карасугских и улатайских карбонатитов имеют практически идентичные содержания РЗЭ и конфигурации спектров: обеднение легкими элементами (La/Yb = 0,19– 0,23 и 0,1–1,76) и слабоположительная европиевая аномалия (Eu/Eu = 1,06–1,14 и 0,78–1,11).

Обсуждение

Флюорит в рассмотренных карбонатитах Тувы и Таймыра является основным породообразующим минералом и на всех объектах представлен двумя генерациями, согласно морфо-текстурным признакам, – ранней (магматической) и поздней (гидротермальной), что коррелирует с особенностями распределения редкоземельных элементов.

Высокие содержания РЗЭ, явное преобладание легких элементов над тяжелыми, а также отсутствие ярко выраженных аномалий относительно соседних элементов, за исключением европиевой аномалии для первой группы тувинских флюоритов, являются типичным для флюоритов из карбонатитовых комплексов [Redina et al., 2020, 2021]. Повышенные содержания легких РЗЭ для карасугских флюоритов могут отражать многостадийную или сравнительно раннюю кристаллизацию минерала относительно бастнезита, в отличие от флюоритов Улатайского поля. Наличие слабоположительной европиевой аномалии может отражать смену окислительно-восстановительных условий при изменении флюидного режима формирования карбонатитов [Santos et al., 1996; Xu et al., 2012; Redina et al., 2021]. Обеднение легкими РЗЭ для второй группы тувинских флюоритов может быть связано с комплексом (REE-F)²⁺, стабильность которого[,] возрастает от La до Lu при температурах ниже 250 °С [Wood, 1990]. Распределение элементов для восточно-таймырских флюоритов, их широкие вариации и низкие содержания, а также отрицательные Се и Yb аномалии могут быть наследованы от корового компонента, в результате плавления которого образовались карбонатиты Восточного Таймыра [Петров и др., 2010; Проскурнин и др., 2010а, bб]. Многие исследователи применяют диаграмму Tb/Ca-Tb/La [Möller et al., 1976], основанную на фракционировании РЗЭ во флюорите в процессе кристаллизации и перекристаллизации, для определения происхождения флюорита. Индекс Тb/Са определяет среду, из которой флюорит образовывался, а Tb/La – степень фракционирования. Фигуративные точки флюоритов карбонатитов Тувы на диаграмме Tb/Ca-Tb/La попадают в области состава флюоритов карбонатитов мира, образованных в складчатых поясах, такие как Амба-Донгар (Индия), Сонгве (Малави), Баян-Обо (КНР), Окорусу (Намибия), а также комплексы Мушугай-Худук (Монголия) и Западного Забайкалья (Аршан, Южное, Улан-Удэнское и др.) (рис. 3, b). В то же время флюориты карбонатитов Восточного Таймыра образуют собственный отличительный ареал (рис. 3, b), что может отражать специфичное образование самих карбонатитов (вклад коровой компоненты в источнике).



Рис. 3. Спектры распределения РЗЭ во флюоритах (слева) и диаграмма Tb/La-Tb/Ca для исследуемых флюоритов в сравнении с флюоритами карбонатитов мира (справа):

а – цветом показаны генерации флюорита, светлый оттенок – ранняя генерация, более темный оттенок – поздняя генерация; РЗЭ составы флюорита нормированы на хондрит по [McDonough, Sun, 1995], b – составы флюоритов карбонатитов мира: Мушугай-Худук [Redina et al., 2020], Аршан + Улан-Удэнское + Южное [Redina et al., 2021], Амба Донгар [Palmer, Williams-Jones, 1996], Баян Обо [Xu et al., 2012], Сонгве Хилл [Broom-Fendley et al., 2017], Окорусу [Bühn et al., 2002]. Диаграмма по Möller и соавт. [1976]

Fig. 3. REE distribution spectra in fluorites (left) and Tb/La-Tb/Ca diagram for the concentration of fluorites in view with fluorites of carbonatites of the world (right):

a – color showing the generation of fluorite, light color of color – early generation, darker shade – late generation; REE compositions of fluorite are normalized to chondrite according to [McDonough, Sun, 1995], b – compositions of fluorites of carbonatites of the world: Mushugai-Khuduk [Redina et al., 2020], Arshan + Ulan-Udenskoe + Yuzhnoye [Redina et al., 2021], Amba Dongar [Palmer, Williams-Jones, 1996], Bayan Obo [Xu et al., 2012], Songwe Hill [Broom-Fendley et al., 2017], Okorusu [Bühn et al., 2002]. The diagram according to Möller et al. [1976]

Заключение

На сегодняшний день не существует диаграмм и критериев для точного разделения флюоритов по генезису в соответствии с их редкоземельными характеристиками. В большинстве статьей, посвященных данной тематике, используется диаграмма Möller и соавт. [1976], которая изначально была построена, основываясь на дискретном разделении на три группы флюоритовых месторождений Германии и Италии, сформированных в определенных геологических обстановках. Кроме того, как отмечали и сами авторы, при использовании данной диаграммы для корректного определения истинного генезиса флюоритов необходимо сравнивать распределение редких земель в самом минерале и в сосуществующих породах.

Наши исследования флюоритов в совокупности с уже имеющимися петрологическими данными по карбонатитам Таймыра и Тувы показали, что флюориты имеют несколько генераций и образуются на магматическом и гидротермальном этапах. В пользу магматического генезиса свидетельствуют морфотекстурные признаки, состав редкоземельных элементов во флюорите. Кроме того, существуют термобарогеохимические исследования включений во флюорите и других парагенетических минералов, которые подтверждают магматическое и гидротермальное происхождение флюоритов карбонатитов Тувы и Таймыра [Prokopyev et al., 2016, 2023b]. Именно поэтому при использовании диаграмм, в частности диаграммы Tb/Ca-Tb/La, для интерпретации генезиса флюоритов из карбонатитов, возможно выделение именно полей распространения флюоритов различного генезиса, а также сравнение этих полей по разным объектам в мире. Вместе с тем, необходимо понимать, что геохимические характеристики флюоритов должны коррелировать с другими петрологическими данными, а для сравнения флюоритовых объектов необходимо учитывать источники и физико-химические условия образования расплавов и растворов для минералов (и пород), а также геодинамический режим формирования.

Список источников

- Данилов А.П., Дорожкина Л.А., Ефанова О.Н., Забродский Г.С., Козловский Д.С. и др. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году. М., 2022. 626 с.
- Никифоров А.В., Болонин А.В., Покровский Б.Г., Сугоракова А.М., Чугаев А.В., Лыхин Д.А. Геохимия изотопов (О, С, S, Sr) и Rb-Sr возраст карбонатитов Центральной Тувы // Геология рудных месторождений. 2006. Т. 48, № 4. С. 296–319.
- Никифоров А.В., Болонин А.В., Сугоракова А.М., Попов В.А., Лыхин Д.А. Карбонатиты Центральной Тувы: геологическое строение, минеральный и химический состав // Геология рудных месторождений. 2005. Т. 47, № 4. С. 360–382.
- Онтоев Д.О. Геология комплексных редкоземельных месторождений. М. : Недра, 1984. С. 59–78.

Петров О.В., Проскурнин В.Ф., Гавриш А.В., Мозолёва И.Н., Лохов К.И., Толмачёва Е.В., Петрушков Б.С., Багаева А.А. Раннемезозойские карбонатиты Восточного Таймыра // Региональная геология и металлогения. 2010. № 44. С. 5–22.

Прокопьев И.Р. Геологические и физико-химические условия формирования карбонатитов Fe-F-REE Центральной Тувы : дис. ... канд. геол.- минерал. наук. Новосибирск, 2014. 152 с.

Проскурнин В.Ф., Петров О.В., Багдасаров Э.А., Росинов М.И., Толмачева Е.В., Ларионов А.Н., Бильская И.В., Гавриш А.В., Мозолева И.Н., Петрушков Б.С. О происхождении карбонатитов Восточного Таймыра на основе изотопно-геохи-

мического изучения цирконов // Записки РМО. 2010а. № 139. С. 19-36.

Проскурнин В.Ф., Петров О.В., Гавриш А.В., Падерин П.Г., Мозолева И.Н., Петрушков Б.С., Багаева А.А. Раннемезозойский пояс карбонатитов* полуострова Таймыр // Литосфера. 2010б. № 3. С. 95–102.

Проскурнин В.Ф., Шнейдер Г.В., Гавриш А.В., Нагайцева Н.Н., Романов А.П. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Таймырско-Североземельская. Лист S-46 – Тарея. Объяснительная записка. СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. 490 с.

Рипп Г.С., Кобылкина О.В., Дорошкевич А.Г., Шаракшинов А.О. Позднемезозойские карбонатиты Западного Забайкалья. Улан-Удэ : БНЦ СО РАН, 2000. 224 с.

Ярмолюк В.В., Коваленко В.И. Глубинная геодинамика и мантийные плюмы, их роль в формировании Центрально-Азиатского складчатого пояса // Петрология. 2003. Т. 11, № 6. С. 504–531.

Broom-Fendley S., Brady A.E., Wall F., Gunn G., Dawes W. REE minerals at the Songwe Hill carbonatite, Malawi: HREEenrichment in late-stage apatite // Ore Geology Reviews. 2017. V. 81. P. 23–41. doi: 10.1016/j.oregeorev.2016.10.019

Bühn B., Rankin A.H., Schneider J., Dulski P. The nature of orthomagmatic, carbonatitic fluids precipitating REE, Sr-rich fluorite: fluid-inclusion evidence from the Okorusu fluorite deposit, Namibia // Chemical Geology. 2002. V. 186. P. 75–98. doi: 10.1016/S0009-2541(01)00421-1

Fang Y., Zou H., Bagas L., Said N., Li Y., Liu H. Fluorite deposits in the Zhejiang Province, southeast China: The possible role of extension during the late stages in the subduction of the Paleo-Pacific oceanic plate, as indicated by the Gudongkeng fluorite deposit // Ore Geology Reviews. 2020. V. 117. 15 p. doi: 10.1016/j.oregeorev.2019.103276

Magotra R., Namga S., Singh P., Arora N., Srivastava P.K. A new classification scheme of fluorite deposits // International Journal of Geosciences. 2017. V. 8. P. 599–610. doi: 10.4236/ijg.2017.84032

McDonough W.F., Sun S.S. The composition of the Earth // Chemical Geology. 1995. V. 120. P. 223–253. doi: 10.1016/0009-2541(94)00140-4

Möller P., Parekh P.P., Schneider H.J. The application of Tb/Ca – Tb/La abundance ratios to problems of fluorspar genesis // Mineralium Deposita. 1976. V. 11. P. 111–116. doi: 10.1007/BF00203098

Nikiforov A.V., Yarmolyuk V.V. Late Mesozoic carbonatite provinces in Central Asia: Their compositions, sources and genetic settings // Gondwana Research. 2019. V. 69. P. 56–72. doi: 10.1016/j.gr.2018.11.014

Palmer D.S., Williams-Jones A. Genesis of the carbonatite-hosted fluorite deposit at Amba Dongar, India: evidence from fluid inclusions, stable isotopes, and whole rock-mineral geochemistry // Economic Geology. 1996. V. 91. P. 934–950. doi: 10.2113/GSECONGE0.91.5.934

Prokopyev I.R., Borisenko A.S., Borovikov A.A., Pavlova G.G. Origin of REE-rich ferrocarbonatites in southern Siberia (Russia): implications based on melt and fluid inclusions // Mineralogy and Petrology. 2016. V. 110. P. 845–859. doi: 10.1007/s00710-016-0449-z

Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Redina A.A. Brine–Melts and Fluids of the Fe-F-P-(Ba)-(Sr)-REE Central Asian Carbonatite Province (Southern Siberia and Mongolia): The Petrogenetic Aspects // Minerals. 2023a. V. 13, No. 573. 17 p. doi: 10.3390/min13040573

Prokopyev I.R. Doroshkevich A.G. Starikova A.E. Yang Y., Goryunova V.O., Tomoshevich N.A., Proskurnin V.F., Saltanov V.A., Kukharenko E.A. Geochronology and origin of the carbonatites of the Central Taimyr Region, Russia (Arctica): Constraints on the F-Ba-REE mineralization and the Siberian Large Igneous Province // Lithos. 2023b. P. 440–441. doi: 10.1016/j.lithos.2023.107045

Redina A.A., Doroshkevich A.G., Veksler I.V., Wohlgemuth-Ueberwasser C.C. Fluorite Mineralization Related to Carbonatitic Magmatism in the Western Transbaikalia: Insights from Fluid Inclusions and Trace Element Composition // Minerals. 2021. V. 11. 13 p. doi: 10.3390/min11111183

Redina A.A., Nikolenko A.M., Doroshkevich A.G., Prokopyev I.R., Wohlgemuth-Ueberwasser C., Vladykin N.V. Conditions for the crystallization of fluorite in the Mushgai-Khudag complex (Southern Mongolia): Evidence from trace element geochemistry and fluid inclusions // Geochemistry 2020. V. 80. 11 p. doi: 10.1016/j.chemer.2020.125666

Santos R.V., Dardenne M.A., De Oliveira C.G. Rare earth elements geochemistry of fluorite from the Mato Preto carbonatite complex, Southern Brazil // Revista Brasileira de Geociências. 1996. V. 26, No. 2. P. 81–86. doi: 10.25249/0375-7536.199628186

Wood S.A. The aqueous geochemistry of the rare-earth elements and yttrium, 1. Review of available low-temperature data for inorganic complexes and the inorganic REE speciation of nature waters // Chemical Geology. 1990. V. 82. P. 159–186. doi: 10.1016/0009-2541(90)90080-O

Xu C., Taylor R.N., Li W., Kynicky J., Chakhmouradian A.R., Song W. Comparison of fluorite geochemistry from REE deposits in the Panxi region and Bayan Obo, China // Journal of Asian Earth Sciences. 2012. V. 57. P. 76–89. doi: 10.1016/j.jseaes.2012.06.007

References

Danilov A.P., Dorozhkina L.A., Efanova O.N., Zabrodsky G.S., Kozlovsky D.S. et al. *Gosudarstvennyy doklad o sostoyanii i ispol'zovanii mineral'no-syr'evykh resursov Rossiyskoy Federatsii v 2021 godu* [State report on the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2021]. Moscow, 2022. 626 p. In Russian

Nikiforov A.V., Bolonin A.V., Chugaev A.V., Lykhin D.A., Pokrovsky B.G., Sugorakova A.M. Isotope geochemistry (O, C, S, Sr) and Rb-Sr age of carbonatites in Central Tuva // *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology of Ore Deposits]. 2006. V. 48. No. 4. pp. 296–319. In Russian

Nikiforov A.V., Bolonin A.V., Sugorakova A.M., Popov V.A., Lykhin D.A. Carbonatites of Central Tuva: geological structure, mineral and chemical composition// *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology of Ore Deposits]. 2005. V. 47. No. 4. pp. 360–382. In Russian

Ontoev D.O. *Geologiya kompleksnykh redkozemel'nykh mestorozhdeniy* [Geology of complex rare earth deposits]. Moscow: Nedra. 1984. pp. 59–78. In Russian

Petrov O.V., Proskurnin V.F., Gavrish A.V., Mozoleva I.N., Lokhov K.I., Tolmacheva E.V., Petrushkov B.S., Bagaeva A.A. *Rannemezozoyskie karbonatity Vostochnogo Tay*myra [Early Mesozoic carbonatites of Eastern Taimyr] // Regional geology and metallogeny. 2010. No. 44. pp. 5–22. In Russian

Prokopyev I.R. *Geologicheskie i fiziko-khimicheskie usloviya formirovaniya karbonatitov Fe-F-REE Tsentral'noy Tuvy* [Geological and physicochemical conditions for the formation of Fe-F-REE carbonatites in Central Tuva]. Brief PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Novosibirsk. 2014. 152 p. In Russian

Proskurnin V.F., Petrov O.V., Bagdasarov E.A., Rosinov M.I., Tolmacheva E.V., Larionov A.N., Bilskaya I.V., Gavrish A.V., Mozoleva I N., Petrushkov B.S. Origin of carbonatites of Eastern Taimyr deduced from an isotopic and geochemical study of zircons // Zapiski RMO. 2010a. No. 139. pp. 19–36. In Russian

Proskurnin V.F., Petrov O.V., Gavrish A.V., Paderin P.G., Mozoleva I.N., Petrushkov B.S., Bagaeva A.A. *Rannemezozoyskiy poyas karbonatitov* poluostrova Taymyr* [Early Mesozoic carbonatite belt* of the Taimyr Peninsula] // Lithosphere. 2010b. No. 3. pp. 95–102. In Russian

Proskurnin V.F., Shneider G.V., Gavrish A.V., Nagaitseva N.N., Romanov A.P. et al. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Taymyrsko-Severozemel'skaya. List S-46 – Tareya. Ob"yasnitel'naya zapiska* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1: 1,000,000 (third generation). Taimyr-Severozemelskaya series. Sheet S-46 – Tareya. Explanatory letter]. St. Petersburg: VSEGEI Cartographic Factory. 2016. 490 p. In Russian

Ripp G.S., Kobylkina O.V., Doroshkevich A.G., Sharakshinov A.O. Pozdnemezozoyskie karbonatity Zapadnogo Zabaykal'ya [Late Mesozoic carbonatites of Western Transbaikalia]. Ulan-Ude: BSC SB RAS. 2000. 224 p. In Russian

Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I. *Glubinnaja geodinamika i mantijnye pljumy, ih rol' v formirovanii Central'no-Aziatskogo skladchatogo pojasa* [Deep geodynamics and mantle plumes, their role in the transition of the Central Asian fold belt] // *Petrologiya* [Petrology]. 2003. V. 11. No. 6. pp. 504–531. In Russian

Broom-Fendley S., Brady A.E., Wall F., Gunn G., Dawes W. REE minerals at the Songwe Hill carbonatite, Malawi: HREE-enrichment in late-stage apatite // Ore Geology Reviews. 2017. V. 81. pp. 23–41. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.019

Bühn B., Rankin A.H., Schneider J., Dulski P. The nature of orthomagmatic, carbonatitic fluids precipitating REE, Sr-rich fluorite: fluid-inclusion evidence from the Okorusu fluorite deposit, Namibia // Chemical Geology. 2002. V. 186. pp. 75–98. https://doi.org/10.1016/S0009-2541(01)00421-1

Fang Y., Zou H., Bagas L., Said N., Li Y., Liu H. Fluorite deposits in the Zhejiang Province, southeast China: The possible role of extension during the late stages in the subduction of the Paleo-Pacific oceanic plate, as indicated by the Gudongkeng fluorite deposit // Ore Geology Reviews. 2020. V. 117. 15 p. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103276

Magotra R., Namga S., Singh P., Arora N., Srivastava P.K. A new classification scheme of fluorite deposits // International Journal of Geosciences. 2017. V. 8. pp. 599-610. https://doi.org/10.4236/ijg.2017.84032

McDonough W.F., Sun S.S. The composition of the Earth // Chemical Geology. 1995. V. 120. pp. 223-253. https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4

Möller P., Parekh P.P., Schneider H.J. The application of Tb/Ca - Tb/La abundance ratios to problems of fluorspar genesis // Mineralium Deposita. 1976. V. 11. pp. 111-116. https://doi.org/10.1007/BF00203098

Nikiforov A.V., Yarmolyuk V.V. Late Mesozoic carbonatite provinces in Central Asia: Their compositions, sources and genetic settings // Gondwana Research. 2019. V. 69. pp. 56-72. https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.11.014

Palmer D.S., Williams-Jones A. Genesis of the carbonatite-hosted fluorite deposit at Amba Dongar, India: evidence from fluid inclusions, stable isotopes, and whole rock-mineral geochemistry // Economic Geology. 1996. V. 91. pp. 934-950. https://doi.org/10.2113/GSECONGEO.91.5.934

Prokopyev I.R., Borisenko A.S., Borovikov A.A., Pavlova G.G. Origin of REE-rich ferrocarbonatites in southern Siberia (Russia): implications based on melt and fluid inclusions // Mineralogy and Petrology. 2016. V. 110. pp. 845-859. https://doi.org/10.1007/s00710-016-0449-z

Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Redina A.A. Brine-melts and fluids of the Fe-F-P-(Ba)-(Sr)-REE central Asian carbonatite province (Southern Siberia and Mongolia): The Petrogenetic aspects // Minerals. 2023a. V. 13. No. 573. 17 p. https://doi.org/10.3390/min13040573

Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Starikova A.E., Yang Y., Goryunova V.O., Tomoshevich N.A., Proskurnin V.F., Saltanov V.A., Kukharenko E.A. Geochronology and origin of the carbonatites of the Central Taimyr Region, Russia (Arctica): Constraints on the F-Ba-REE mineralization and the Siberian Large Igneous Province // Lithos. 2023b. pp. 440-441. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107045

Redina A.A., Doroshkevich A.G., Veksler I.V., Wohlgemuth-Ueberwasser C.C. Fluorite mineralization related to carbonatitic magmatism in the Western Transbaikalia: insights from fluid inclusions and trace element composition // Minerals. 2021. V. 11. 13 p. https://doi.org/10.3390/min11111183

Redina A.A., Nikolenko A.M., Doroshkevich A.G., Prokopyev I.R., Wohlgemuth-Ueberwasser C., Vladykin N.V. Conditions for the crystallization of fluorite in the Mushgai-Khudag complex (Southern Mongolia): Evidence from trace element geochemistry and fluid inclusions // Geochemistry 2020. V. 80. 11 p. https://doi.org/10.1016/j.chemer.2020.125666

Santos R.V., Dardenne M.A., De Oliveira C.G. Rare earth elements geochemistry of fluorite from the Mato Preto carbonatite complex, Southern Brazil // Revista Brasileira de Geociências. 1996. V. 26. No. 2. pp. 81-86. https://doi.org/10.25249/0375-7536.199628186

Wood S.A. The aqueous geochemistry of the rare-earth elements and yttrium, 1. Review of available low-temperature data for inorganic complexes and the inorganic REE speciation of nature waters // Chemical Geology, 1990. V. 82. pp. 159-186. https://doi.org/10.1016/0009-2541(90)90080-Q

Xu C., Taylor R.N., Li W., Kynicky J., Chakhmouradian A.R., Song W. Comparison of fluorite geochemistry from REE deposits in the Panxi region and Bayan Obo, China // Journal of Asian Earth Sciences. 2012. V. 57. pp. 76-89. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.06.007

Информация об авторах:

Горюнова В.О., инженер, лаборатория рудоносности щелочного магматизма, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН; студент, Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия.

E-mail: v.goryunova@g.nsu.ru

Прокопьев И.Р., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория рудоносности щелочного магматизма, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН; доцент, старший преподаватель, заместитель заведующего кафедрой, кафедра петрографии и геологии рудных месторождений, геолого-геофизический факультет, Новосибирский государственный университет, Новосибирск; ведущий научный сотрудник, лаборатория геодинамики, магматизма и рудообразования, Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия. E-mail: prokop@jgm.nsc.ru

Дорошкевич А.Г., доктор геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией, лаборатория рудоносности щелочного магматизма, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН; ведущий научный сотрудник, лаборатория петрологии, Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия.

E-mail: doroshkevich@igm.nsc.ru

Старикова А.Е., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория термобарогеохимии, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН; старший научный преподаватель, кафедра минералогии и геохимии, геолого-геофизический факультет, Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия. E-mail: a sklr@mail.ru

Проскурнин В.Ф., доктор геолого-минералогических наук, заведующий отделением, отдел региональной геологии и полезных ископаемых севера Сибири (сектор Таймыра), Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: vasily proskurnin@vsegei.ru

Салтанов В.А., геолог I категории, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия.

E-mail: saltanov@vsegei.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors:

Goryunova V.O., Engineer, Laboratory of Ore Bearing of Alkaline Magmatism, Institute of Geology and Mineralogy named after V.S. Sobolev SB RAS; student, Faculty of Geology and Geophysics, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia. E-mail: v.goryunova@g.nsu.ru

Prokopyev I.R., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Laboratory of Ore Bearing of Alkaline Magmatism, Institute of Geology and Mineralogy named after V.S. Sobolev SB RAS; Associate Professor, Senior Lecturer, Deputy Head of the Department, Department of Petrography and Geology of Ore Deposits, Faculty of Geology and Geophysics, Novosibirsk State University, Novosibirsk; Leading Researcher, Laboratory of Geodynamics, Magmatism and Ore Formation, Tuva Institute for Integrated Development of Natural Resources SB RAS, Kyzyl, Russia.

E-mail: prokop@igm.nsc.ru

Doroshkevich A.G., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory, Laboratory of Ore Bearing of Alkaline Magmatism, Institute of Geology and Mineralogy named after V.S. Sobolev SB RAS; Leading Researcher, Petrology Laboratory, N.L. Dobretsov Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia

E-mail: doroshkevich@igm.nsc.ru

Starikova A.E., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Laboratory of Thermobarogeochemistry, Institute of Geology and Mineralogy named after V.S. Sobolev SB RAS; Senior Scientific Lecturer, Department of Mineralogy and Geochemistry, Faculty of Geology and Geophysics, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia.

E-mail: a sklr@mail.ru

Proskurnin V.F., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Department, Department of Regional Geology and Mineral Resources of the North of Siberia (Taimyr Sector), A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg, Russia

E-mail: vasily_proskurnin@vsegei.ru

Saltanov V.A., Geologist of the first category, A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg, Russia. E-mail: saltanov@vsegei.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.06.2024; одобрена после рецензирования 26.07.2024; принята к публикации 27.09.2024

The article was submitted 14.06.2024; approved after reviewing 26.07.2024; accepted for publication 27.09.2024

Научная статья УДК 552.3 + 552.333 doi: 10.17223/25421379/32/3

ЩЕЛОЧНО-БАЗАЛЬТОИДНЫЕ ДАЙКИ АГАРДАГСКОГО КОМПЛЕКСА (ЗАПАДНЫЙ САНГИЛЕН) КАК ИНДИКАТОР ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ МАГМ В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КАМЕРАХ



Вера Вячеславовна Егорова¹, Андрей Эмильевич Изох², Роман Аркадиевич Шелепаев³

^{1, 2, 3} Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

¹verae@igm.nsc.ru

² izokh@igm.nsc.ru

³rshel@igm.nsc.ru

Аннотация. На основе минералого-петрографических и петро-геохимических данных показано, что серия ордовикских даек агардагского комплекса (Западный Сангилен, Юго-Восточная Тува), по составу варьирующих от ультраосновных разностей до пород среднего состава, образовалась в процессе кристаллизационной дифференциации родоначальной щелочно-базальтоидной магмы в глубинных промежуточных магматических камерах.

Ключевые слова: камптониты, дифференциация, промежуточные камеры, Юго-Восточная Тува, Западный Сангилен

Источник финансирования: работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 23-27-00224.

Для цитирования: Егорова В.В., Изох А.Э., Шелепаев Р.А. Щелочно-базальтоидные дайки агардагского комплекса (Западный Сангилен) как индикатор дифференциации магм в промежуточных камерах // Геосферные исследования. 2024. № 3. С. 21–30. doi: 10.17223/25421379/32/3

Original article doi: 10.17223/25421379/32/3

ALKALINE BASALT DIKES OF AGARDAG COMPLEX (WESTERN SANGILEN) AS AN INDICATOR OF MAGMA DIFFERENTIATION IN INTERMEDIATE CHAMBERS

Vera V. Egorova¹, Andrey E. Izokh², Roman A. Shelepaev³

^{1, 2, 3} V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

¹verae@igm.nsc.ru

² izokh@igm.nsc.ru

³rshel@igm.nsc.ru

Abstract. Dike complexes of various compositions are widely observed in different geodynamic settings and are used by researchers to solve petrological, geodynamic and paleomagnetic problems. If there is geological data on the sequence of emplacement of alkaline dikes, which reflects the fractionation of parental magma, it is possible to trace the sequence of crystallization, the change of mineral parageneses and the behavior of volatile components in a particular feeding system. A series of Ordovician camptonite dikes of the Agardag complex (South-Eastern Tuva), varying in composition from ultramafic varieties to intermediate rocks. More than 30 dikes have been identified. There are both simple and combined dikes, in which leucocratic rocks of syenite composition act as the second phase. Some dikes are saturated by mantle and crustal xenoliths. Based on petrographic and geochemical characteristics, 4 groups of rocks were identified. The first group includes the most magnesian varieties of camptonites. The group 2 includes rocks of independent dikes with olivine and clinopyroxene phenocrysts with a subordinate amount of biotite phenocrysts. The group 3 includes independent dikes with a predominance of biotite and amphibole phenocrysts and rare clinopyroxene phenocrysts and melanocratic varieties of the combined dike. Leucocratic dikes and leucocratic varieties from a combined dike form the group 4. The distribution of trace elements in all groups indicates that they are comagmatic. Increasing concentrations of trace elements from melanocratic rocks of groups 1-3 to leucocratic rocks of group 4 and combined dikes indicate that they are late differentiates of camptonite magmas. The presence of megacrysts and phenocrysts of clinopyroxene, amphibole, and biotite suggests that crystallization of the melts occurred at different levels in intermediate chambers according to the scheme: olivine $(megacrysts) \rightarrow olivine + clinopyroxene (megacrysts) \rightarrow biotite (megacrysts) \rightarrow \pm amphibole (megacrysts).$ Then olivine (phenocrysts) \rightarrow olivine + clinopyroxene (phencrysts) \rightarrow biotite (phencrysts) \rightarrow ± amphibole (phencrysts) \rightarrow clinopyroxene + biotite + apatite + titanomagnetite (groundmass) $\rightarrow \pm$ amphibole (groundmass) \rightarrow salic minerals (groundmass). Petrochemical and geochemical data suggest that the process of crystallization differentiation formed the entire sequence of dikes from ultramafic to intermediate compositions. The presence of combined dikes, in which products of different stages of fractionation are simultaneously present, suggests a system of intermediate chambers.

Keywords: camptonites, differentiation, intermediate magmatic chambers, South-Eastern Tuva, Western Sangilen

Source of financing: Work is done on state assignment of the Russian Science Foundation, project № 23-27-00224.

For citation: Egorova V.V., Izokh A.E., Shelepaev R.A. (2024) Alkaline basalt dikes of Agardag complex as an indicator of magma differentiation in intermediate chambers. *Geosfernye issledovaniya* – *Geosphere Research*. 3. pp. 21–30. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/32/3

Введение

Дайковые комплексы широко проявлены в разных геодинамических обстановках и используются исследователями для решения петрологических, геодинамических и палеомагнитных задач. Наиболее распространены мафитовые дайки нормального и умереннощелочного состава, при этом в ряде районов наблюдается широкая вариация составов этих даек (от ультраосновных разностей до средних), что обусловливается поступлением фракционированных в разной степени магм. Моделирование процесса фракционирования таких магм возможно с применением нескольких программных комплексов (Comagmat, Melts). Для щелочных магм также показано широкое проявление процессов дифференциации. В то же время математических программ, позволяющих моделировать процессы дифференциации для щелочных магм при разных давлениях, пока не существует. Поэтому процессы дифференциации приходится рассматривать на конкретных примерах. Геологические данные о последовательности внедрения даек щелочного состава позволяют установить порядок кристаллизации, смену минеральных парагенезисов и поведение летучих компонентов в конкретной питающей системе.

Одним из таких примеров может служить серия ордовикских даек агардагского комплекса (Западный Сангилен, Юго-Восточная Тува), по составу варьирующих от ультраосновных разностей до пород среднего состава, формирование которых отражает процессы дифференциации щелочно-базальтоидной магмы в глубинных магматических камерах. Щелочные дайки агардагского комплекса описаны ранее в ряде работ [Блюман, 1976; Панина и др., 1992; Изох и др., 2001; Гибшер и др., 2012]. Однако в этих работах проводилось исследование лишь некоторых даек. В данной статье представлены результаты минералого-петрографического и петро- геохимического исследования пород более 25 даек агардагского комплекса с целью установления их комагматичности, последовательности кристаллизации и характера дифференциации родоначальной магмы.

Методы исследования

Аналитические исследования состава пород и минералов выполнены в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Анализ химического состава пород по главным компонентам выполнен рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре ARL 9900XP. Редкоэлементный состав пород определялся методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой после открытого кислотного разложения на квадрупольном масс-спектрометре Element 2. Для точной идентификации минеральных фаз использовалась электронно-сканирующая микроскопия с ЭДС системой микроанализа. Исследование методом электронной микроскопии выполнялось на растровом сканирующем электронном микроскопе с ЭДС системой химического анализа TESCAN MIRA 3LMU в обратнорассеянных электронах с использованием программного обеспечения INCA. Ускоряющее напряжение составляло 20 кВ при токе зонда 15 нА.

Геологическое положение даек агардагского комплекса

Западный Сангилен является частью Сангиленского складчатого сооружения, представляющего собой коллизионный ороген, сформированный на раннекаледонском этапе в результате коллизии Таннуольской островодужной системы с Тувино-Монгольским микроконтинентом [Владимиров и др., 2005]. Щелочно-базальтоидные дайки агардагского комплекса проявлены только на северо-западной окраине Западного Сангилена, где располагаются в виде пояса субширотного простирания (рис. 1). Ареал распространения даек комплекса составляет 18×10 км. Мощность варьирует от полуметра до 10 м, протяженность некоторых даек превышает 1 км [Гибшер и др., 2012]. Дайки прорывают терригеннокарбонатные породы моренского метаморфического комплекса, кембрийские вулканогенно-осадочные породы, породы Правотарлашкинского габброидного и Башкымугурского габбро-монцодиоритового массивов, а также ордовикские гранитоиды (рис. 1). Проведенное датирование по мегакристаллам биотита и амфибола показало позднеордовикский возраст даек комплекса 440-447 млн лет [Изох и др., 2001; Гибшер и др., 2012]. Всего установлено более 30 даек, которые варьируют по составу и набору включений, при этом встречаются как простые, так и сложные комбинированные дайки, в которых в качестве второй фазы выступают лейкократовые породы сиенитового состава.

Некоторые дайки насыщены мантийными и коровыми ксенолитами.

Минералого-петрографические особенности пород агардагского дайкового комплекса

Дайки сложены мелкозернистыми породами, варьирующими от меланократовых до лейкократовых разностей, при этом лейкократовые породы слагают как отдельные дайки, так и встречаются в виде второй фазы в комбинированных дайках, а также образуют небольшие овоиды в меланократовых разностях. Структура пород лампрофировая, характеризующаяся обилием идиоморфных вкрапленников темноцветных минералов при отсутствии вкрапленников салических минералов. По минеральному составу и структуре породы даек, в соответствии с современной классификацией лампрофиров [LeMaitre, 2002], относятся к камптонитам. Лейкократовые разности соответствуют сиенит-порфирам.



Рис. 1. Схема расположения даек агардагского комплекса Западного Сангилена (Юго-Восточная Тува) Схема составлена по [Еgorova et al., 2006]. Условные обозначения: 1 – докембрийские метаморфизованные терригенно-карбонатные породы моренского комплекса; 2 – кембрийские вулканогенно-осадочные породы; 3 – гипербазиты; 4 – габброиды Башкымугурского массива; 5 – монцодиориты Башкымугурского массива; 6 – габброиды Правотарлашкинского массива; 7 – ордовикские гранитоиды; 8 – дайки камптонитов агардагского комплекса; 9 – разломы. Нумерация даек по [Гибшер и др., 2012]

Fig. 1. Location map of camptonite dikes of the Agardag complex of the Western Sangilen (Southeastern Tuva) The scheme is compiled according to [Egorova et al., 2006]. 1 – Precambrian metamorphosed terrigenous–carbonate rocks of the Moren complex; 2 – Cambrian volcanosedimentary rocks; 3 – ultrabasic rocks; 4 – gabbroids of the Bashkymugur intrusion; 5 – monzodiorites of the Bashkymugur intrusion; 6 – gabbroids of the Pravaya Tarlashka intrusion; 7 – Ordovician granitoids; 8 – camptonite dikes of the Agardag complex; 9 – faults. Numbering of dikes according to [Gibscher et al., 2012]

Отличительной чертой даек является наличие большого количества мегакристаллов оливина, клинопироксена, амфибола и биотита, размер которых колеблется от 2 до 15 см. Оливин образует хорошо ограненные кристаллы размером от 2 до 4 см с тонкой оторочкой, состоящей из минералов основной массы

камптонита. Также обнаружены срастания мегакристаллов оливина и клинопироксена. Мегакристаллы клинопироксена имеют зональное строение: бесцветные ядра – авгит, розоватые краевые части – титанавгит. Биотит образует округлые или вытянутые пластинки размером до 2 см, иногда с кристаллографической огранкой. Мегакристаллы амфибола достигают размера 15 см и по составу отвечают керсутиту. Вкрапленники в породах даек представлены теми же минералами, что и мегакристаллы, но имеющими меньший размер (1–10 мм) – амфиболом (керсутит), клинопироксена (титанавгит) и пластинками биотита (рис. 2). Реже встречаются зерна частично замещенного оливина, иногда – темно-бурая шпинель и магнетит с титаномагнетитовыми каймами.



Рис. 2. Микрофотографии шлифов пород агардагского дайкового комплекса

a–d – камптониты, e, f – сиениты, g, h – сиенитовые глобули в камптоните. Условные обозначения: Срх – клинопироксен, Am – амфибол, Bt – биотит, Pl – плагиоклаз, Afs – калиевый полевой шпат. a, c, d, g – проходящий свет; b, d, f, h – скрещенные поляризаторы

Fig. 2. Microphotographs of thin sections of dikes of the Agardag complex

a-d - camptonites, e, f - syenites, g, h - syenite globules in camptonite. Abbreviations: Cpx - clinopyroxene, Am - amphibole, Bt - biotite, Pl - plagioclase, Afs - feldspar. a, c, d, g - passing light; b, d, f, h - cross-polarized light

Основная масса сложена клинопироксеном (титанавгит), амфиболом (керсутит), биотитом и ксеноморфными сильно измененными салическими минералами (нефелин, плагиоклаз). В лейкократовых породах в основной массе клинопироксен – эгирин, а салические минералы представлены калиевым полевым шпатом (см. рис. 2, e, f). Апатит, магнетит и титаномагнетит находятся как в основной массе, так и в виде вростков в краевых частях во всех минералах-вкрапленниках и мегакристаллах. В основной массе также присутствуют зерна сфена и кальцита. Отмеченные в меланократовых разностях овоиды размером до 2-3 см сложены преимущественно салическими минералами (калиевым полевым шпатом, плагиоклазом), в подчиненном количестве присутствуют кристаллы амфибола, клинопироксена (эгирина) и кальцит (рис. 2, g, h). При петрографическом определении в разных дайках обнаружены разные сочетания минералов мегакристаллов и вкрапленников: 1) оливин + клинопироксен; оливин + клинопироксен + биотит; клинопироксен + биотит; 2) оливин + к линопироксен + амфибол + биотит; клинопироксен + амфибол + биотит. Такая последовательность отражает порядок кристаллизации щелочно-базальтоидной магмы в промежуточной камере.

Геохимические особенности пород агардагского дайкового комплекса

Породы даек характеризуются широкими вариациями по химическому составу, как между отдельными дайками, так и в пределах одной дайки. На основе петрографических наблюдений и петро-геохимического анализа были выделены четыре группы пород.

К первой группе отнесены наиболее магнезиальные разности камптонитов, которые фиксируются в дайках, выносящих ксенолиты мантийных и коровых пород, а также в комбинированной дайке 4Н. Во вторую группу попадает ряд анализов из этих же даек, а также породы самостоятельных даек, в которых вкрапленники представлены оливином и клинопироксеном с подчиненным количеством вкрапленников биотита. Третья группа включает самостоятельные дайки с преобладанием вкрапленников биотита и амфибола и редкими вкрапленниками клинопироксена, а также меланократовые разности комбинированной дайки. Четвертую группу образуют лейкократовые дайки и лейкократовые разности из комбинированной дайки. Близкий петрохимический состав имеют лейкократовые обособления (овоиды), которые наблюдаются в некоторых дайках группы 2.

На TAS-диаграмме породы группы 1 характеризуются низкими содержаниями SiO₂ (36–38,4 мас. %) при сумме щелочей 3,9-5 мас. %, что соответствует фоидитам [LeMaitre et al., 2002] (рис. 3). Породы группы 2 содержат 38-42 мас. % SiO₂ и 5-7.8 мас. % щелочей и относятся к фоидитам и тефритам (табл. 1). Точки составов наиболее меланократовых разновидностей из комбинированной дайки попадают в поле составов группы 1 и 2. Породы группы 3 и меланократовые породы комбинированной дайки обладают более высокими содержаниями SiO₂ (44-52 мас. %) при сумме щелочей 6,1-8 мас. %, что соответствует тефритам и фонотефритам. Группа 4 характеризуется самыми высокими содержаниями SiO₂ (55-61 мас. %), щелочей (11-12 мас. %), что отвечает тефрофонолитам, фонолитам и трахитам. Сюда же попадают лейкократовые породы комбинированной дайки и лейкократовые обособления (овоиды), наблюдающиеся в меланократовых дайках (рис. 3).



Рис. 3. ТАЅ-диаграмма для пород агардагского дайкового комплекса Для построения диаграммы анализы пересчитаны на 100 %

Fig. 3. TAS-diagram for rocks of the Agardag complex dikes Analysis for the diagram were recalculated by 100 %

Таблица 1

Представительные анализы химического состава пород агардагского дайкового комплекса, мас. % Table 1

D		4. 3.4. 6. 4	1 1 6.4	1	1	111	4.07
Representative r	major elemer	its data for t	ne rocks of t	ne Agardag	complex	aikes,	WT %0

	Груг	ппа 1		Группа 2											
Образец	И38-99	KC55-00	1H/2	3Н	5H/3	6H	22H	24H	28H	34H	19H	20H	27H	31H	32H
SiO ₂	37,08	38,44	38,83	40,34	38,15	39,76	40,39	41,75	39,90	40,18	40,43	39,97	40,90	37,1	38,08
TiO ₂	2,25	2,01	2,17	2,53	2,15	2,86	2,48	2,56	2,79	2,21	2,44	2,68	2,66	2,27	2,24
Al_2O_3	9,73	10,57	12,83	13,11	12,23	13,45	12,51	14,67	13,90	13,52	12,59	12,88	13,46	11,9	11,13
FeO	12,10	9,83	10,83	11,89	11,49	11,78	11,79	11,16	11,61	10,69	9,68	10,84	10,41	12,0	10,65
MnO	0,25	0,22	0,22	0,21	0,20	0,20	0,21	0,20	0,22	0,23	0,18	0,17	0,18	0,18	0,19
MgO	16,39	16,14	10,48	10,35	12,65	9,41	11,65	8,32	8,60	8,44	11,09	12,05	11,21	9,35	10,81
CaO	12,59	12,16	12,55	10,10	11,80	11,24	9,91	10,68	10,60	11,68	10,33	10,54	10,43	12,6	12,85
Na ₂ O	1,66	2,23	2,19	2,92	2,32	2,70	3,77	3,42	3,16	2,75	4,67	3,23	3,27	1,50	1,46
K ₂ O	2,29	2,47	2,68	2,49	2,31	2,61	2,20	2,15	1,96	3,22	3,19	2,28	2,68	3,65	4,26
P_2O_5	1,16	1,12	1,06	0,90	1,05	0,91	0,83	0,91	1,00	1,28	1,65	1,07	1,08	1,43	1,38
LOI	2,60	2,55	3,69	2,38	3,21	2,39	1,50	2,48	4,18	4,07	3,41	3,33	3,09	6,73	6,25
Сумма	99,51	98,82	99,20	99,29	99,40	99,14	99,17	99,95	99,62	99,91	100,81	99,04	100,62	100,0	100,5
Na ₂ O + K ₂ O	3,95	4,70	4,87	5,41	4,63	5,31	5,97	5,57	5,02	5,97	7,86	5,51	5,95	5,15	5,72

		I	Группа З	3]	Группа 4	1		Комбинированная дайка 4Н					
Образец	2H	18H	21H	23H	26H/1	36H	37H	Аг-92	Аг-55	E53	Аг-107	Ш50-00	4H/2	4H/1	4H/3	
SiO ₂	45,32	45,57	46,12	45,49	46,15	46,64	44,06	42,87	44,68	55,20	60,53	38,40	44,40	47,3	52,78	
TiO ₂	1,89	1,57	2,42	2,79	2,23	2,16	2,28	2,46	2,34	0,36	0,73	2,42	2,85	2,72	0,41	
Al ₂ O ₃	15,28	14,97	16,43	15,86	16,25	14,61	15,81	14,49	15,90	21,29	19,76	11,57	16,57	17,6	20,70	
FeO	11,88	10,51	11,47	10,24	11,52	14,37	10,37	11,30	9,89	4,84	3,74	11,30	11,48	11,0	4,97	
MnO	0,20	0,23	0,20	0,21	0,21	0,21	0,18	0,23	0,19	0,32	0,06	0,22	0,25	0,20	0,31	
MgO	5,37	5,58	5,44	5,51	5,25	6,14	5,65	6,06	4,68	0,86	0,76	14,50	4,34	4,05	1,12	
CaO	7,77	6,21	8,59	6,70	8,49	6,93	7,97	9,21	7,76	1,86	2,89	9,75	7,49	7,28	2,37	
Na ₂ O	4,58	4,76	4,34	4,75	3,91	4,30	4,04	3,74	4,18	8,47	5,32	3,17	4,81	3,03	7,69	
K ₂ O	2,26	3,53	1,81	3,09	2,33	2,19	2,65	3,10	2,82	3,68	5,88	2,57	2,47	3,30	4,28	
P ₂ O ₅	0,94	0,94	0,57	0,72	0,55	0,77	0,82	1,08	0,82	0,18	0,22	0,83	0,77	0,64	0,19	
LOI	3,37	5,53	1,07	4,04	1,04	1,05	4,21	4,10	5,18	1,82	0,48	4,33	2,39	1,66	4,08	
Сумма	98,92	99,48	100,0	99,44	99,65	99,48	99,51	99,91	99,50	99,40	99,67	100,3	99,41	100,1	99,88	
Na ₂ O + K ₂ O	6,84	8,29	5,15	7,84	6,24	6,49	6,79	6,84	7,00	12,15	11,2	5,74	7,29	6,33	11,97	

На вариационных диаграммах MgO-Al₂O₃ и MgO-СаО отчетливо наблюдается дискретность выделенных групп пород (рис. 4). На диаграмме MgO-Al₂O₃, несмотря на дискретность, наблюдается единый тренд с накоплением глинозема по мере дифференциации, что обусловлено фракционированием оливина и клинопироксена. На диаграмме MgO-CaO для первых двух групп отмечаются одинаковые содержания кальция, тогда как для групп 3 и 4 его содержание резко падает. Выделенные группы хорошо разделяются и на диаграммах, отражающих степень фракционирования (рис. 4). Содержание TiO₂ в группах 1-3 варьирует от 2 до 3 мас. % и не зависит от степени фракционирования. Это связано с высокой титанистостью клинопироксена, которая вначале возрастает, а при кристаллизации титаномагнетита резко падает. Для группы 4 отмечаются низкие содержания титана (TiO₂ 0,5 мас. %) (рис. 4). Для фосфора наблюдается снижение содержания по мере фракционирования от 1,6 до 0,2 мас. % (рис. 4).

Еще более наглядно это проявляется в поведении малых элементов. Так, наблюдается резкое снижение содержаний Ni и Cr по мере фракционирования (рис. 4). Наиболее высокие содержания никеля и хрома отмечаются в породах группы 1, что позволяет рассматривать их как наименее фракципорции щелочно-базальтоидной онированные магмы. Поведение циркония также отражает процесс фракционной дифференциации (см. рис. 5). Минимальные содержания Zr присущи первой группе (127 г/т), а максимальные для салических даек (380 г/т). При этом лейкократовая составляющая комбинированной дайки еще более обогащена Zr (до 502 г/т). В поведении Sr установлено более сложное поведение. В группах 1 и 2 наблюдается возрастание содержания Sr по мере фракционирования, в то же время как в группах 3 и 4 наблюдается снижение содержаний Sr. Это, вероятно, связано с кристаллизаций апатита как главного минерала-концентратора Sr в камптонитах.

Распределение рекоземельных элементов в группах 1–3 и в меланократовых разностях комбинированной дайки подобно и типично для щелочных базальтоидов (рис. 6). Содержание РЗЭ в породах составляет 227–476 г/т (табл. 2). Породы характеризуются дифференцированным распределением редких земель с высоким содержанием LREE ((La/Sm)n = 3,3–5) и истощением в области HREE ((Sm/Yb)n = 4–5,6) (табл. 2). В них не

отмечается аномалий по европию ((Eu/Eu*)n = 0,9–1). Породы групп 1–3 также обогащены крупноионными литофильными элементами (Cs, Rb, Ba) и слегка обеднены U и Th относительно ниобия и тантала (рис. 6). Самые меланократовые разности группы 1 имеют отрицательную аномалию по Zr и Hf, однако в группах 2 и 3 содержание этих элементов увеличивается, аномалия исчезает.



Рис. 4. Петрохимические характеристики пород агардагского дайкового комплекса

Fig. 4. Petrochemical characteristics of the rocks of the Agardag complex dikes







Рис. 6. Спектры распределения редкоземельных и редких элементов в породах агардагского дайкового комплекса

Данные нормированы на хондрит (a) [Boynton, 1984] и примитивную мантию (b) [Sun, McDonough, 1989]

Fig. 6. REE and TR patterns for the rocks of the Agardag complex dikes Data are normalized to chondrite (a) [Boynton, 1984] and PM (b) [Sun, McDonough, 1989]

Таблица 2

Представительные анализы редкоэлементного состава пород агардагского дайкового комплекса, г/т Table 2

Representative trace element data for the rocks of the Agardag complex dikes, ppm

Обра-	Группа 1		Группа 2									Груг	ппа 3		Группа 4	Комбинированная дайка 4Н			
зец	KC55-00	И38-99	1H/2	3H	5H/3	6H	22H	24H	28H	34H	21H	21H/2	26H/1	37H	E53	Ш50-00	4H/1	4H/2	4H/3
Cs	2,03	1,38	7,13	0,9	1,13	1,21	0,8	0,83	1	2,26	0,32	0,4	0,41	1,08	3,08	2,94	1,26	1,81	2,19
Rb	64,11	58,19	99,3	74,9	92,8	70,4	62,8	71,1	64,5	112	37,5	47,7	46,6	71,3	92,4	62,31	84,1	95,15	88,72
Ba	1261,4	917,5	1420	880	1330	930	792	1170	2020	1380	852	1000	995	1100	149	897,8	774	154,81	171,4
Th	8,42	8,82	14,1	10,8	7,55	10,2	9,51	11,4	9,95	18,2	4,36	4,31	4,25	6,61	20,4	8,62	11,4	21,1	22,3
U	1,1	1,22	3,32	2,97	1,38	2,84	2,54	2,87	2,99	4,41	1,23	1,15	1,31	1,95	4,48	1,54	3,44	4,40	5,12
Nb	73,5	99,7	136	122	74,4	114	108	124	116	155	72,8	78,7	76,2	79,7	164	107	107	160	171
Ta	4,18	4,39	7,65	7,26	4,78	6,98	6,51	7,17	6,51	8,51	4,27	4,38	4,32	4,92	13,7	5,33	7,08	11,0	7,01
La	65,33	69,12	93,8	68,8	66,1	65,5	61,2	72,8	71,1	115	46,6	47,1	47	51,3	89,1	56,45	74,5	106,16	116,4
Ce	115,95	130,43	174	131	124	136	118	139	134	213	92,1	95,9	93,9	104	140	98,48	139	179,58	196,5
Pr	13,91	15,6	19,1	15,2	14,6	15,6	13,9	15,8	15,4	22,9	11,3	11,4	11,3	12,1	14,8	12,69	15,9	19,29	20,42
Sr	790,5	898,4	1650	1220	920	1830	968	1340	1100	1470	919	920	913	1110	384	915	891	163,51	308
Nd	52,05	57,51	67	56,1	55,3	57,7	51,1	57,3	56,7	78,5	42,5	43,2	43,1	45,5	44,3	49,09	57,5	56,19	60,5
Zr	141,4	126,9	229	285	214	253	254	264	248	251	212	181	189	241	383	171,8	385	502	464
Hf	3,23	2,66	5,04	6,27	5,23	6,14	5,77	5,91	5,54	5,53	4,87	4,36	4,61	5,27	8,48	3,52	8,16	16,55	17,19
Sm	8,23	9,42	12,4	11,8	10,5	12,1	10,9	11,5	11,5	14,3	9,01	8,87	9,06	9,4	7,28	8,31	11,9	8,94	8,53

Егорова В.В., Изох А.Э., Шелепаев Р.А. Щелочно-базальтоидные дайки

Обра-	Группа 1		Группа 2						Группа 3			Группа 4	 Комбинированная дайка 4Н 			айка			
зец	KC55-00	И38-99	1H/2	3H	5H/3	6H	22H	24H	28H	34H	21H	21H/2	26H/1	37H	E53	Ш50-00	4H/1	4H/2	4H/3
Eu	2,47	2,8	3,48	3,26	2,76	3,43	2,94	3,25	3,32	3,93	2,64	2,77	2,7	2,62	1,12	2,74	2,97	1,33	1,53
Gd	7,74	8,17	9,37	9,41	7,95	9,53	8,69	9,11	9,07	10,8	7,51	7,43	7,22	7,59	5,3	8,28	9,39	6,44	6,83
Tb	1,05	1,18	1,21	1,2	0,98	1,23	1,1	1,17	1,15	1,38	0,99	0,97	0,94	0,98	0,78	1,18	1,23	1,02	1,15
Dy	4,92	5,75	6,6	6,46	5,33	6,49	5,95	6,32	6,11	7,44	5,55	5,45	5,45	5,53	5,23	5,45	7,17	6,18	6,56
Ho	0,76	0,93	1,27	1,17	0,98	1,18	1,12	1,18	1,14	1,42	1,07	1,06	1,02	1,09	1,14	0,92	1,35	1,48	1,6
Y	27	32,21	30,1	29,1	24	27,2	26,3	28,2	27	33,5	25,6	24,7	24,8	25,2	27,6	29,12	33,5	38,3	41,6
Er	2,07	2,43	3,17	2,96	2,36	2,99	2,82	2,87	2,78	3,68	2,72	2,65	2,62	2,76	3,36	2,22	3,45	4,75	4,81
Tm	0,38	0,35	0,43	0,41	0,31	0,4	0,37	0,4	0,36	0,5	0,35	0,34	0,35	0,37	0,51	0,3	0,5	н.а.	н.а.
Yb	1,85	2,55	2,6	2,3	2	2,4	2,1	2,4	2,2	3	2,2	2,1	2,1	2,3	2,9	1,88	2,9	4,79	5,24
Lu	0,28	0,34	0,38	0,32	0,29	0,32	0,31	0,33	0,3	0,45	0,32	0,29	0,3	0,35	0,43	0,3	0,41	0,86	0,81
∑РЗЭ	277	307	395	310	293	315	281	323	336	476	225	230	227	246	316	248	328	397	431
(Eu/Eu*)n	1	0,95	0,95	0,92	0,89	0,84	0,89	0,94	0,95	0,93	0,96	1	1	0,92	0,53	1	0,83	0,51	0,59
(La/Yb)n	20	18	24	20	22	18	20	20	22	26	14	15	15	15	21	20	17	15	15
(La/Sm)n	4,3	4,6	4,8	3,7	4	3,4	3,5	4	3,9	5,1	3,3	3,3	3,3	3,4	7,7	4,3	3,9	7,5	8,6
(Sm/Yb)n	4,7	4	5,1	5,5	5,6	5,4	5,6	5,1	5,6	5,1	4,4	4,5	4,6	4,4	2,7	4,7	4,4	2	1,7

Примечание. Нормированные значения (n) к хондриту С1 по [Boynton, 1984]; н.а. – не анализировалось.

Note. n.a. - Normalized values (n) to chondrite C1 according to (Boynton, 1984); not analyzed.

Породы группы 4 и лейкократовые разности комбинированной дайки также имеют дифференцированное распределение РЗЭ ((La/Yb)n = 15-17), однако в них отмечаются более высокие содержания LREE и появляется отрицательная европиевая аномалия ((Eu/Eu*)n = 0,51-0,59). В них же отмечаются самые высокие содержания Th, U, Nb, Ta. Обеднение Ва и Sr в них коррелирует с уменьшением содержаний фосфора и, вероятно, связано с фракционированием апатита. Характер распределения редких и редкоземельных элементов во всех группах свидетельствует о том, что они комагматичны. Повышение концентрации редких элементов от меланократовых пород групп 1-3 к лейкократовым породам группы 4 и комбинированной дайки указывают на то, что они являются поздними дифференциатами щелочно-базальтоидных магм.

Заключение

Полученные геологические, петрографические и геохимические данные позволяют сделать вывод, что изученные породы образовались из щелочно-базальтоидной магмы, родоначальной для всех даек агардагского комплекса. Наименее фракционированными являются дайки камптонитов, которые выносят ксенолиты мантийных и коровых пород. Наличие мегакристаллов и вкрапленников клинопироксена, амфибола, биотита позволяет предполагать, что кристаллизация расплавов происходила на разных уровнях в промежуточных камерах по схеме: оливин (мегакристы) \rightarrow оливин + клинопироксен (мегакристы) \rightarrow биотит (мегакристы) $\rightarrow \pm$ амфибол (мегакристы). Затем оливин (вкрапленники) \rightarrow оливин+клинопироксен (вкрапленники) \rightarrow биотит (вкрапленники) \rightarrow \pm амфибол (вкрапленники) \rightarrow клинопироксен + биотит + апатит + титаномагнетит (основная масса) $\rightarrow \pm$ амфибол (основная масса) \rightarrow салические минералы (основная масса).

В процессе кристаллизационной дифференциации щелочно-базальтоидной магмы образовалась вся последовательность даек от ультраосновных до средних составов. Наличие комбинированных даек, в которых одновременно присутствуют продукты разных этапов фракционирования, позволяет предполагать наличие системы эшелонированных промежуточных камер, по аналогии с установленной ранее многокамерной системой при изучении габброидных ксенолитов из даек агардагского комплекса [Egorova et al., 2006].

Список источников

Блюман Б.А. Дайковые комплексы щелочных базальтоидов Сангилена (Юго-Восточная Тува) // Доклады АН СССР. 1976. Т. 247, № 3. С. 672–674.

Владимиров В.Г., Владимиров А.Г., Гибшер А.С., Травин А.В., Руднев С.Н., Шемелина И.В., Барабаш Н.В., Савиных Я.В. Модель тектонометаморфической эволюции Сангилена (ЮВ Тува, Центральная Азия) как отражение раннекаледонского аккреционно-коллизионного тектогенеза // ДАН. 2005. Т. 405, № 1. С. 82–88.

Гибшер А.А, Мальковец В.Г., Травин А.В., Белоусова Е.А., Шарыгин В.В., Конц З. Возраст камптонитовых даек агардагского щелочно-базальтоидного комплекса Западного Сангилена на основании Ar/Ar и U/Pb датирования // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, № 8. С. 998–1013.

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

Панина Л.И., Михалева Л.А., Смирнов С.З., Моторина И.В. Генезис пятнистых камптонитов юга Тувы (по данным изучения расплавных включений) // Геология и геофизика. 1992. № 1. С. 98–104.

Boynton W.V. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies, in Rare Earth Element Geochemistry / ed. by P. Henderson. New York : Elsevier, 1984. P. 63–114.

Egorova V.V., Volkova N.I., Shelepaev R.A., Izokh A.E. The lithosphere beneath the Sangilen Plateau, Siberia: evidence from peridotite, pyroxenite and gabbro xenoliths from alkaline basalts // Mineralogy and Petrology. 2006. V. 88. P. 419–441.

LeMaitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B., Le Bas M.J., Bonin B., Bateman P., Bellieni G., Dudek A., Efremova S., Keller J., Lamere J., Sabine P.A., Schmid R., Sorensen H., Woolley A.R. / Ed. R.W. Le Maitre. Igneous rocks: a classification and glossary of terms, recommendations of the International union of geological sciences, subcommission of the systematics of Igneous rocks. Cambridge University Press, 2002. 252 p.

Sun S.-S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implication for mantle composition and pricesses // Magmatism in the ocean basins. Geological Society of London. Special Publication. 1989. P. 313–345.

References

Bluman B.A. Daikovye kompleksy schelochnikh basaltoidov Sangilena (Yugo-Vostochnaja Tuva) [Dyke complexes of alkaline basaltoids of Sangilen (South-Eastern Tuva)] // Doklady AN SSSR [Doklady of AS USSR]. 1976. V. 247. No 3. pp. 672–674. In Russian

Vladimirov V.G., Vladimirov A.G., Gibsher A.S., Travin A.V., Rudnev S.N., Shemelina I.V., Barabash N.V., Savinykh Ya.V. Model tektonometamorphicheskoi evoluzii Sangilena (YuV Tuva, Zentralnaja Azija) kak otrazhenie rannekaledonskogo akkrezionno-kollisionnogo tektonogeneza [Model of tectonometamorphic evolution of Sangilene (SE Tuva, Central Asia) as a reflection of Early Caledonian accretion-collision tectogenesis] // DAN [Doklady Earth Science]. 2005. V. 405. No 1. pp. 82–88. In Russian

Gibsher A.A., Malkovets V.G., Travin A.V., Belousova E.A., Sharygin V.V., Konts Z. Vozrast kamptonitovikh daek agardagskogo schelochno-bazaltoidnogo kompleksa Zapadnogo Sangilena na osnovanii Ar/Ar i U/Pb datirovanija [Age of camptonite dikes of the Agardag alkaline-basaltoid complex of Western Sangilen based on Ar/Ar and U/ Pb dating] // Geologiya i geofisika [Russian Geology and Geophysics]. 2012. V. 53. No 8. pp. 998–1013. In Russian

Izokh A.E., Polyakov G.V., Malkovets V.G., Shelepaev R.A., Travin A.V., Litasov Yu.D., Gibsher A.A. *Pozdneordovikskii vozrast kamptonitov agardagskogo kompleksa Yugo-Vostochnoi Tuvj – svidetelsnvo ptojavlenija plumovogo magmatizma pri kollizionnikh prozessakh* [Late Ordovician age of camptonites of the Agardag complex of South-Eastern Tuva – evidence of the manifestation of plume magmatism during collision processes] // *DAN* [Doklady Earth Science]. 2001. V. 379. No 5. pp. 511–514. In Russian

Panina L.I., Mikhaleva L.A., Smirnov S.Z., Motorina I.V. Genesis pjatnistikh kamptonitov yuga Tuvy (po dannim izuchenija rasplavnikh vkluchenii) [Genesis of spotted camptonites in the south of Tuva (according to the study of melt inclusions)] // Geologiya i geofisika [Russian Geology and Geophysics]. 1992. No 1. pp. 98–104. In Russian

Boynton W.V. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies, in Rare Earth Element Geochemistry / Ed. by P. Henderson. Elsevier, New York. 1984. pp. 63–114.

Egorova V.V., Volkova N.I., Shelepaev R.A., Izokh A.E. The lithosphere beneath the Sangilen Plateau, Siberia: evidence from peridotite, pyroxenite and gabbro xenoliths from alkaline basalts // Mineralogy and Petrology. 2006. V. 88. pp. 419–441.

LeMaitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B., Le Bas M.J., Bonin B., Bateman P., Bellieni G., Dudek A., Efremova S., Keller J., Lamere J., Sabine P.A., Schmid R., Sorensen H., Woolley A.R. / Ed. R.W. Le Maitre. Igneous rocks: a classification and glossary of terms, recommendations of the International union of geological sciences, subcommission of the systematics of Igneous rocks. Cambridge University Press. 2002. 252 p.

Sun S.-S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implication for mantle composition and pricesses // Magmatism in the ocean basins. Geological Society of London. Special Publication. 1989. 42. pp. 313–345.

Информация об авторах:

Егорова В.В., Ph.D., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: verae@igm.nsc.ru

Изох А.Э., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: izokh@igm.nsc.ru

Шелепаев Р.А., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: rshel@igm.nsc.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Egorova V.V., Ph.D., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: verae@igm.nsc.ru

Izokh A.E., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia Shelepaev R.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Head of the Laboratory, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: rshel@igm.nsc.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.05.2024; одобрена после рецензирования 03.08.2024; принята к публикации 27.09.2024

The article was submitted 30.05.2024; approved after reviewing 03.08.2024; accepted for publication 27.09.2024

Научная статья УДК 552.323.6 (571.56) doi: 10.17223/25421379/32/4

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ КИМБЕРЛИТОВ ТРУБКИ ИМ. А.П. СМЕЛОВА (ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЯКУТИЯ)



Николай Александрович Опарин¹, Олег Борисович Олейников²

^{1, 2} Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

¹ nik3256–1989@yandex.ru

²olei-oleg@yandex.ru

Аннотация. Приведены результаты петрографического, минералогического и петрохимического исследований кимберлитовых пород, слагающих трубку им. А.П. Смелова (Хомпу-Майское поле, Центральная Якутия). Предложена обобщенная модель образования верхней части диатремы, сформированной в результате постмагматических изменений кимберлитовых пород. Установлены особенности кристаллизации флогопита и апатита основной массы кимберлитовых пород трубки им. А.П. Смелова.

Ключевые слова: Хомпу-Майское поле, кимберлит, серпентинизация, карбонатизация, оливин, флогопит, апатит

Источник финансирования: работа выполнена по государственному заданию ИГАБМ СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект FUFG–2024–0007.

Для цитирования: Опарин Н.А., Олейников О.Б. Вещественный состав кимберлитов трубки им. А.П. Смелова (Центральная Якутия) // Геосферные исследования. 2024. № 3. С. 31–41. doi: 10.17223/25421379/32/4

Original article doi: 10.17223/25421379/32/4

COMPOSITION OF KIMBERLITES FROM THE A.P. SMELOV PIPE (CENTRAL YAKUTIA)

Nikolay A. Oparin¹, Oleg B. Oleinikov²

^{1,2} Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia ¹ nik3256–1989@yandex.ru

² olei-oleg@yandex.ru

Abstract. The paper presents the results of petrographic, mineralogical and petrochemical studies of kimberlite rocks of the A.P. Smelov pipe, located within the Early Paleozoic Khompu-May kimberlite field, localised on the northern slope of the Aldan Anticlise (Central Yakutia). The authors traced in detail the changes in the material composition of kimberlite rocks of the pipe and proposed a generalised model of the structure of the upper part of the diatreme of the studied body, in which three conditional horizons are distinguished: Lower, composed of the least altered kimberlites with olivine macrocrysts and phenocrystals and phlogopite-serpentine-carbonate mesostasis; Middle, kimberlite rocks of which are fragmented as a result of the influence of secondary processes of postmagmatic serpentinisation; Upper, made by carbonatised and oquartzised kimberlites with partially lost textural and structural features. The identified features of the vertical structure of the A.P. Smelov kimberlite pipe may indicate its insignificant erosional shearing. In kimberlites of the lower horizon unaltered olivine represented by two generations - macrocrystals (over 1 mm) and phenocrystals (up to 1 mm) was diagnosed. The established high magnesia of olivine macrocrystals may indicate potential high diamondiferousness of the studied kimberlite pipe and allows comparing it in this respect with highly diamondiferous pipes of the world. The obtained data of X-ray spectral study of mica and apatite from the main mass of kimberlites characterise the behaviour of fluorine, barium and strontium oxides at the late magmatic stage of formation of the A.P. Smelov kimberlite pipe. Changes in fluorine and strontium content in apatite depending on the its depth of crystallisation were established for the first time for kimberlite rocks. Low contents of barium in phlogopite and strontium in apatite from the least altered kimberlite rocks of the lower horizons indicate that enrichment of BaO and SrO fluid in the residual melt occurred unevenly in the vertical pipe section. The results of petrochemical studies of the rocks involved in the structure of the investigated body reflect their material specificity due to different intensity of secondary serpentinization, carbonatization and quartzization processes, and also confirm their belonging to the kimberlite formation.

Keywords: Khompu-May field, kimberlite, serpentinization, carbonatization, olivine, phlogopite, apatite

Source of financing: The work was carried out under the state assignment of IGABM SB RAS with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project FUFG–2024–0007.

For citation: Oparin N.A., Oleinikov O.B. (2024) Composition of kimberlites from the A.P. Smelov pipe (Central Yakutia). *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 3. pp. 31–41. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/32/4

Введение

Кимберлитовая трубка им. А.П. Смелова является самой крупной в составе Хомпу-Майского кимберлитового поля, территориально локализованного в пределах северного склона Алданской антеклизы и содержащего восемь диатрем. Как принято в «алмазной» геологии, первооткрывателями из АО «Якутскгеология» трубке было дано название в честь выдающегося ученого, доктора геолого-минералогических наук Александра Павловича Смелова, руководившего изучением первых кимберлитовых трубок Хомпу-Майского поля. В результате проведенных исследований в кимберлитах Центральной Якутии установлены первые алмазы [Смелов и др., 2012]. Трубка им. А.П. Смелова – воронкообразное тело, в плане имеющее форму овала и размеры 500 × 300 м. Она перекрыта юрскими терригенными отложениями мощностью 150 м и прослежена буровыми скважинами на глубину до 200 м.

В настоящей работе представлены результаты исследования кимберлитов трубки, их петрографо-минералогические особенности и изменение вещественного состава в зависимости от глубины.

Строение трубки

Трубка им. А.П. Смелова изучена до глубины 200 м от поверхности диатремы. Она сложена в различной степени серпентинизированными, карбонатизированными и окварцованными порфировым кимберлитом и кимберлитовой брекчией. Согласно классификации Б. Скотт-Смит и соавти [Scott-Smith et al., 2018], эти два типа пород являются, соответственно, когерентным и вулканокластическим кимберлитами. Между кимберлитовой брекчией и порфировым кимберлитом, в результате невыдержанного содержания ксенолитов осадочных пород и серпентинитов, по мантийным ультраосновным породам существуют постепенные переходы. Для порфирового кимберлита характерно наличие до 10 % обломков ксенолитов осадочных пород, а в кимберлитовой брекчии их количество варьирует от 10 до 35 %. Размер ксенолитов не превышает 15 см. В данном разделе мы даем детальное петрографо-минералогическое описание трубки им. А.П. Смелова, для которой ранее было выделено три условных горизонта – нижний, средний и верхний [Опарин, Олейников, 2022].

Нижняя часть трубки (интервал 172–200 м) сложена наименее измененными порфировым кимберлитом и кимберлитовой брекчией. В породе установлены макро-, мегакристаллы пикроильменита (0,2– 3 см), флогопита (0,3–1 см) и граната (1–3,5 см). Порфировая структура породы обусловлена наличием в различной степени серпентинизированных идиоморфных, гипидиоморфных и овальных зерен оливина в количестве от 60 до 70 %. Неизмененные и частично серпентинизированные зерна оливина диагностированы в порфировом кимберлите в интервале 190–200 м (рис. 1, *b*, *c*).

Основная масса порфирового кимберлита и кимберлитовой брекчии сложена преимущественно разноразмерными ксеноморфными зернами кальцита, табличками слюды, оливином и серпентином, что обусловливает неравномернозернистую структуру мезостазиса (рис. 1, *a*). В единичных случаях наблюдаются ксеноморфные выделения доломита. Среди первичных минералов мезостазиса также установлены апатит, ильменит, минералы группы шпинели и перовскит.

Оливин представлен двумя генерациями [Костровицкий, Яковлев, 2023]: І – крупные овальные или гипидиоморфные макрокристаллы и их обломки (1 мм и более) (рис. 2, *a*), П – мелкие (от десятых долей до 1 мм) идиоморфные и гипидиоморфные зерна (рис. 2, *b*). Последние, по всей видимости, являются фенокристаллами, о чем свидетельствует их четкая кристаллографическая огранка.

Слюда представлена флогопитом в виде табличек размером до 400 мкм (иногда зональными по содержанию ВаО (рис. 2, *b*)). В составе мезостазиса отмечаются резорбированные кристаллы апатита размером от 10 до 40 мкм (рис. 2, *b*, *c*). Среди рудных минералов присутствуют резорбированные зерна ильменита (до 200 мкм) (часто зональных по содержанию MnO) (рис. 2, *c*), идимоморфные и ксеноморфные зерна перовскита размером до 80 мкм (рис. 2, *b*) и минералы группы шпинели (до 50 мкм) – магнезио-хромит (Cr_2O_3 48–52 %), магнезиоферрит, ульвошпинель и магнетит (рис. 2, *b*, *c*).

В интервале глубин 45–172 м в средней части трубки наблюдается чередование блоков наименее измененных кимберлитов с блоками метасоматически фрагментированных пород, в которых соотношение реликтов порфирового кимберлита и связующей массы составляет 70 и 30 % соответственно (рис. 3, *a*).



Рис. 1. Породы нижнего горизонта трубки им. А.П. Смелова

а – мезостазис кимберлитовой брекчии, глубина 172,6 м, николи скрещены; b – мезостазис порфирового кимберлита, глубина 196,2 м, николи скрещены; с – мезостазис порфирового кимберлита с частично серпентинизированным оливином, глубина 196,2 м, николи скрещены. Условные обозначения: Xen – ксенолит, Ol – оливин, Phl – флогопит, Cal – кальцит, Srp – серпентин, llm – ильменит

Fig. 1. Rocks of the lower horizon of the A.P. Smelov pipe

a – kimberlite breccia mesostasis, depth 172.6 m, crossed nicols; b – porphyritic kimberlite mesostasis, depth 196.2 m, crossed nicols; c – porphyritic kimberlite mesostasis with partially serpentinised olivine, depth 196.2 m, crossed nicols. Abbreviations: Xen – xenolith, Ol – olivine, Phl – phlogopite, Cal – calcite, Srp – serpentine, Ilm – ilmenite



Рис. 2. Основная масса кимберлитовых пород нижнего горизонта трубки им. А.П. Смелова

BSE – изображения мезостазиса кимберлитов нижнего горизонта: а – оливин I генерации; b – оливин II генерации; с – основная масса кимберлита, не содержащего свежий оливин. Условные обозначения: Ol – оливин, Phl – флогопит, Ba–Phl – бариевый флогопит, Cal – кальцит, Dol – доломит, Srp – серпентин, Ap – апатит, Ilm – ильменит, Mn-Ilm – марганцевый ильменит, Mag – магнетит, Mfr – магнезиоферрит, Mchr – магнезиохромит

Fig. 2. Groundmass of kimberlite rocks of the lower horizon of the A.P. Smelov pipe

BSE - images of lower horizon kimberlite mesostasis: a - olivine of I generation; b - olivine of II generation; c - kimberlite groundmass without fresh olivine. Abbreviations: Ol - olivine, Phl - phlogopite, Ba-Phl - barium phlogopite, Cal - calcite, Dol - dolomite, Srp - serpentine, Ap - apatite, Ilm - ilmenite, Mn-Ilm - manganese ilmenite, Mag - magnetite, Mfr - magnesioferrite, Mchr - magnesiochromite

В результате процессов постмагматической серпентинизации образовалась кальцит-серпентиновая связующая масса, содержащая реликты порфирового кимберлита с флогопит-серпентин-карбонатным мезостазисом преимущественно неправильной (см. рис. 3, b) и только в редких случаях шарообразной формы, размером до 4 см (рис. 3, a). Подобные образования напоминают автолиты, обусловливая автолитоподобную текстуру породы. Для этих реликтов характерна порфировая структура (рис. 3, a), обусловленная наличием псевдоморфоз серпентина по оливину размером до 0,5 см, вкрапленников флогопита (до 0,6 см) и пикроильменита (до 0,4 см). Отсутствие четких границ между блоками кимберлитов свидетельствует о том, что процессы серпентинизации протекали неравномерно.

Мезостазис кимберлитов реликтов и нефрагментированных блоков (рис. 3, c) характеризуется преобладанием кальцита над серпентином. В отличие от новообразованной интерстициальной связующей массы в реликтах наблюдается более высокое содержание рудных минералов (рис. 3, c).

Связующая масса (рис. 3, *c*) выполнена серпентином и зернами кальцита размером от 20 до 120 мкм,

что обусловливает неравномернозернистую структуру. Флогопит сохраняется в виде единичных таблиц размером до 50 мкм.

Рудные минералы представлены перовскитом и минералами группы шпинели (магнезиоферрит и магнетит) в виде редких зерен размером от 10 до 20 мкм и атолловидных агрегатов. Наблюдаются единичные резорбированные зерна апатита размером до 50 мкм (рис. 3, *c*).

Верхняя часть трубки характеризуется хаотичным чередованием блоков окварцованных (рис. 4, *a*) и неравномерно карбонатизированных кимберлитов (рис. 4, с). Этот горизонт прослеживается на глубину до 45 м.

Количество карбонатизированых псевдоморфоз серпентина по оливину составляет до 30 %. В отдельных случаях карбонатизация и окварцевание приводят к частичной утрате первичных текстурноструктурных признаков, например, четких контуров серпентиновых псевдоморфоз (рис. 4, *a*).

В окварцованных кимберлитах присутствуют мелкозернистый кварц, в подчиненном количестве доломит и анкерит, а также зерна апатита, анатаза (рис. 4, *b*).



Рис. 3. Фрагментированный кимберлит среднего горизонта трубки им. А.П. Смелова (глубина 119,3 м) а – микрофотография фрагментированной кимберлитовой брекчии с реликтами (красный пунктир) порфирового кимберлита, николи параллельны; b – BSE-изображение фрагментированного кимберлита; с – граница реликта порфирового кимберлита и связующей массы. Условные обозначения: Xen – ксенолит, Phl – флогопит, Cal – кальцит, Srp – серпентин, Ap – апатит, Ilm – ильменит, Mag – магнетит, Mfr – магнезиоферрит

Fig. 3. Fragmented kimberlite of middle horizon of the A.P. Smelov pipe (depth 119.3 m)

a – microphotograph of fragmented kimberlite breccia with relicts (red dashed line) of porphyritic kimberlite, nicols are parallel; b - BSE-image of fragmented kimberlite; c - boundary of porphyritic kimberlite relict and interstitial matrix. Abbreviations: Xen – xenolith, Phl – phlogopite, Cal – calcite, Srp – serpentine, Ap – apatite, Ilm – ilmenite, Mag – magnetite, Mfr – magnesioferrite



Рис. 4. Кимберлиты верхнего горизонта трубки им. А.П. Смелова

а – окварцованный кимберлит, глубина 11,5 м; b – мезостазис окварцованного кимберлита, николи скрещены; с – карбонатизированный порфировый кимберлит, глубина 40,1 м; d – мезостазис карбонатизированного порфирового кимберлита с флогопитом, николи скрещены. Условные обозначения: Qz – кварц, Phl – флогопит, Dol – доломит, Ant – анатаз

Fig. 4. Kimberlites of the upper horizon of the A.P. Smelov pipe

a – carbonatised kimberlite, depth 11.5 m; b – carbonatised kimberlite mesostasis, nicols are crossed; c – carbonatised porphyritic kimberlite, depth 40.1 m; d – mesostasis of carbonatised porphyritic kimberlite with phlogopite, nicols are crossed. Abbreviations: Qz – quartz, Phl – phlogopite, Dol – dolomite, Ant – anatase

Основная масса карбонатизированных кимберлитов мелкозернистая и, по данным рентгенофазового и рентгеноспектрального анализов, имеет преимущественно анкерит-доломитовый состав. В составе мезостазиса таких пород наблюдаются резорбированные зерна апатита (до 100 мкм) и анатаза (до 100 мкм) (см. рис. 4, *d*). Единичные пластинки флогопита размером до 0,2 мм фиксируются только в нижней части данного горизонта (рис. 4, *d*).

Химический состав минералов

Петрографическое исследование показало, что кимберлиты изменены вторичными процессами и имеют ограниченное количество первично-магматических минералов, позволяющих оценить условия кристаллизации. Одними из таких минералов являются оливин, флогопит и апатит основной массы.

Оливин I и II генераций незонален (см. рис. 2). Макрокристаллы отличаются более высокой магнезиальностью (Fo 92,5–93,7 %) относительно фенокристаллов (Fo 90,1–91,6 %). В связи с тем, что определение химического состава минерала проводилось на электронном сканирующем микроскопе Jeol (JSM-6480LV), примеси не определялись.

Флогопит. В основной массе кимберлитов слюда встречается в переменном количестве - от первых процентов до 30 %. Согласно классификации IMA [Rieder et al., 1998], она относится к барийсодержащему флогопиту (Ba < 0,1 ф.е.) и бариевому флогопиту (Ba 0,1–0,5 ф.е.). В пределах одного зерна могут присутствовать два типа зональности – обратный и прямой (табл. 1). Обратный тип связан с понижением концентраций бария от центра к краю в результате пресыщения на начальной стадии кристаллизации минерала [Краснова, Петров, 1995] (рис. 5, а), прямой – с реакционным замещением на позднемагматической стадии [Mitchell, 1995] (рис. 5, b). Отмечаются незональные светлоокрашенные пластинки бариевого флогопита (рис. 5, с) или темноокрашенные чешуйки барийсодержащего флогопита (рис. 5, d). Количество таких незональных табличек составляет около 40 % от всей слюды основной массы. Они характерны в основном для нижних горизонтов трубки.



Рис. 5. Флогопит основной массы трубки им. А.П. Смелова

BSE – изображение слюды: а – флогопит с обратным типом зональности; b – флогопит с прямым типом зональности; с – незональный бариевый флогопит и слюда с прямым типом зональности; d – незональный барийсодержащий флогопит. Условные обозначения: Phl1 – бариевый флогопит, Phl2– барийсодержащий флогопит, Ap – апатит, Srp – серпентин, Cal – кальцит, Dol – доломит. е – особенности состава бариевой слюды основной массы из трубки им. А.П. Смелова в координатах FeO/FeO+MgO – BaO [Gaspar, Wyllie, 1982]: 1 – карбонатиты массива Якупиранга, 2 – кимберлиты типа I, 3 – мантийные перидотиты, 4 – кимберлиты типа II, 5 – выделенное поле составов слюды кимберлитов Хомпу-Майского поля [Опарин, Олейников, 2021], 6 – поле составов слюды дайки Снэп Лейк [Kopylova et al., 2010], 7 – краевая зона зональной слюды трубки им. А.П. Смелова, 8 – центральная зона зональной слюды трубки им. А.П. Смелова, 9 – незональная слюда трубки им. А.П. Смелова

Fig. 5. Groundmass phlogopite from the A.P. Smelova pipe

BSE - image of mica: a - phlogopite with reverse type of zonation; b - phlogopite with direct type of zonation; c - non-zonal barium phlogopite and mica with direct type of zonation; d - non-zonal barium-bearing phlogopite; Abbreviations: Phl1 - barium phlogopite, Phl2 - barium-bearing phlogopite, Ap - apatite, Srp - serpentine, Cal - calcite, Dol - dolomite. e - compositional features of groundmass barium mica from the A.P. Smelov pipe in coordinates FeO/FeO+MgO - BaO [Gaspar, Wyllie, 1982]: 1 - Yakupiranga carbonatites, 2 - group I kimberlites, 3 - mantle peridotites, 4 - group II kimberlites, 5 - identified field of mica compositions of kimberlites of the Khompu-May field [Oparin, Oleinikov, 2021], 6 - field of mica compositions of the Snap Lake dyke [Kopylova et al., 2010], 7 - edge zone of zonal mica from the A.P. Smelov pipe, 8 - central zone of zonal mica from the A.P. Smelov pipe

Таблица 1

Химический состав слюды основной массы кимберлитов трубки им. А.П. Смелова, мас. % Table 1

Cł	nemical	compositi	on of g	roundmass	mica	from	kimberlites	of the	A.P.	Smelov	pipe,	wt %	%
											/		

Nº	1	1	2	2	3	4	5	6		
Тип		Зонал	ьные		Hanavarra					
Зона	Центр	Край	Центр	Край	пезональные					
Разновидность	Б	БС	БС	Б	Б	БС	БС	БС		
SiO ₂	33,82	39,49	37,69	32,56	34,06	38,10	38,75	39,10		
TiO ₂	1,79	0,42	3,01	1,48	1,53	1,59	1,92	1,70		
Al ₂ O ₃	18,43	15,51	13,13	18,03	17,25	15,04	13,32	12,66		
Cr ₂ O ₃	0,26	—	0,45	-	0,13	0,26	0,18	0,69		
FeOt	3,68	2,93	5,47	3,34	4,30	4,87	5,83	5,08		
MnO	0,06	—	—	0,02	0,11	0,04	0,06	0,03		
MgO	23,52	26,54	23,18	23,28	25,46	25,48	24,35	25,07		
BaO	6,42	0,22	0,64	7,57	3,70	1,32	0,69	0,28		
Na ₂ O	0,32	0,13	0,20	0,27	0,27	0,38	0,52	0,69		
K ₂ O	9,56	11,85	11,45	8,76	8,78	10,42	10,92	11,10		
NiO	_	0,05	0,01	0,13	0,17	0,06	0,01	0,14		
Сумма	97,86	97,08	95,21	95,32	95,58	97,50	96,54	96,39		
Атомы, ф.е. (расчет на 11 кислорода)										
Si	2,41	2,77	2,75	2,38	2,46	2,69	2,78	2,80		
Ti	0,10	0,02	0,16	0,08	0,08	0,08	0,10	0,09		
Al	1,54	1,28	1,13	1,55	1,47	1,25	1,12	1,07		
Cr	0,01	_	0,03	_	0,01	0,01	0,01	0,04		
Fe	0,22	0,17	0,33	0,20	0,26	0,29	0,35	0,30		
Mn	_	_	_	-	0,01	_	-	_		
Mg	2,49	2,77	2,52	2,53	2,74	2,68	2,60	2,67		
Ba	0,18	0,01	0,02	0,22	0,10	0,04	0,02	0,01		
Na	0,04	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,07	0,10		
K	0,87	1,06	1,06	0,82	0,81	0,94	1,00	1,01		

Примечание. Б – бариевый флогопит, БС – барийсодержащий флогопит. Анализы выполнены на микрозондовом анализаторе Jeol (JXA-8230).

Note. 5 - barium phlogopite, 6C - barium-bearing phlogopite. Analyses were performed by microprobe analyser Jeol (JXA-8230).

На диаграмме, предложенной Дж. Гаспаром [Gaspar, Wyllie, 1982] (см. рис. 5, е), фигуративные точки составов флогопита основной массы кимберлитовых пород трубки им. А.П. Смелова образуют единое поле составов с полем слюды трубок Хомпу-Майского поля [Опарин, Олейников, 2021] и дайки Снэп Лейк [Kopylova et al., 2010], что может свидетельствовать об универсальности режимов кристаллизации флогопита на позднемагматической стадии формирования кимберлитов.

Слюды исследуемой трубки по концентрации ВаО группируются в два различных поля (рис. 5, *e*). Верхнее поле (ВаО от 4,0 до 9,0 мас. %) соответствует бариевому флогопиту, а нижнее (ВаО от 0,05 до 3,5 мас. %) – барийсодержащему. Подавляющее большинство незональных пластинок соответствует

барийсодержащему флогопиту. Также можно отметить преобладание бариевого флогопита среди центров зональных пластинок слюды, что подтверждает наибольшее распространение обратного типа зональности.

Апатит встречается в виде резорбированных кристаллов размером от 50 до 100 мкм, которые часто образуют скопления в породе. Количество фтора в изученных зернах верхнего и среднего горизонтов трубки составляет от 1,66 до 2,26 мас. % и является более низким, чем в апатите нижней части трубки, где его содержание колеблется от 3,29 до 3,66 мас. % (табл. 2).

Расчет кристаллохимии по программе GabbroSoft 2011 показал, что количество минала гидроксилапатита в минерале мезостазиса нижнего горизонта (172–
200 м) составляет от 3 до 12 % с преобладанием фторапатитового минала (87–97 %) (табл. 2). В апатите кимберлитовых пород более высоких уровней количество гидроксилапатитового минала увеличивается и составляет от 40 до 60 %, что позволяет отнести его либо к фтор-гидроксилапатиту, либо к гидроксифторапатиту. Хлор присутствует только во фторапатите нижнего горизонта трубки им. А.П. Смелова, где его количество не превышает 0,05 мас. % (табл. 2).

По содержанию стронция выделяются две разновидности апатита: 1) низкостронциевый фторапатит (от 0,26 до 0,30 мас. % SrO) глубоких горизонтов (табл. 2); 2) высокостронциевые фтор-гидроксилапатит и гидроксилфторапатит среднего и верхнего горизонтов (от 1,00 до 3,65 мас. % SrO) (табл. 2).

Изучение химического состава апатита показало, что во всех зернах присутствуют примеси Nb₂O₅ (от 0,76 до 1,43 мас. %) и BaO (до 0,08 мас. %). Подобные примеси ниобия ранее не были зафиксированы в апатитах из трубок мира, но отмечались в апатите из трубки Манчары [Опарин и др., 2020], лампроитов [Rao et al., 2014] и карбонатитов [Seo et al., 2016]. Се₂O₃ и La₂O₃ в пределах чувствительности рентгеноспектрального метода анализа зафиксированы только в отдельных зернах апатита основной массы среднего и верхнего горизонта, и их концентрации не превышают 0,17 мас. % (табл. 2). Зерна апатита из нижнего горизонта стабильно содержат концентрации Ce₂O₃ (0,24–0,37 мас. %) и La₂O₃ (0,08–0,23 мас. %). Примеси Ce₂O₃ и La₂O₃ в подобных количествах отмечались в кимберлитовых породах трубки Манчары [Опарин и др., 2020], даек Де Бирс [Soltys et al., 2020] и Джос [Malarkey et al., 2010], силлов Вэссэлтон и трубки Бултфонтейн [Guiliani et al., 2017; Soltys et al., 2020].

Впервые для апатита кимберлитов установлены изменения содержания F и SrO в зависимости от глубины кристаллизации. Различия в содержании SrO согласуются с выводами, полученными A. Солтисом и соавт., где они связывают низкие содержания SrO в апатите кристаллизацией этого минерала непосредственно из кимберлитового расплава, в то время как повышенные содержания SrO соответствуют кристаллизации апатита под влиянием вторичных гидрогенных флюидов, обогащенных CO₂ [Soltys, 2019].

Таблица 2

Химический состав апатита основной массы кимберлитов трубки им. А.П. Смелова, мас. %	
	Table 2

Chemical compositi	on of groundmass a	apatite from kimber	lites of the A.P.	Smelov pipe, wt %
	-			

N₂	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Горизонт		Bepz	хний			Cpe	цний			Ниж	ний	
					Окс	сиды, мас.	%					
F	1,66	1,64	2,26	2,13	1,52	1,59	1,98	2,26	3,56	3,66	3,54	3,29
CaO	53,24	52,04	53,60	51,97	55,38	53,97	53,20	54,06	53,84	53,31	52,74	52,71
P ₂ O ₅	39,93	40,14	38,78	39,25	38,17	39,92	37,80	38,37	38,55	37,65	38,52	38,72
SiO ₂	0,92	0,89	1,05	0,87	1,56	0,89	1,51	0,96	1,68	1,82	1,52	1,58
BaO	0,04	0,06	0,08	0,01	0,02	-	0,06	_	0,05	0,02	0,02	0,07
Cl	—	0,01	_	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,04	0,03	0,03	0,05
Ce ₂ O ₃	—	-	-	0,02	-	-	—	—	0,24	0,37	0,33	0,24
La ₂ O ₃	0,06	-	-	0,06	0,10	0,17	_	—	0,23	0,21	0,18	0,08
SrO	3,16	3,65	1,89	3,44	1,00	2,13	1,26	1,99	0,30	0,27	0,30	0,26
Nb ₂ O ₅	1,27	1,43	1,10	1,05	1,02	1,41	1,10	1,17	0,88	0,76	1,18	1,03
O=F,Cl	0,70	0,69	0,95	0,90	0,64	0,67	0,84	0,95	1,51	1,55	1,50	1,40
Сумма	99,58	99,16	97,81	97,91	98,14	99,41	96,08	97,86	97,87	96,55	96,85	96,64
				Атом	иы, ф.е. (р	асчет на 2	5 кислорс	ода)				
F	0,88	0,87	1,20	1,13	0,80	0,84	1,05	1,20	1,89	1,94	1,87	1,74
Ca	9,55	9,34	9,62	9,32	9,94	9,68	9,55	9,70	9,66	9,56	9,46	9,46
Р	5,66	5,69	5,50	5,56	5,41	5,66	5,36	5,44	5,47	5,34	5,46	5,49
Si	0,15	0,15	0,18	0,15	0,26	0,15	0,25	0,16	0,28	0,31	0,25	0,27
Ba	—	0,01	0,01	—	-	_	0,01	-	0,01	—	—	0,01
Cl	—	-	-	-	—	-	0,01	—	0,01	0,01	0,01	0,01
Ce	—	-	-0	-	—	-	—	_	0,01	0,02	0,02	0,01
La	—	—	—	—	0,01	0,01	—	_	0,01	0,01	0,01	0,01
Sr	0,61	0,71	0,37	0,67	0,19	0,41	0,24	0,39	0,06	0,05	0,06	0,05
Nb	0,23	0,26	0,20	0,19	0,19	0,26	0,20	0,21	0,16	0,14	0,22	0,19

N⁰	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Горизонт Верхний						Средний			Ниж	Нижний		
OH	1,12	1,13	0,80	0,87	1,19	1,16	0,95	0,80	0,10	0,05	0,12	0,24
	Миналы, ф.е.											
F–Ap	0,44	0,43	0,60	0,56	0,40	0,42	0,52	0,60	0,94	0,97	0,94	0,87
Cl–Ap	-	-	_	-	-	_	-	_	0,01	-	-	0,01
O–Ap	0,56	0,56	0,40	0,44	0,60	0,58	0,47	0,40	0,05	0,03	0,06	0,12

Примечание. Анализы выполнены на микрозондовом анализаторе Jeol (JXA-8230). Кристаллохимические расчеты произведены при помощи программы GabbroSoft 2011.

Note. Analyses were performed by microprobe analyser Jeol (JXA-8230). Crystallochemical calculations were performed using by GabbroSoft 2011 programme.



Рис. 6. Особенности химического и микроэлементного составов кимберлитов трубки им. А.П. Смелова

а – диаграмма петрогенетических взаимоотношений пород кимберлитовой формации [Holmes, 1936]; b – нормированные к хондриту [McDonough, Sun, 1995] содержания редких элементов в кимберлитовых породах трубки им. А.П. Смелова, Далдынского [Каргин и др., 2011], Алакит-Мархинского [Каргин и др., 2011] полей и провинции Кимберли (ЮАР) [Le Roex et al., 2003]. Условные обозначения: 1 – кимберлиты верхнего горизонта, 2 – кимберлиты среднего горизонта, 3 – кимберлиты нижнего горизонта, 4 – монтичеллитовые альнеиты [Корнилова и др., 1983], 5 – кимберлиты [Корнилова и др., 1983], 6 – кимберлитовые брекчии [Корнилова и др., 1983], 7 – карбонатитовые брекчии [Корнилова и др., 1983]

Fig. 6. Chemical and trace element composition features of kimberlites from the A.P. Smelov pipe

a – petrogenetic relationships diagram of kimberlite formation rocks [Holmes, 1936]; b – normalised to chondrite [McDonough, Sun, 1995] content of rare elements in kimberlite rocks of the A.P. Smelov pipe, Daldynsky [Kargin et al., 2011], Alakit–Markhinsky [Kargin et al., 2011] fields and Kimberley province (South Africa) [Le Roex et al., 2003]. Abbreviations: 1 – kimberlites of the upper horizon, 2 – kimberlites of the middle horizon, 3 – kimberlites of the lower horizon, 4 – monticellitic alneites [Kornilova et al., 1983], 5 – kimberlites [Kornilova et al., 1983], 7 – carbonatite breccias [Kornilova et al., 1983]

Т	а	б	л	И	ц	а	3
---	---	---	---	---	---	---	---

Химический состав кимберлитовых пород из трубки им. А.П. Смелова, мас. % Chemical composition of kimberlite rocks from the A.P. Smelov pipe, wt %

Table 3

N⁰	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Горизонт	ризонт Нижний					Средний			Верхний		
Глубина	196,2	190,8	184	172,6	124,3	119,3	115,9	40,2	25,7	19,6	
SiO ₂	25,96	24,94	27,72	27,59	25,01	26,30	19,26	11,90	8,44	3,56	
TiO ₂	1,24	3,13	2,17	1,86	1,60	2,03	13,08	2,55	1,56	2,73	
Al ₂ O ₃	1,62	1,15	1,28	0,75	1,82	1,14	2,87	1,43	1,06	1,36	
Fe ₂ O ₃	5,49	4,94	4,44	5,21	4,27	3,88	6,01	2,42	0,25	0,00	
FeO	1,38	3,89	2,26	2,70	2,39	3,18	9,49	7,01	14,53	6,09	

Опарин Н.А.,	Олейников	0.Б.	Вещественный	состав	кимберлитов	трубки
--------------	-----------	------	--------------	--------	-------------	--------

N⁰	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Горизонт	Нижний					Средний			Верхний		
Глубина	196,2	190,8	184	172,6	124,3	119,3	115,9	40,2	25,7	19,6	
MnO	0,10	0,14	0,11	0,10	0,12	0,10	0,18	0,16	0,29	0,11	
MgO	28,31	31,49	30,11	31,80	30,13	31,15	25,86	15,56	10,26	16,11	
CaO	14,75	10,39	12,12	10,05	13,06	11,19	8,16	22,52	24,28	27,83	
Na ₂ O	0,09	0,29	0,13	0,40	0,44	0,05	0,24	0,05	0,01	0,02	
K ₂ O	0,59	0,76	0,46	0,47	0,44	0,26	0,34	0,71	0,02	0,02	
H_2O^-	0,80	0,68	0,64	0,89	1,00	0,96	0,98	0,18	0,14	0,12	
$\mathrm{H_2O^+}$	7,70	7,05	8,08	10,63	8,79	10,63	6,88	0,18	1,15	0,26	
P_2O_5	1,28	1,83	1,02	1,28	0,72	0,82	0,67	0,90	1,17	1,40	
CO_2	10,80	9,78	9,98	7,08	16,08	18,08	19,08	34,54	36,63	39,74	
S	0,26	0,20	0,13	0,21	0,32	0,37	0,26	0,10	0,19	0,34	
F	0,34	0,34	0,25	0,12	0,13	0,13	0,10	0,15	0,10	0,08	
Сумма	<i>99,7</i> 8	100,18	100,17	100,21	99,55	100,28	99,66	100,14	99,92	99,63	

Примечание. Анализы выполнены методом силикатного анализа в ИГАБМ СО РАН (г. Якутск).

Note: The analyses were performed by silicate analysis method in DPMGI SB RAS (Yakutsk).

Вещественная специфика кимберлитов различных горизонтов отражается в их химическом составе (см. табл. 3) и прослеживается на диаграмме А. Холмса (см. рис. 6, *a*) [Holmes, 1936]. Фигуративные точки составов кимберлитовых пород нижнего, среднего и верхнего горизонтов трубки им. А.П. Смелова расположены в пределах полей кимберлитов, кимберлитовых брекчий и карбонатитовых брекчий [Корнилова и др., 1983], что соответствует различной интенсивности влияния процессов карбонатизации при формировании этих пород. Для окварцованных разностей кимберлитов выделяется отельное поле, локализованное в верхней части диаграммы и обусловленное повышенным содержанием кремнекислоты.

По геохимии кимберлиты трубки им. А.П. Смелова более близки к кимберлитам группы I (ЮАР) [Le Roex et al., 2003], чем к кимберлитам среднепалеозойских трубок Якутской кимберлитовой провинции [Каргин и др., 2011] (рис. 6, *b*). Это связано с тем, что исследуемая трубка расположена вне кимберлитоконтролирующих зон Якутской кимберлитовой провинции [Брахфогель, 1984], что обусловливает ее специфику.

Заключение

Таким образом, предложена обобщенная модель преобразования верхней части диатремы, сформированной в результате постмагматических изменений кимберлитовых пород. Нижний горизонт тела сложен массивными породами, с макрокристами и фенокристаллами оливина и наименее измененной основной массой флогопит-серпентин-карбонатного состава. В результате воздействия процессов постмагматической серпентинизации в среднем горизонте трубки наблюдается чередование блоков нефрагментированных и фрагментированных кимберлитов. Верхний горизонт сложен апокимберлитовыми породами, преобразованными карбонатизацией и окварцеванием. Такое строение кимберлитовой трубки может свидетельствовать о ее незначительном эрозионном срезе.

Изучение флогопита показало особенности поведения BaO. На позднемагматической стадии слюда начала кристаллизоваться при высокой концентрации бария в остаточном расплаве, о чем свидетельствует преобладание обратной зональности. На завершающей стадии кристаллизации слюды возможно обогащение остаточного расплава барием, что привело к появлению прямой зональности.

Для кимберлитов установлены изменения содержания F и Sr в апатите в зависимости от глубины его кристаллизации и две разновидности составов: 1) низкостронциевый фторапатит глубоких горизонтов, который кристаллизовался непосредственно из кимберлитового расплава; 2) фтор-гидроксилапатит и гидроксилфторапатит среднего и верхнего горизонтов, кристаллизация которых произошла под влиянием вторичных гидрогенных флюидов, обогащенных Sr. Отсутствие высокостронциевых апатитов в кимберлите нижней части трубки, по всей видимости, связано с воздействием локального или канального потока субсолидусных вторичных позднемагматичских флюидов [Willson, 2007].

Совместная кристаллизация стронциевых фтор-гидроксилапатита и гидроксилфторапатита и бариевого

флогопита среднего и верхнего горизонтов трубки им. А.П. Смелова может свидетельствовать о том, что в их кристаллизации на позднемагматическом этапе принимали участие флюиды, обогащенные Ва и Sr.

Высокие содержания Ва во флогопите и Sr в апатите средней и верхней частей трубки свидетельствуют о кристаллизации минералов на позднемагматической стадии из остаточного расплава, обогащенного вторичными гидрогенными флюидами.

Петрохимические исследования пород трубки подтверждают их принадлежность к кимберлитовой формации, а вариации их химического состава обусловлены интенсивностью вторичных процессов.

Список источников

Брахфогель Ф.Ф. Геологические аспекты кимберлитового магматизма северо-востока Сибирской платофрмы. Якутск : ЯФ СО АН СССР, 1984. 128 с.

Каргин А.В., Голубева Ю.Ю., Кононова В.А. Кимберлиты Далдыно-Алакитского района (Якутия): Пространственное распределение пород с различными вещественными характеристиками // Петрология. 2011. Т. 19, № 5. С. 520–545.

Корнилова В.П., Никишов К.Н., Ковальский В.В., Зольников Г.В. Атлас текстур и структур кимберлитовых пород. М. : Наука; 1983. 157 с.

Костровицкий С.И., Яковлев Д.А. Происхождение кимберлитов Якутской провинции. Иркутск : Институт геохимии СО РАН, 2023. 490 с.

Краснова Н.И., Петров Т.Г. Генезис минеральных индивидов и агрегатов. СПб. : Невский курьер, 1995. 228 с.

Опарин Н.А., Олейников О.Б., Баранов Л.Н. Апатит из кимберлитовой трубки Манчары (Центральная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020. Т. 25, № 3. С. 13–24.

Опарин Н.А., Олейников О.Б. Геологическое строение и вещественный состав кимберлитовых трубок Хомпу-Майского поля (Центральная Якугия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022. Т. 27, № 4. С. 486–498.

Опарин Н.А., Олейников О.Б. Минералы ряда флогопит-киноситалит основной массы кимберлитовых пород трубок Хомпу-Майского поля (Центральная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26, № 4. С. 29–42.

Смелов А.П., Олейников О.Б., Павлушин А.Д., Толстов А.В. Алмазная «ласточка» Манчары // Наука из первых рук. 2012. Т. 45, № 3. С. 20–25.

Gaspar J.C., Wyllie P.J. Barium phlogopite from the Jacupiranga carbonatite, Brazil // American Mineralogist. 1982. V. 67. P. 997–1000.

Guiliani A., Soltys A., Phillips D., Kamenetsky V.S., Maas R., Goemann K., Woodhead J.D., Drysdale R.N., Griffin W.L. The final stages of kimberlite petrogenesis: petrography, mineral chemistry, melt inclusions and Sr-C-O isotope geochemistry of the Bultfontein kimberlite (Kimberley, South Africa) // Chemical Geology. 2017. V. 455. P. 342–356.

Holmes A.A. Contribution to the petrology of kimberlite and its inclusions // Transactions of the Geolical Society of South Africa. 1936. V. 39. P. 379–428.

Kopylova M.G., Mogg T., Smith B.S. Mineralogy of the Snap Lake kimberlite, Northwest territories, Canada, and compositions of phlogopite as records of its crystallization // The Canadian Mineralogist. 2010. V. 48 (3). P. 549–570.

Le Roex A.P., Bell D.R., Davis P. Petrogenesis of group I kimberlites from Kimberley, South Africa: Evidence from bulk-rock geochemistry // Journal of Petrology. 2003. V. 44 (12). P. 2261–2286.

Malarkey J., Pearson D.G., Kjarsgaard B.A., Davidson J.P., Nowell G.M., Ottley C.J., Stammer J. From source to crust: tracing magmatic evolution in a kimberlite and a melilitite using microsample geochemistry // Earth Planet. Sci. Lett. 2010. V. 299. P. 80–90. McDonough W.F., Sun S.S. The composition of the Earth // Chemical Geology. 1995. V. 120. P. 223–253.

Mitchell R.H. Kimberlites, orangeites, and related rocks. New York : Plenum Press, 1995. 410 p.

Rao N.V.C., Kumar A., Sahoo S., Dongre A.N., Talukdar D. Petrology and petrogenesis of Mesoproterozoic lamproites from The Ramadugu field, NW Margin of the Cuddapah basin, Eastern Dharwar Craton, Southern India // Lithos. 2014. V. 196–197. P. 150–168.

Rieder M., Cavazzini G., D'yakonov Yu.S., Frank-Kamenetskii V.A., Gottardi G., Guggenheim S., Koval' P.V., Müller G., Neiva A.M.R., Radoslovich E.W., Robert J.-L., Sassi F.P., Takeda H., Weiss Z., Wones D.R. Nomenclature of the micas // Clays and Cloy Minerals. 1998. V. 46, No. 5. P. 586–595.

Scott Smith B.H., Nowicki T.E., Russell J.K., Webb K.J., Mitchell R.H., Hetman C.M., Robey J.V. A Glossary of Kimberlite и Related Terms. North Vancouver, BC, Canada: Scott-Smith Petrology Inc. 2018. Part 1. 144 p.; Part 2. 59 p.; Part 3. 56 p.

Seo J., Choi Seon-Gyu, Park Jung-Woo, Whattam S.A., Kim Dong Woo, Ryu In-Chang, Oh Chang Whan. Geochemical and mineralogical characteristics of the Yonghwa phoscorite-carbonatite complex, South Korea, and genetic implications // Lithos. 2016. V. 262. P. 606–619.

Soltys A., Giuliani A., Phillips D. Apatite Compositions and groundmass mineralogy record divergent melt/fluid evolution trajectories in coherent kimberlites caused by differing emplacement mechanisms // Contrib. Mineral. Petrol. 2020. V. 175 (49).

Wilson M., Kjarsgaard B., Taylor B. Stable isotope composition of magmatic and deuteric carbonate phases in hypabyssal kimberlite, Lac de Gras field, Northwest Territories, Canada // Chemical Geology. 2007. V. 242. P. 435–454.

References

Brakhfogel' F.F. *Geologicheskie aspekty kimberlitovogo magmatizma severo-vostoka Sibirskoy platofrmy* [Geological aspects of kimberlite magmatism of the north-east of the Siberian platform formation]. Yakutsk: YaF SO AN SSSR. 1984. 128 p. In Russian

Kargin A.V., Golubeva Yu.Yu., Kononova V.A. *Kimberlity Daldyno-Alakitskogo rayona (Yakutiya): Prostranstvennoe raspredelenie porod s razlichnymi veshchestvennymi kharakteristikami* [Kimberlites of the Daldyno-Alakitsky District (Yakutia): Spatial distribution of rocks with different material characteristics] // Petrologiya [Petrology]. 2011. V. 19. No. 5. pp. 520–545. In Russian

Kornilova V.P., Nikishov K.N., Koval'skiy V.V., Zol'nikov G.V. Atlas tekstur i struktur kimberlitovykh porod [Atlas of textures and structures of kimberlitic rocks]. Moscow: Nauka. 1983. 157 p. In Russian

Kostrovitskiy S.I., Yakovlev D.A. Proiskhozhdenie kimberlitov Yakutskoy provintsii [Origin of kimberlites of the Yakutian province]. Irkutsk: Institut geokhimii SO RAN. 2023. 490 p. In Russian

Krasnova N.I., Petrov T.G. *Genezis mineral'nykh individov i agregatov* [Genesis of mineral individuals and aggregates.]. St.Peterburg: Nevskiy kur'er. 1995. 228 p. In Russian

Oparin N.A., Oleynikov O.B., Baranov L.N. Apatit iz kimberlitovoy trubki Manchary (Tsentral'naya Yakutiya) [Apatite from the Manchary kimberlite pipe (Central Yakutia)] // Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki [Natural resources of the Arctic and Subarctic]. 2020. V. 25. No. 3. pp. 13–24. In Russian

Oparin N.A., Oleynikov O.B. Geologicheskoe stroenie i veshchestvennyy sostav kimberlitovykh trubok Khompu-Mayskogo polya (Tsentral'naya Yakutiya) [The geology and composition of the Khompu-May field kimberlite pipes (Central Yakutia, Russia)] // Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki [Natural resources of the Arctic and Subarctic]. 2022. V. 27. No. 4. pp. 486–498. In Russian

Oparin N.A., Oleynikov O.B. Mineraly ryada flogopit-kinositalit osnovnoy massy kimberlitovykh porod trubok Khompu-Mayskogo polya (Tsentral'naya Yakutiya) [Minerals of phlogopite-kinoshitalite series from groundmass of kimberlite rocks of pipes of the Khompu-May field (Central Yakutia)] // Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki [Natural resources of the Arctic and Subarctic]. 2021. V. 26. No. 4. pp. 29–42. In Russian

Smelov A.P., Oleynikov O.B., Pavlushin A.D., Tolstov A.V. *Almaznaya «lastochka» Manchary* [The Manchary diamond «swallow»] // *Nauka iz pervykh ruk* [Science first hand] 2012. V. 45. No. 3. pp. 20–25. In Russian

Gaspar J.C., Wyllie P.J. Barium phlogopite from the Jacupiranga carbonatite, Brazil // American Mineralogist. 1982. V. 67. pp. 997–1000.

Guiliani A., Soltys A., Phillips D., Kamenetsky V.S., Maas R., Goemann K., Woodhead J.D., Drysdale R.N., Griffin W.L. The final stages of kimberlite petrogenesis: petrography, mineral chemistry, melt inclusions and Sr-C-O isotope geochemistry of the Bultfontein kimberlite (Kimberley, South Africa) // Chemical Geology. 2017. V. 455. pp. 342–356.

Holmes A.A. Sontribution to the petrology of kimberlite and its inclusions // Transactions of the Geolical Society of South Africa. 1936. V. 39. pp. 379–428.

Kopylova M.G., Mogg T., Smith B.S. Mineralogy of the Snap Lake kimberlite, Northwest territories, Canada, and compositions of phlogopite as records of its crystallization // The Canadian Mineralogist. 2010. V. 48 (3). pp. 549–570.

Le Roex A.P., Bell D.R., Davis P. Petrogenesis of group I kimberlites from Kimberley, South Africa: Evidence from bulk-rock geochemistry // Journal of Petrology. 2003. V. 44 (12). pp. 2261–2286.

Malarkey J., Pearson D.G., Kjarsgaard B.A., Davidson J.P., Nowell G.M., Ottley C.J., Stammer J. From source to crust: tracing magmatic evolution in a kimberlite and a melilitite using microsample geochemistry // Earth Planet. Sci. Lett. 2010. V. 299. pp. 80–90.

McDonough W.F., Sun S.S. The composition of the Earth // Chemical Geology. 1995. V. 120. pp. 223–253.

Mitchell R.H. Kimberlites, orangeites, and related rocks. New York: Plenum Press. 1995. 410 p.

Rao N.V.C., Kumar A., Sahoo S., Dongre A.N., Talukdar D. Petrology and petrogenesis of Mesoproterozoic lamproites from The Ramadugu field, NW Margin of the Cuddapah basin, Eastern Dharwar Craton, Southern India // Lithos. 2014. V. 196-197. pp. 150–168. Rieder M., Cavazzini G., D'yakonov Yu.S., Frank-Kamenetskii V.A., Gottardi G., Guggenheim S., Koval' P.V., Müller G.,

Neiva A.M.R., Radoslovich E.W., Robert J.-L., Sassi F.P., Takeda H., Weiss Z., Wones D.R. Nomenclature of the micas // Clays and Cloy Minerals. 1998. Vol. 46. No 5. pp. 586–595.

Scott Smith B.H., Nowicki T.E., Russell J.K., Webb K.J., Mitchell R.H., Hetman C.M., Robey J.V. A Glossary of Kimberlite i Related Terms. North Vancouver, BC, Canada: Scott-Smith Petrology Inc. 2018. Part 1 – 144 p.; Part 2 – 59 p.; Part 3 – 56 p.

Seo J., Choi Seon-Gyu, Park Jung-Woo, Whattam S.A., Kim Dong Woo, Ryu In-Chang, Oh Chang Whan Geochemical and mineralogical characteristics of the Yonghwa phoscorite-carbonatite complex, South Korea, and genetic implications // Lithos. 2016. V. 262. pp. 606–619.

Soltys A., Giuliani A., Phillips D. Apatite Compositions and groundmass mineralogy record divergent melt/fluid evolution trajectories in coherent kimberlites caused by differing emplacement mechanisms // Contrib. Mineral. Petrol. 2020. V. 175 (49).

Wilson M., Kjarsgaard B., Taylor B. Stable isotope composition of magmatic and deuteric carbonate phases in hypabyssal kimberlite, Lac de Gras field, Northwest Territories, Canada// Chemical Geology. 2007. V. 242. pp. 435–454.

Информация об авторах:

Опарин Н.А., младший научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия. E-mail: nik3256-1989@yandex.ru

Олейников О.Б., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия.

E-mail: olei-oleg@yandex.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Oparin N.A., Junior Researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia.

E-mail: nik3256-1989@yandex.ru

Oleinikov O.B., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Leader Researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia. E-mail: olei-oleg@yandex.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 03.06.2024; одобрена после рецензирования 03.08.2024; принята к публикации 27.09.2024

The article was submitted 03.06.2024; approved after reviewing 03.08.2024; accepted for publication 27.09.2024

МИНЕРАЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ

Научная статья УДК 552.311 doi: 10.17223/25421379/32/5

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА КЛИНОПИРОКСЕНА И АПАТИТА ИЗ ПИРОКСЕНИТОВОГО МАССИВА УКДУСКА (АЛДАНО-СТАНОВОЙ ЩИТ, ЯКУТИЯ)



Елизавета Анатольевна Зубакова¹, Анна Геннадьевна Дорошкевич², Виктор Викторович Шарыгин³

^{1, 2, 3} Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

² Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия

¹zybakovaea@igm.nsc.ru

² doroshkevich@igm.nsc.ru

³ sharygin@igm.nsc.ru

Аннотация. Представлены результаты изучения клинопироксена и апатита из пород пироксенитового массива Укдуска (Алдано-Становой щит, Якутия). Клинопироксен в породах почти полностью представлен диопсидом, а точки составов образуют тренд, представленный увеличением геденбергитового минала при незначительном изменении эгиринового компонента, что характерно для щелочных пироксенов. Нормированные к хондриту РЗЭ-спектры имеют синусоидальную форму, что также роднит их с клинопироксенами из щелочных пород. Апатит в породах представлен в основном фторапатитом, но также встречаются разности, попадающие в поле гидроксилапатита. Для минерала характерны повышенные концентрации SrO (до 1,2 мас. %) и SO₃ (до 0,9 мас. %), а также обеднение ЛРЗЭ и отсутствие европиевой аномалии, что является типичным для апатитов из щелочных массивов.

Ключевые слова: клинопироксен, апатит, пироксениты, массив Укдуска, Алдан-Становой щит

Благодарности: Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за конструктивную критику и обсуждение результатов, способствовавшие улучшению статьи.

Источник финансирования: Изучение геологии района проводилось в рамках государственных заданий ИГМ СО РАН (122041400241-5) и ГИН СО РАН (АААА-А21-121011390002-2), минералогические исследования – за счет средств РНФ, проект 23-17-00098 (https://rscf.ru/project/23-17-00098/).

Для цитирования: Зубакова Е.А., Дорошкевич А.Г., Шарыгин В.В. Особенности состава клинопироксена и апатита из пироксенитового массива Укдуска (Алдано-Становой щит, Якутия) // Геосферные исследования. 2024. № 3. С. 42–51. doi: 10.17223/25421379/32/5

Original article doi: 10.17223/25421379/32/5

FEATURES OF THE COMPOSITION OF CLINOPYROXENE AND APATITE FROM THE UKDUSKA PYROXENITE MASSIF (ALDANO-STANOVOY SHIELD, YAKUTIA)

Elizaveta A. Zubakova¹, Anna G. Doroshkevich², Victor V. Sharygin³

^{1, 2, 3} V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

²N.L. Dobretsov Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia

¹zybakovaea@igm.nsc.ru

² doroshkevich@igm.nsc.ru

³ sharygin@igm.nsc.ru

Abstract. The article focuses on the results of studying clinopyroxene and apatite from rocks of the Ukduska pyroxenite massif (Aldano-Stanovoy shield, Yakutia). Clinopyroxene in the rocks is almost entirely represented by diopside, and the composition points form a trend represented by an increase in the hedenbergite end-member with a slight change in the aegirine component, which is typical for alkaline clinopyroxenes. The REE spectra normalized to chondrite have a sinusoidal shape, which also makes them similar to clinopyroxenes from alkaline rocks. The similar shape of REE spectra in clinopyroxenes from different types of

rocks of the Ukduska massif indicates the absence of sharp changes in crystallization conditions during the formation of the rocks. The decrease, on average, in LREE concentrations in clinopyroxene-carbonate-feldspathic rocks compared to clinopyroxenites indicates that clinopyroxene crystallized at temperatures somewhat lower than pyroxneites and together with mineral phases such as apatite and titanite, which distributed most of the LREEs to itself. Apatite in rocks is represented mainly by fluorapatite, but there are also varieties that fall within the hydroxyapatite field. The mineral is characterized by increased concentrations of SrO (up to 1.2 wt %) and SO₃ (up to 0.9 wt %), as well as depletion of LREE and the absence of Eu anomaly, which is typical for apatites from alkaline massifs. Also in clinopyroxenites enriched in olivine and phlogopite, apatite with elevated Cl concentrations (up to 1.6 wt %) is found. The similarity of the chemical composition of apatites from clinopyroxenites and clinopyroxene-carbonate-feldspathic rocks may indicate closer conditions and temperatures of crystallization, however, it is possible that some of the apatites from the latter type of rocks underwent metasomatic transformation, as indicated by heterogeneous zoning and the enrichment of the outer rim with sulfur and strontium.

Keywords: clinopyroxene, apatite, pyroxenite, Ukduska massif, Aldan-Stanovoy shield

Acknowledgments: The authors acknowledge the anonymous reviewers for their constructive criticism and discussion of the results, which contributed to the improvement of the article.

Source of financing: The work was done on state assignment of IGM SB RAS (122041400241- 5) and GIN SB RAS (AAAA-A21-121011390002-2), mineralogical research – at the expense of the Russian Science Foundation, project 23-17-00098 (https://rscf.ru/project/23-17-00098/).

For citation: Zubakova E.A., Doroshkevich A.G., Sharygin V.V. (2024) Features of the composition of clinopyroxene and apatite from the Ukduska pyroxenite massif (Aldan-Stanovoy shield, Yakutia). *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 3. pp. 42–51. doi: 10.17223/25421379/32/5

Введение

Ультраосновные и основные породы являются важным источником информации о составе мантии, мантийных процессах и процессах мантийно-корового взаимодействия. Особенно интересным является проявление ультраосновного и основного магматизма на древних щитах и платформах, что позволяет проследить эволюцию состава литосферной мантии, а также реконструировать палеогеодинамические обстановки. Одним из таких мест является Алдано-Становой щит, на котором, помимо доступности для изучения, представлено большое количество разнообразных ассоциаций магматических пород.

На данный момент существуют многочисленные геохронологические и геологические данные по магматическим породам архея и протерозоя Алдано-Станового щита. Массив Укдуска, входящий в группу массивов р. Хани, располагается на юго-западе Алдано-Станового щита и имеет возраст ~1,8 млрд лет [Неймарк и др., 1984; Дорошкевич и др., 2022]. Данный массив был детально изучен в 1980-х гг., в первую очередь как источник апатитовой руды, и был поставлен на баланс.

Особенность строения массивов р. Хани, выраженная в том, что основная часть сложена только клинопироксенитами, которые окружены клинопироксен-карбонат-полевошпатовыми породами, вызывает довольно много вопросов, связанных непосредственно с происхождением пород. Не до конца ясен генетический тип и в принципе генезис данных массивов. Л.И. Панина и соавт. [Панина и др., 1987а, 19876] предполагают, что породы Ханинского массива были образованы в результате смешения высокотемпературных (1 300–1 200 °C) расплавов щелочно-базальтоидного и низкокремнистого-карбонатного составов. Также на данный момент существует ряд работ, в которых пироксениты, обогащенные оливином и флогопитом, рассматриваются как оливиновые лампроиты, сформированные 2,7 млрд лет [Владыкин, 2001]. Также в других работах описываются карбонатиты, расположенные в центральной части массива, возраст которых составил 1,8 млрд лет, что авторы интерпретируют как свидетельство формирования раннедокембрийских карбонатитов в юго-восточной части Чаро-Олекминского геоблока [Стифеева и др., 2023].

В данной работе рассматриваются петрографические и минералогические характеристики основных минеральных фаз из основных типов пород массива Укдуска и проводится сравнение с различными генетическими типами массивов, содержащих пироксениты, такие как щелочно-ультраосновные массивы Африканда и Лесная Варака (Кольская магматическая провинция), габбро-диоритовый Волковский массив (Платиноносный пояс Урала), щелочно-ультраосновной Лысанский комплекс (Восточные Саяны), ультракалиевый щелочной Сакунский массив (Восточное Забайкалье), щелочно-ультраосновной карбонатитовый комплекс Арбарастах (восточная часть Алдана-Станового щита).

Методы исследований

В исследовании была использована и проанализирована коллекция пород, отобранных во время полевых работ 1983–1986 гг. научными сотрудниками лаборатории термобарогеохимии № 436 ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) И.Е. Прошенкиным, В.В. Шарыгиным и Л.И. Паниной Петрографические и текстурноструктурные особенности пород были изучены с помощью шлифов на микроскопе Olympus BX51 с фотокамерой. Также минеральный состав пород и особенности химического состава различных минеральных фаз исследовались на сканирующем микроскопе MIRA 3 LMU (TESCAN) с энергодисперсионным спектрометром (EDS, система микроанализа INCA Energy-450 XMax-80) в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Условия EDS-анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток электронного пучка 1,5 нА, время набора спектров 20 с.

Анализ основных минеральных фаз производился на электронном микрозонде Camebax-Micro в аналитическом центре ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) с использованием волнового дисперсионного спектрометра (WDS) с тонко сфокусированным пучком (<5 мкм). Режимы съемки: напряжение 20 кВ, ток 20– 30 нА, время измерения от 10 до 180 с. Для изучения химического состава апатита использовались стандарты: F, Cl – апатита (F, Cl, CaO, P₂O₅), TiO₂, BaSO₄(SO₃), альбит (Na₂O), IGEM (MgO, SiO₂, FeO, MnO), RbNd(WO₄)₂ (Nd₂O₃), CsPr(MoO₄)₂ (Pr₂O₃), LiCe(WO₄)₂ (Ce₂O₃), UO₂, ThO₂, Gl-10 sr (SrO), Y₃Al₅O₁₂ (Y₂O₃), KLa(MoO₄)₂ (La₂O₃). Для оливина и клинопироксена применялись стандарты: Cr₂O₃, CH-1 (SiO₂, NiO, MgO, FeO), BD (CaO), ZnFe₂O₄ (ZnO), IGEM (MnO, Al₂O₃), Co-met (CoO). Стандарты для флогопита: F-phlog (F, K2O, Al2O3, SiO2), альбит (Na₂O), Cl-апатит (Cl), BD (MgO, CaO), UD-92 (Cr₂O₃), GL-11Ba (BaO), TiO₂, IGEM (MnO), O-145 (FeO), GL-11Sr (SrO).

Микроэлементы в центральных частях зерен апатита и клинопироксена измерялись методом массспектрометрии с индуктивно связанной плазмой лазерной абляции (LA-ICP-MS) с использованием эксимерного лазера Geolas Complex Pro с длиной волны 193 нм, соединенного с Thermo iCAP TQ ICP-MS, в Немецком исследовательском центре геонаук (г. Потсдам). Аналитические условия: размер лазерного пучка 24 мкм, частота повторения импульсов – 8 Гц, плотность энергии лазера 5 Дж/см². NIST SRM 610 использовался в качестве внешнего стандарта, а Са, полученный в результате электронного микрозондового анализа (в апатите и титаните), - в качестве внутреннего стандарта. BCR-2G был проанализирован для контроля качества данных; полученные данные о микроэлементах согласуются с опубликованными данными до $< \pm 10$ % (2 σ ; RSD). Каждый анализ включал 20 с измерения фона, 40 с абляции. Содержание циркония использовалось для внутренней калибровки при анализе циркона, а количественные результаты для микроэлементов были получены путем

калибровки относительной чувствительности элементов с использованием стандартного стекла NIST-610 в качестве внешнего калибровочного стандарта. Точность анализов NIST-610 составляет 1–2 % для REE, Y, Sr, Nb, Hf, Ta, Th и U на уровне концентрации г/т от 5 до 10 % – для Са и Ti.

Геология массива и минералогия массива

Ханинский массив расположен на юго-западе Алдано-Станового щита в Каларской зоне тектонического меланжа, которая представлена тоналит-трондьемитовыми ортогнейсами олекминского комплекса и глубокометаморфизованными супракрустальными образованиями (эндербиты и чарнокиты) Культуринского блока [Смелов и др., 2001]. Изучаемый объект входит в группу массивов р. Хани, состоящей из четырех разрозненных интрузивных тел: Укдуска, Кабыханыр, Юс-Кюель и Аномальное (рис. 1).

Массив Укдуска имеет в плане форму овала, вытянутого в северо-западном направлении, длиной около 2,2 км и шириной 0,9 км. Глубина залегания пород доходит до 500 м, а мощность тела в центральной части – до 490 м. В разрезе массив имеет форму неправильной полусферы (рис. 1). Центральная часть массива сложена апатитоносными клинопироксенитами с неоднородной текстурой и в разной степени обогащенными клинопироксеном, флогопитом и фторапатитом. Второстепенными и акцессорными являются амфибол (актинолит, роговая обманка, паргасит), калиевый полевой шпат и альбит, кальцит, целестин, барит, скаполит, титанит, циркон, анкилит-(Се), монацит-Се, магнетит, ильменит, сульфиды (пирит, халькопирит).

Среди клинопироксенитов встречаются разности, обогащенные оливином и флогопитом, которые были выделены в отдельный тип пород – оливин-флогопитовые пироксениты. Акцессорными являются фторапатит, циркон, монацит-Се, ильменит и сульфиды (пирит, пирротин, пентландит). Отличием от других типов пород является отсутствие титанита. В некоторых литературных источниках данные породы фигурируют как лампроиты [Владыкин, 2001].

Клинопироксениты окаймляются клинопироксенполевошпатовыми и клинопироксен-карбонат-полевошпатовыми породами, мощность которых варьируется от 50 до 150 м. Породы характеризуются широкими вариациями основных породообразующих минералов, клинопироксена, кальцита, калиевого полевого шпата, даже в пределах одного образца. К второстепенным и акцессорным минералам в данном типе пород относятся фторапатит, титанит, амфибол, циркон, минералы группы эпидота и алланита, барит, целестин, анкилит-Се, торит, пирит, гематит. В некоторых литературных источниках клинопироксен-карбонат-полевошпатовые породы обозначаются как сиенитоиды [Радьков и др., 2015]. Данные породы залегают согласно по отношению к сланцеватости вмещающих гранито-гнейсов верхнеархейского возраста. Также между клинопироксенкарбонат-полевошпатовыми породами и клинопироксенитами распространены переходные разновидности пород. В зоне контакта с гранито-гнейсами выделяются сильно окварцованные участки [Перовская и др., 1987]. Как в пределах центральной части, так и по периферии, породы секутся жилами трахитоидных сиенитов и карбонатитоподобных пород [Радьков и др., 2015].

Более поздними являются дайкообразные тела порфировидных и мелкозернистых гранитов пуричиканского комплекса, приуроченные к разрывным нарушениям.





а – схема расположения четырех массивов р. Хани относительно друг друга; b – геологическое строение массива Укдуска с геологическими разрезами (по [Перовская и др., 1987] с дополнениями автора). Легенда: 1 – четвертичные отложения; 2 – метапесчаники и двуслюдяные кристаллические сланцы (PR1tng); 3 – биотитовые сланцы (AR3tn); 4 – гранитизированные кристаллические сланцы (AR3tm); 5 – долериты и габбро-долериты (βmPR2); 6 – мелкозернистые биотитовые и двуслюдяные граниты (γ2PR1); 7 – крупнозернистые биотитовые и биотит-рогообманковые граниты и гранитоиды (γ1PR1); 8 – клинопироксен-карбонат-полевошпатовые породы(ξmAR3); 9 – биотитовые или биотит-рогообманковые гнейсы (γ-gn1AR3); 10 – апатитоносные пироксениты (σAR3); 11 – разрывные нарушения: а) достоверные, б) предполагаемые

Fig. 1. The schematic geological map of the Khani massifs (according to [Perovskaya et al, 1987])

a – geological scheme of the location of the four Khani massifs relative to each other; b – geological structure of the Ukduska massif with geological sections (according to [Perovskaya et al, 1987] with additions by the authors). Legend: 1 – Quaternary deposits; 2 – metasandstones and bimica schists (PR1tng); 3 – biotite schists (AR3tn); 4 – granitized crystalline schists (AR3tm); 5 – dolerites and gabbrodolerites (β mPR2); 6 – fine-grained biotite and bimica granites (γ 2PR1); 7 – coarse-grained biotite and biotite-hornblende granites and granitoids (γ 1PR1); 8 – clinopyroxene-carbonate-feldspathic rocks (ξ mAR3); 9 – biotite or biotite-hornblende gneisses (γ -gn1AR3); 10 – apatite-bearing pyroxenites (α R3); 11 – tectonic fractures: a) reliable, b) alleged

45

Результаты исследований

Клинопироксен является главным породообразующим минералом, встречается во всех типах пород массива Укдуска и имеет гипидиоморфную, реже аллотриоморфную форму зерен, размер которых в некоторых образцах клинопироксенитов достигает 7 мм. В некоторых образцах клинопироксен частично замещен амфиболом. В карбонат-пироксен-полевошпатовых породах более мелкие зерна клинопироксена дислоцируются в полевошпатовой основной массе, в то время как крупные зерна характерны для кальцитового цемента.

На тройной диаграмме Aeg-Di-Hed представлены составы клинопироксенов из трех типов пород массива Укдуска (рис. 2). Точки, соответствующие клинопироксенитам и клинопироксен-карбонат-полевошпатовым породам, располагаются вдоль линии диопсид-геденбергит с незначительными изменениями эгиринового компонента, что характерно для клинопироксенов щелочного ряда [Marks et al., 2008]. Отдельно располагаются составы минерала из оливин-слюдистых клинопироксенитов, являясь практически чистым диопсидом с почти полностью отсутствием Al₂O₃. Если сравнивать данные по клинопироксенам из массива Укдуски с минералом из массивов разных формаций, то можно наблюдать сходство составов с пироксенитами из Африканды, Подлысанска и частично Арбарастаха (рис. 2, 3). Также стоит отметить, что клинопироксен из оливин-слюдистых клинопироксенитов близок по составу клинопироксену из оливинитов массива Лесная Варака.

РЗЭ-спектры, нормированные к хондриту [McDonough, Sun, 1995], по клинопироксенам из клинопироксенитов и клинопироксен-карбонат-полевошпатовых пород имеют схожую конфигурацию (рис. 3) с сигмоидальной формой распределения. Данная особенность является характерной чертой для многих клинопироксенов щелочных комплексов [Doroshkevich et al., 2020]. Отношение (Ce/Yb)n для минерала клинопироксенитов в среднем равняется 11, для таковых из клинопироксен-карбонат-полевошпатовых пород – 3.

Апатит характерен, как и клинопироксен, для всех типов пород. Самые крупные кристаллы отмечены в некоторых образцах пироксенитов, в которых апатит имеет вытянутую форму до 3 мм. В остальных образцах размер зерен не превышает 1 мм. В клинопироксенитах и клинопироксен-карбонат-полевошпатовых породах скопления апатита встречаются в виде прожилковых и шлировых обособлений и отдельных зерен неправильной или изометричной формы. Для оливин-слюдистых клинопироксенитов характерны совсем незначительные концентрации апатита, который рассеян по породе и представлен отдельными зернами, размерами не превышающими 0,1 мм. По составу апатит из клинопироксенита и клинопиркосен-карбонат-полевошпатовых пород относится к фторапатиту, в то время как минерал оливин-слюдистых клинопироксенитов по большей части попадает в поле гидроксилапатитов (рис. 4).



Рис. 2. Классификация клинопироксенов из разных типов пород массива Укдуска на тройной диаграмме Di–Hed–Aeg и Mg–(Fe+Mn)–(Ca+Na)

Здесь и на рис. 3 данные по составам клинопироксена из пироксенитов щелочно-ультраосновных и основных массивов и комплексов: Волковский [Аникина, Алексеев, 2010], Африканда и Лесная Варака [Арзамасцев, Фу-Ян, 2014; наши данные], Арбарастах [Kruk et al., 2021; наши данные], Подлысанский [Глазунов, 1975, 1981; наши данные]

Fig. 2. Classification of clinopyroxenes from different types of rocks of the Ukduska massif on the ternary diagram Di–Hed–Aeg and Mg–(Fe+Mn)–(Ca+Na)

Here and in Fig. 3 data on the composition of clinopyroxene from pyroxenites of alkaline-ultrabasic and mafic massifs and complexes: Volkovskiy [Anikina, Alekseev, 2017], Afrikanda i Lesnaya Varaka [Arzamastsev, Fu-Yan, 2014; authors data], Arbarastakh [Kruk et al., 2021; our data], Podlysanskiy [Glazunov, 1975, 1981; authors data]



Рис. 3. Спектры распределения РЗЭ в клинопироксенах из разных типов пород массива Укдуска, нормированных на хондрит по [McDonough, Sun, 1995]

Fig. 3. REE spectra for clinopyroxene from different types of rocks of the Ukduska massif, normalized to chondrite according to [McDonough, Sun, 1995]



Рис. 4. Тройная диаграмма составов апатита и BSE-изображения основных минеральных фаз в разных типах пород массива Укдуска

а -клинопироксенит, b - оливин-слюдистый клинопироксенит, с - клинопироксен-карбонат-полевошпатовые породы

Fig. 4. Ternary plot of apatite compositions and BSE images of the main mineral phases in different types of rocks of the Ukduska massif

a - clinopyroxenite, b - olivine-mica clinopyroxenite, c - clinopyroxene-carbonate-feldspathic rocks

На основе данных микрозондового анализа и LA-ICP-MS, апатит клинопироксенитов и оливин-слюдистых клинопироксенитов, кроме петрогенных примесей, имеет содержания SrO в среднем 0,7 мас. %, а для второго типа пород также характерны повышенные концентрации хлора (до 1,6 мас. %). Важной отличительной особенностью апатита из клинопироксен-карбонат-полевошпатовых пород является наличие неоднородной зональности для некоторых зерен (рис. 5) и обогащение SO₃ и SrO до 1,5 и 1,2 мас. % соответственно. Концентрации стронция в апатите из пород массива Укдуска имеют близкие значения с содержаниями данного элемента в карбонатитах [Belousova et al., 2002].



Рис. 5. ВSE-изображения и карты распределения элементов апатита из клинопироксен-карбонат-полевошпатовых пород и спектры распределения РЗЭ в апатите из разных типов пород массивов Укдуска, Африканда и Лесная Варака [Арзамасцев, Фу-Ян, 2014], Волковский [Аникина и др., 2006], нормированных на хондрит по [McDonough, Sun, 1995]



Нормированные на хондрит редкоземельные (REE) спектры по апатиту из разных типов пород имеют нестандартную для апатитов из щелочных пород (Африканда, Озерная Варака) форму спектра: увеличение концентраций от La к Nd и дальнейшее уменьшение к Lu (см. рис. 5). Это отражается на (Ce/Yb)n – отношении, равном 14 для клинопироксен-карбонат-полевошпатовых пород и 31 для клинопироксенитов, что является более низким по сравнению с апатитом из карбонатитов и щелочных комплексов Кольского полуострова [Kogarko, 2018]. В отличие от Волковского массива, в котором апатит рос одновременно или после кристаллизации плагиоклаза, для апатитов из массива Укдуска не наблюдается европиевая аномалия, что также характерно для щелочных и карбонатитовых комплексов.

Обсуждение результатов и заключение

Составы клинопироксенов из разных типов пород образуют тренд на тройных диаграммах, где железистый компонент увеличивается от оливин-слюдистых клинопироксенитов к клинопироксенитам и клинопироксен-карбонат-полевошпатовым породам, что указывает на постепенную кристаллизацию при остывании магмы, которая имела скорее всего умеренно-щелочную природу. На это указывает также схожесть с клинопироксенами из пироксенитов Африканды и Подлысанского массива, а также оливинитами из Лесной Вараки. Однако если рассматривать бинарные диаграммы [Зубакова и др., 2024], то клинопироксен из клинопироксен-карбонат-полевошпатовых пород не схож с какими-либо данными из приведенных массивов, что, возможно, указывает на его отличающиеся условия формирования.

Схожая форма РЗЭ-спектров в клинопироксенах указывает на отсутствие резких изменений условий кристаллизации при формировании пород. Уменьшение, в среднем, концентраций ЛРЗЭ в клинопироксен-карбонат-полевошпатовых породах по сравнению с клинопироксенитами указывает на то, что клинопироксен кристаллизовался при более низких температурах вместе с такими минеральными фазами, как апатит и титанит, которые распределяли большую часть ЛРЗЭ на себя.

Апатит, как и клинопироксен, имеет свои особенности в разных типах пород. Так, относительно высокие концентрации хлора в зернах апатита из оливинслюдистых клинопироксенитов являются признаком высокотемпературных апатитов [Юдович и др., 2022]. У минерала других типов пород данной особенности не наблюдается. Схожесть химического состава апатитов из клинопироксенитов и клинопироксен-карбонат-полевошпатовых пород может указывать на более близкие условия и температуры кристаллизации, однако возможно, что часть апатитов из последнего типа пород подверглась метасоматическому преобразованию, на что указывает неоднородная зональность и обогащенность внешней каймы серой и стронцием. Схожесть конфигураций РЗЭспектров между двумя типами пород также указывает на их близкие условия формирования.

Есть несколько причин обеднения ЛРЗЭ. Первой причиной является одновременная кристаллизация вместе с апатитом титанита, который концентрировал часть редких земель. Второй причиной может быть мощность эрозионного среза, из-за чего мы не наблюдаем ультраосновных пород (например, мельтейгита), в которых, возможно, содержался перовскит, концентрирующий в себе ЛРЗЭ.

Список источников

Аникина Е.В., Алексеев А.В. Минералого-геохимическая характеристика золото-палладиевого оруденения в Волковском габбро-диоритовом массиве (Платиноносный пояс Урала) // Литосфера. 2010. № 5. С. 75–100.

Аникина Е.В., Пушкарев Е.В., Алексеев А.В., Берсенев С.Я. Особенности химического состава рудоносных и пострудных габброидов Баронского золото-палладиевого рудопроявления (Волковский массив) // Ежегодник-2005. Екатеринбург : ИГГ УрО РАН, 2006. С. 127–132.

Арзамасцев А.А., Фу-Ян Ву. U-Pb геохронология и изотопная (Sr, Nd) систематика минералов щелочно-ультраосновных массивов Кольской провинции // Петрология. 2014. Т. 22, № 5. С. 496–515.

Владыкин Н.В. Щелочной магматизм и проблемы мантийных источников. Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2001. 250 с.

Глазунов О.М. Геохимия и петрология габбро-пироксенитовой формации Восточного Саяна. Новосибирск : Наука, 1975. 204 с.

Глазунов О.М. Геохимия и рудоносность габброидов и гипербазитов. Новосибирск : Наука, 1981. 191 с.

Дорошкевич А.Г., Шарыгин В.В., Пономарчук А.В., Изох А.Э., Избродин И.А., Зубакова Е.А., Прокопьев И.Р., Сергеев С.А. Новые данные о возрасте пород пироксенитовых массивов р. Хани (Алдано-Становой щит) // Геосферные исследования. 2022. № 3. С. 6–26. doi: 10.17223/25421379/24/1

Зубакова Е.А., Дорошкевич А.Г., Шарыгин В.В. Особенности состава клинопироксена и апатита из пироксенитового массива Укдуска (Алдано-Становой щит, Якутия) // Глубинный магматизм, его источники и плюмы. Иркутск, 2024. С. 48–51.

Неймарк Л.А., Искандерова А.Д., Тимашков А.Н., Миронюк Е.П. Новые данные о возрасте пород и руд Ханинского апатитоносного района // ДАН СССР. 1984. Т. 279, № 3. С. 713–717.

Панина Л.И., Прошенкин И.Е., Булгакова Е.Н. Формирование пород Ханинского массива (Алданский щит) по данным изучения химизма расплавных включений // Геология и геофизика. 1987а. № 8. С. 50–62.

Панина Л.И., Прошенкин И.Е., Булгакова Е.Н., Усольцева Л.М. Ханинский массив ультраосновных – средних пород и его генезис (Алданский щит) // Геология и геофизика. 1987б. № 6. С. 39–49.

Перовская Л.К., Баринова А.С. и др. Отчет по предварительной разведке месторождения Укдуска Ханинского апатитоносного района за 1984–1986 гг. Ханинская ГРП, 1987. О-50-ХХХ, О-50-ХХУ // Якутская АССР. 1987. 231 с.

Радьков А.В., Молчанов А.В., Артемьев Д.С., Беленко Е.В., Голобурдина М.Н., Ибрагимова Э.К., Иванов Д.Н., Козлов Д.С., Кукушкин К.А., Минина Е.А., Петров В.В., Смирнов Е.А., Смирнова Е.В., Соловьев О.Л., Терехов А.В., Тимашков А.Н., Ушакова Д.Д., Хорохорина Е.И., Шатов В.В., Шатова Н.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-51 – Алдан. Объяснительная записка. СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. 365 с.

Смелов А.П., Зедгенизов А.Н., Тимофеев В.Ф. Фундамент Северо-Азиатского кратона: Алдано-Становой щит: Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М. : Наука/Интерпериодика, 2001. С. 81–103.

Стифеева М.В., Владыкин Н.В., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Сотникова И.А., Адамская Е.В., Ковач В.П., Плоткина Ю.В., Толмачева Е.В., Алымова Н.В. Возрастные рубежи формирования раннедокембрийских карбонатитов юговосточной части Чаро-Олекминского геоблока Алданского щита // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 508, № 1. С. 32–36.

Юдович Я.Э., Кетрис М.П., Рыбина Н.В. Состав апатита как универсальный индикатор геологических процессов. Новосибирск : Свиньин и сыновья, 2022. 140 с.

Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I. Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: trace-element compositions and their relationship to host rock type // Journal of Geochemical Exploration. 2002. V. 76 (1). P. 45–69. doi: 10.1016/S0375-6742(02)00204-2

Doroshkevich A.G., Prokopyev I.R., Ponomarchuk A., Savatenkov V.M., Kravchenko A.A., Ivanov A.I., Wohlgemuth-Ueberwasse C. Petrology and geochemistry of the late Mesozoic Dzheltula alkaline igneous complex, Aldan-Stanovoy Shield, Russia: constraints on derivation from the ancient enriched mantle source // International Journal of Earth Sciences. 2020. V. 109 (7). P. 2407–2423.

Kogarko L. Chemical Composition and Petrogenetic Implications of Apatite in the Khibiny Apatite-Nepheline Deposits (Kola Peninsula) // Minerals. 2018. V. 8 (532). doi: 10.3390/min8110532

Kruk M.N., Doroshkevich A.G., Prokopyev I.R., Izbrodin I.A. Mineralogy of Phoscorites of the Arbarastakh Complex (Republic of Sakha, Yakutia, Russia) // Minerals. 2021. V. 11, Iss. 6. 23 p.

Marks M.A.W., Schilling J., Coulson I.M., Wenzel T., Markl G. The alkaline peralkaline Tamazeght complex, High Atlas Mountains, Morocco: Mineral chemistry and petrological constraints for derivation from a compositionally heterogeneous mantle source: Journal of Petrology. 2008. V. 49. P. 1097–1131. doi: 10.1093/petrology/egn019

McDonough W.P., Sun S.S. The composition of the Earth // Chemical Geology. 1995. V. 120. P. 223–253.

References

Anikina E.V., Alekseev A.V. *Mineralogo-geokhimicheskaya kharakteristika zoloto-palladievogo orudeneniya v Volkovskom gabbrodioritovom massive (Platinonosnyy poyas Urala)* [Mineral-geochemical characteristic of gold-palladium mineralization in the Volkov gabbro massif (Platiniferous Urals Belt)] // Litosfera. 2010. No. 5. pp. 75–100. In Russian

Anikina E.V., Pushkarev E.V., Alekseev A.V., Bersenev C.Ya. Osobennosti khimicheskogo sostava rudonosnykh i postrudnykh gabbroidov Baronskogo zoloto-palladievogo rudoproyavleniya (Volkovskiy massiv) [Features of the chemical composition of ore-bearing and post-ore gabbroids of the Baronsky gold-palladium ore occurrence (Volkovskiy massif)] // Ezhegodnik-2005. Ekaterinburg: IGG UrO RAN. 2006. pp. 127–132. In Russian

Arzamastsev A.A., Fu-Yan Vu. U-Pb geokhronologiya i izotopnaya (Sr, Nd) sistematika mineralov shchelochno-ul'traosnovnykh massivov Kol'skoy provintsii [U-Pb geochronology and isotopic (Sr, Nd) systematics of minerals of alkaline-ultramafic massifs of the Kola province] // Petrologiya [Petrology]. 2014. V. 22. No. 5. pp. 496–515. In Russian

Vladykin N.V. Shchelochnoy magmatizm i problemy mantiynykh istochnikov [Alkaline magmatism and mantle source issues]// Irkutsk: Izd-vo IrGTU. 2001. 250 p. In Russian

Glazunov O.M. Geokhimiya i petrologiya gabbro-piroksenitovoy formatsii Vostochnogo Sayana [Geochemistry and petrology of the gabbro-pyroxenite formation of the Eastern Sayan]. Novosibirsk: Nauka. 1975. 204 p. In Russian

Glazunov O.M. *Geokhimiya i rudonosnost' gabbroidov i giperbazitov* [Geochemistry and ore-bearing properties of gabbroids and hyperbasites]. Novosibirsk: Nauka. 1981. 191 p. In Russian

Doroshkevich A.G., Sharygin V.V., Ponomarchuk A.V., Izokh A.E., Izbrodin I.A., Zubakova E.A., Prokop'ev I.R., Sergeev S.A. New age data for rocks of Khani intrusions (Aldan-Stanovoy shield) // Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research. 2022. 3. pp. 6–26. https://doi.org/10.17223/25421379/24/1. In Russian

Zubakova E.A., Doroshkevich A.G., Sharygin V.V. Osobennosti sostava klinopiroksena i apatita iz piroksenitovogo massiva Ukduska (Aldano-Stanovoy shchit, Yakutiya) [Peculiarities of the composition of clinopyroxene and apatite from the Ukdusk pyroxenite massif (Aldan-Stanovoy shield, Yakutia)] // Glubinnyy magmatizm, ego istochniki i plyumy. Irkutsk. 2024. pp. 48–51. In Russian

Neymark L.A., Iskanderova A.D., Timashkov A.N., Mironyuk E.P. *Novye dannye o vozraste porod i rud Khaninskogo apatitonosnogo rayona* [New data on the age of rocks and ores of the Khaninsky apatite-bearing region] // DAN SSSR [Reports of the Academy of Science]. 1984. V. 279 (3). pp. 713–717. In Russian

Panina L.I., Proshenkin I.E., Bulgakova E.N. Formirovanie porod Khaninskogo massiva (Aldanskiy shchit), po dannym izucheniya khimizma rasplavnykh vklyucheniy [Formation of rocks of the Khaninsky massif (Aldan shield), according to the study of the chemistry of melt inclusions]// Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]. 1987a (8). pp. 50–62. In Russian

Panina L.I., Proshenkin I.E., Bulgakova E.N., Usol'tseva L.M. *Khaninskiy massiv ul'traosnovnykh – srednikh porod i ego genezis* (Aldanskiy shchit) [Khaninsky massif of ultrabasic – intermediate rocks and its genesis (Aldan shield)] // Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]. 1987b (6). pp. 39–49. In Russian

Perovskaya L.K., Barinova A. Otchet po predvaritel'noy razvedke mestorozhdeniya Ukduska Khaninskogo apatitonosnogo rayona za 1984–1986 gg. Khaninskaya GRP [Preliminary exploration report of the Ukduska deposit of the Khaninsky apatite-bearing region for 1984–1986. Khaninskaya GRP], 1987. O-50-KhKhKh, O-50-KhKhV. Yakutskaya ASSR. 1987. 231 p. In Russian

Rad'kov A.V., Molchanov A.V., Artem'ev D.P., Belenko E.V., Goloburdina M.N., Ibragimova E.K., Ivanov D.N., Kozlov D.P., Kukushkin K.A., Minina E.A., Petrov V.V., Smirnov E.A., Smirnova E.V., Solov'ev O.L., Terekhov A.V., Timashkov A.N., Ushakova D.D., Khorokhorina E.I., Shatov V.V., Shatova N.V. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Aldano-Zabaykal'skaya. List O-51 – Aldan. Ob''yasnitel'naya zapiska* [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 1,000,000 (third generation). Aldan-Zabaikalskaya Series. Sheet O-51 – Aldan. Explanatory Note] // St.Petersburg: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI. 2015. 365 p. In Russian

Smelov A.P., Zedgenizov A.N., Timofeev V.F. Fundament Severo – Aziatskogo kratona: Aldano-Stanovoy shchit: Tektonika, geodinamika i metallogeniya territorii Respubliki Sakha (Yakutiya) [The basement of the North Asian craton: Aldan-Stanovoy shield: Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia)]. Moscow: Nauka/Interperiodika. 2001. pp. 81–103. In Russian

Stifeeva M.V., Vladykin N.V., Kotov A.B., Sal'nikova E.B., Sotnikova I.A., Adamskaya E.V., Kovach V.P., Plotkina Yu.V., Tolmacheva E.V., Alymova N.V. Vozrastnye rubezhi formirovaniya rannedokembriyskikh karbonatitov yugo-vostochnoy chasti Charo-Olekminskogo geobloka Aldanskogo shchita [Age boundaries of the formation of early Precambrian carbonatites of the southeastern part of the Charo-Olyokminsky geoblock of the Aldan shield] // Doklady Rossiyskoy Akademii nauk. Nauki o Zemle [Doklady Earth Sciences]. 2023. V. 508, No. 1. pp. 32–36. In Russian Yudovich Ya.E., Ketris M.P., Rybina N.V. Sostav apatita kak universal'nyy indikator geologicheskikh protsessov [Apatite composition as a universal indicator of geological processes]. Novosibirsk: Svin'in i synov'ya. 2022. 140 p. In Russian

Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I. Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: trace-element compositions and their relationship to host rock type // Journal of Geochemical Exploration. V. 76 (1). 2002. pp. 45–69. https://doi.org/10.1016/S0375-6742(02)00204-2

Doroshkevich A.G., Prokopyev I.R., Ponomarchuk1 A., Savatenkov V. M., Kravchenko A.A., Ivanov A.I., Wohlgemuth-Ueberwasse C. Petrology and geochemistry of the late Mesozoic Dzheltula alkaline igneous complex, Aldan–Stanovoy Shield, Russia: constraints on derivation from the ancient enriched mantle source // International Journal of Earth Sciences. 2020. 109 (7). pp. 2407–2423.

Kogarko L. Chemical Composition and Petrogenetic Implications of Apatite in the Khibiny Apatite-Nepheline Deposits (Kola Peninsula) // Minerals. 2018. V. 8 (532). https://doi.org/10.3390/min8110532

Kruk M.N., Doroshkevich A.G., Prokopyev I.R., Izbrodin I.A. Mineralogy of Phoscorites of the Arbarastakh Complex (Republic of Sakha, Yakutia, Russia) // Minerals. 2021. V. 11. Iss. 6. 23 p.

Marks M.A.W., Schilling J., Coulson I.M., Wenzel T., Markl G. The alkaline peralkaline Tamazeght complex, High Atlas Mountains, Morocco: Mineral chemistry and petrological constraints for derivation from a compositionally heterogeneous mantle source: Journal of Petrology. 2008. V. 49. pp. 1097–1131. https://doi.org/10.1093/petrology/egn019

McDonough W.P., Sun S.S. The composition of the Earth // Chemical Geology. V. 120. 1995. pp. 223-253.

Информация об авторах:

Зубакова Е.А., младший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия. E-mail: zybakovaea@igm.nsc.ru

Дорошкевич А.Г., доктор геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск; ведущий научный сотрудник, Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия.

E-mail: doroshkevich@igm.nsc.ru

Шаргин В.В., доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: sharygin@igm.nsc.ru

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Zubakova E.A., Junior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: zybakovaea@igm.nsc.ru

Doroshkevich A.G., Dr. Sci. (Geol.- Miner.), Head of Laboratory, Laboratory of Ore Bearing of Alkaline Magmatism, Institute of Geology and Mineralogy named after. V.S. Sobolev SB RAS; Leading Researcher, Petrology Laboratory, N.L. Dobretsov Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia.

E-mail: doroshkevich@igm.nsc.ru

Sharygin V.V., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: sharygin@igm.nsc.ru

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 06.06.2024; одобрена после рецензирования 03.08.2024; принята к публикации 27.09.2024

The article was submitted 06.06.2024; approved after reviewing 03.08.2024; accepted for publication 27.09.2024

Научная статья УДК 552.112 doi: 10.17223/25421379/32/6

УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ АПАТИТ-ФЛЮОРИТОВЫХ ПОРОД БУРПАЛИНСКОГО МАССИВА ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ ВО ФЛЮОРИТЕ (СЕВЕРНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ)



Александра Тимофеевна Исакова¹, Анастасия Евгеньевна Старикова², Ксения Игоревна Затолокина³, Иван Александрович Избродин⁴, Анна Геннадьевна Дорошкевич⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

^{1, 2, 4, 5} Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия ⁵ Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия

¹ atnikolaeva@jgm.nsc.ru

² starikova@igm.nsc.ru

³ zatolokina@igm.nsc.ru

⁴ izbrodin@jgm.nsc.ru

12Droain@igm.nsc.ru

⁵ doroshkevich@igm.nsc.ru

Аннотация. Представлены результаты комплексного изучения флюидных включений во флюорите апатит-флюоритовых пород Бурпалинского массива, а также детальный химический состав флюоритов. Приведен минеральный состав первичных флюидных включений: галит (NaCl), нахколит – NaHCO₃, бурбанкит – (Na,Ca)₃(Sr,Ba,Ce)₃(CO₃)₅, сидоренкит – Na₃Mn(PO₄)(CO₃), тенардит – Na₂SO₄ и виллиомит – NaF. Установлено, что апатит-флюоритовые породы образовались при температурах около 600 °C из щелочного сульфатно-хлоридно-фторидного солевого расплава-рассола, имеющие также высокие концентрации H₂O, CO₃⁻² и PO₄⁻³. При кристаллизации флюорита наблюдается общая тенденция понижения концентраций солей в исходном флюиде, законсервированном во включениях: от первичных многофазовых включений (концентрированные) \rightarrow вторичным газово-жидким включениям с 1–2 кристаллическими фазами (низкоконцентрированные) \rightarrow ко вторичным двухфазовым включениям (наиболее низкоконцетрированные). Приведены первые данные хромато-масс-спектрометрического анализа летучих из первичных флюидных включений во флюорите, показывающие присутствие существенной доли (19,6 отн. %) углеводородов в минералообразующей среде. Редкоземельный состав флюоритов позволяет считать эти породы результатом кристаллизации солевых расплавов, которые, по-видимому, представляют собой продукт кристаллизационной дифференциации щелочной магмы, ответственной за образование нефелиновых сиенитов Бурпалинского массива.

Ключевые слова: апатит-флюоритовые породы, многофазовые флюидные включения, флюорит, Бурпалинский массив

Источник финансирования: исследование выполнено в рамках РНФ 22-17-00078, https://rscf.ru/project/22-17-00078/.

Для цитирования: Исакова А.Т., Старикова А.Е., Затолокина К.И., Избродин И.А., Дорошкевич А.Г. Условия образования апатит-флюоритовых пород Бурпалинского массива по данным изучения флюидных включений во флюорите // Геосферные исследования. 2024. № 3. С. 52–64. doi: 10.17223/25421379/32/6

Original article doi: 10.17223/25421379/32/6

FORMATION CONDITIONS OF BURPALA APATITE-FLUORITE ROCKS: THE RESULTS OF FLUORITE-HOSTED FLUID INCLUSION STUDY (NORTHERN BAIKAL REGION)

Aleksandra T. Isakova¹, Anastasiya E. Starikova², Kseniya I. Zatolokina³, Ivan A. Izbrodin⁴, Anna G. Doroshkevich⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia, ^{1, 2, 4, 5} Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

⁵N.L.Dobretsov Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia

¹ atnikolaeva@igm.nsc.ru

² starikova@igm.nsc.ru

³ zatolokina@igm.nsc.ru

⁴ izbrodin@igm.nsc.ru

⁵ doroshkevich@igm.nsc.ru

Abstract. The article presents the results of a comprehensive study of fluid inclusions in the fluorite of apatite-fluorite rocks of the Burpala massif, as well as a detailed chemical composition of fluorite. According to the phase composition at room temperature, two types of fluid inclusions are trapped in fluorite of apatite-fluorite rocks: primary multiphase fluid inclusions with 4-5 daughter crystals and secondary fluid inclusions with 1 or 2 crystals. Among the daughter phases of primary multiphase fluid inclusions, halite (NaCl), nahcolite (NaHCO₃), burbankite ((Na,Ca)₃(Sr,Ba,Ce)₃(CO₃)₅), sidorenkite (Na₃Mn(PO₄)(CO₃)), tenardite (Na₂SO₄), and villiomite (NaF) are found. The composition of primary multiphase fluid inclusions is alkaline sulfate-chloridefluoride salt with high concentrations of H₂O, CO₃⁻², and PO₄⁻³. Secondary fluid inclusions are less concentrated and lower temperature compared to primary ones. At the same time, based on the ice melting temperatures, the salinity of fluid inclusions with 1-2 crystalline phases (12,9-15 wt % NaCl-eq.) is higher than in two-phase fluid inclusions (6,5-7,9 wt % NaCl-eq.), i.e. a general trend to decrease the salt concentrations in the initial fluid preserved in inclusions was observed during fluorite crystallization: from primary multiphase fluid inclusions (concentrated) \rightarrow secondary fluid inclusions with 1–2 crystalline phases (low-concentrated) \rightarrow to secondary two-phase fluid inclusions (the most low-concentrated). In addition, the first data of pyrolysis-free gas chromatographymass spectrometry analysis of volatiles from primary fluid inclusions in fluorite are presented, showing the presence of a significant content (19,6 rel. %) of hydrocarbons in the fluid phase of the salt melt. Thus, apatite-fluorite rocks were formed at temperatures of about 600 °C from an alkaline sulfate-chloride-fluoride salt melt, which also have high concentrations of H_2O , CO_3^{-2} , and PO_4^{-3} . The REE content in fluorites allows us to consider these rocks as the result of crystallization of salt melt, which, apparently, are a product of crystallization differentiation of alkaline melts responsible for the formation of nepheline syenites of the Burpala massif.

Keywords: apatite-fluorite rock, multiphase fluid inclusion, fluorite, Burpala massif

Source of financing: The fluid inclusion study of apatite-fluorite rocks was funded by the Russian Science Foundation, project 22-17-00078, https://rscf.ru/project/22-17-00078/

For citation: : Isakova A.T., Starikova A.E., Zatolokina K.I., Izbrodin I.A., Doroshkevich A.G. (2024) Formation conditions of Burpala apatite-fluorite rocks: the results of fluorite-hosted fluid inclusion study (Northern Baikal region). *Geosfernye issledo-vaniya – Geosphere Research*. 3. pp. 52–64. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/32/6

Введение

Флюоритовая минерализация образуется в широком диапазоне РТ-условий и может быть результатом кристаллизации различных минералообразующих сред, генетически связанных с кислыми магматическими породами и процессами пегматитообразования, щелочными магматическими породами и карбонатитами или с гидротермальными процессами без видимой связи с магматизмом [Richardson, Holland, 1979; Vasyukova, Williams-Jones, 2014; Redina et al., 2021]. Высокое содержание флюорита в природных объектах обычно связывают с гидротермальными и гидротермально-метасоматическими процессами. Отдельно следует отметить флюориты, выявленные в карбонатитах и определенные как продукт магматической кристаллизации (например, Большетагнинское месторождение (Россия) и Мато Прето (Бразилия)) [Рипп и др., 2019].

Также известны случаи, когда флюорит с доказанным магматическим происхождением напрямую не связан с «классическими» карбонатитами, но может указывать на их генетическую связь [Сотникова и др., 2011; Рипп и др., 2019]. Апатит-флюоритовые породы Бурпалинского массива являются довольно необычными образованиями и по ряду признаков схожи с фоскоритами и карбонатитами щелочно-ультраосновных комплексов [Сотникова и др., 2022]. Учитывая рудоносность последних (фосфор, фтор, редкие и редкоземельные элементы и другие полезные ископаемые), нередко достигающую промышленных концентраций, выяснение условий образования апатитфлюоритовых пород Бурпалинского массива, в частности флюорита, представляет особый интерес. Методы изучения включений минералообразующих сред являются главным инструментом в решении такого рода генетических задач. Ранее первичные флюидные включения во флюорите рассматриваемых пород были изучены И.А. Сотниковой и соавт. [Сотникова и др., 2011]. Ими в первую очередь были проведены термометрические исследования первичных включений во флюорите и приведен валовый состав захваченного в зернах флюорита раствора. Они установили, что в составе флюидов преобладают сульфат-ионы, натрий, кальций и стронций.

В данном исследовании нами представлены более детальные данные о минеральном составе первичных включений и в целом о минералообразующей среде, из которой кристаллизовались флюориты. Также в статье рассматривается химический состав флюорита из апатит-флюоритовых пород и дается его сравнение с составами флюоритов из основных типов магматических пород Бурпалинского массива (кварцевых, щелочных и нефелиновых сиенитов). На основании полученных данных решен вопрос об условиях образования апатитфлюоритовых пород и их связи с магматизмом массива.

Методы исследований

Все исследования проводились на базе Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск).

Макрокомпонентный состав флюоритов, а также диагностика кристаллических фаз вскрытых включений были определены с помощью сканирующих электронных микроскопов (СЭМ): TESCAN MIRA 3 LMU, оснащенного системой микроанализа AZtec Energy ХМах-50 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd.), и Jeol JSM-6510, оборудованного системой микроанализа AztecEnergy XMax-80 (Oxford Instruments) (ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН, г. Новосибирск). Параметры съемки: ускоряющее напряжение – 20 кэВ, ток – 1,5 нА. Для количественной оптимизации применялся металлический Со. Микроэлементный состав флюоритов был получен с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой iCAP Qc (Thermo Scientific) и устройством для лазерного пробоотбора NWR 213 ESi, New Wave Research.

Фазовый состав невскрытых флюидных включений был определен с помощью КР-спектроскопии на спектрометре LabRAM HR800 оснащенном оптическим микроскопом Olympus BX41, в качестве источника возбуждения использовался твердотельный лазер с диодной накачкой и длиной волны 532 нм (Torus, Laser Quantum). Для определения спектров минеральных фаз были использованы литературные данные [Frezzotti et al., 2012; Kozlov et al., 2021] и база данных RRUFF (http://rruff.info).

Микротермометрические исследования проводились с использованием микротермокамеры THMSG-600 (Linkam) и высокотемпературной термокамеры ТК-1500 [Осоргин, Томиленко, 1990], совмещенной с поляризационным микроскопом Olympus BX51. Диапазон измерений у микротермокамеры THMSG-600 составляет от -196 до +600 °C, у термокамеры ТК-1500 - от комнатной температуры до +1 400 °С. Первичные многофазовые кристаллофлюидные включения нагревались в термокамере ТК-1500 для определения температур плавления кристаллических фаз и полной гомогенизации. Вторичные газово-жидкие двух-, трехфазовые включения нагревались в микротермокамере THMSG-600 (Linkam) для определения температур общей гомогенизации, эвтектики и плавления льда водных растворов.

Для определения состава газовой составляющей минералообразующего флюида содержащиеся во флюорите индивидуальные первичные кристаллофлюидные включения были проанализированы методом безпиролизной газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС), детально описанном в работе [Бульбак и др., 2020]. Для анализа образцы пробы помещались в специальное устройство, включенное онлайн в газовую схему хроматографа перед аналитической колонкой. Образцы перед анализом прогревались при 130–160 °С в течение 133 мин в токе газа-носителя гелия (чистота гелия составляла 99,9999 %, начальное давление 45 кПа) и затем производилось механическое разрушение образца в онлайн-режиме. Анализ газовой смеси, извлеченной при однократном ударном разрушении образца, выполнен на газовом хромато-масс-спектрометре Focus GC / DSQ II MS (Thermo Scientific). Преимущество этого метода заключается в том, что при пробоподготовке не используются искажающие состав определяемого флюида различные растворители, кислоты и органические вещества.

Геология массива и петрография апатит-флюоритовых пород

Бурпалинский щелочной массив располагается в 100 км к северо-востоку от северной оконечности оз. Байкал на юге центральной части Северо-Байкальского нагорья и входит в состав Северо-Байкальской щелочной провинции [Жидков, 1961]. Массив представляет собой интрузию центрального типа с концентрически зональным строением площадью 200 км² (рис. 1, a). Эндоконтактовая часть его сложена кварцевыми и кварцсодержащими сиенитами, центральная – трахитоидными щелочными и нефелиновыми сиенитами. Жильная фация представлена микроклинитами, гранитами, гранит-аплитами, сиенит-аплитами, гранитными пегматитами. Возраст кристаллизации щелочных и нефелиновых сиенитов составляет 300-294 млн лет, а становление кварцевых сиенитов и пород жильной фации происходило в период 296-289 млн лет [Избродин и др., 2024]. Полученные петролого-геохимические и изотопные данные по массиву свидетельствуют о сингенетичности магм, из которых кристаллизовались нефелиновые, щелочные и кварцевые сиениты, указывая на их происхождение из расплава щелочно-базитового состава [Дорошкевич и др., 2024, в печати]. Среди пород жильной фации в центральной части массива обнаружены тела эвдиалит-содалитовых сиенитов, апатит-флюоритовых пород, а также карбонатная жила, отнесенная к карбонатитам [Сотникова и др., 2022]. Вмещающими породами являются докембрийские-нижнекембрийские песчаники и алевролиты.

Объектами наших исследований явились крупнои среднезернистые апатит-флюоритовые породы, которые слагают дайкоподобное тело мощностью 4–5 м и протяженностью до 150 м [Владыкин и др., 2014] и залегают в зоне флюоритизированных сиенитов (рис. 1, *b*).

Порода, главным образом, состоит из флюорита, апатита и магнетита. Также встречаются биотит, эгирин-авгит, амфибол (феррифторнибёит), титанит, из рудных: Мп-ильменит и сульфиды (халькопирит, галенит, сфалерит и борнит).



Рис. 1. а – Схема геологического строения Бурпалинского массива (по [Пак и др., 1962; Архангельская, 1974]. b – Схема геологического строения южной части рудопроявления 4 по [Пак и др., 1962]

1 – четвертичные отложения; 2 – песчаники и алевролиты холоднинской свиты; 3 – диориты, габбро-диориты, габбро; 4 – мелкозернистые флюоритизированные сиениты; 5 – щелочные граниты и гранит-аплиты; 6 – кварцевые сиениты; 7 – щелочные сиениты; 8 – нефелиновые сиениты; 9 – пегматиты; 10 – апатит-флюоритовые породы; 11 – зоны редкоземельной и редкометальной минерализации и их номер; 12 – роговики, фениты; 13 – разрывные нарушения; 14 – места отбора проб для исследований

Fig. 1. a – The schematic geological map of the Burpala massif according to [Pak et al., 1962; Arkhangelskaya, 1974]; b – The schematic geological structure of southern part of mineralization zone no. 4 according to [Pak et al., 1962]:

1 - Quaternary deposits; 2 - sandstones and siltstones of the Kholodninsk formation; 3 - diorite, gabbro-diorites, gabbro; 4 - fine-grained fluoritized syenite; 5 - alkaline granite and granite-aplite; 6 - quartz syenite; 7 - alkaline syenite; 8 - nepheline syenite; 9 - pegmatite; 10 - apatite-fluorite rock; 11 - zones of rare-earth and rare-metal mineralization and their numbers; 12 - hornfelse, phenite; 13 - tectonic fractures; 14 - sampling location

Результаты исследований

Флюорит в апатит-флюоритовых породах образует крупнозернистый агрегат и, как правило, не имеет окраски. Его содержание достигает 80 об. %. Кроме того, он встречается в виде многочисленных минеральных включений в апатите. Следует отметить, что флюорит – типичный акцессорный минерал как магматических, так и метасоматических пород Бурпалинского массива. В химическом составе флюорита из апатит-флюоритовых пород основным примесным компонентом является стронций (1,2– 1,65 мас. %), содержание которого выше, чем во флюоритах из кварцевых, щелочных и нефелиновых сиенитов (<1 мас. %). Исключения составляют флюориты из низкомагнезиальных разновидностей этих пород (MgO 0,6–0,65 мас. %), для которых отмечаются повышенные концентрации стронция (до 4,45 мас. %) (рис. 2, *a*).

Нормированные на хондрит редкоземельные (REE) спектры флюоритов из апатит-флюоритовых пород имеют крутой наклон (La_n/Yb_n 10–20,5), что отличает их от спектров флюоритов из нефелиновых и щелочных сиенитов, для которых наблюдается деплетирование легкими REE (La_n/Yb_n 3,9–5,45). В то

же время характер REE спектров флюоритов из апатит-флюоритовых пород схож с таковым для флюоритов из низкомагнезиальных нефелиновых сиенитов, но последние существенно обогащены REE. Для всех спектров отмечаются слабая отрицательная Eu (0,66–0,77) и значимая положительная Y (1,9–3,4) аномалии (рис. 2, *b*).

Включения минералообразующих сред во флюорите. Во флюорите апатит-флюоритовых пород было обнаружено два типа флюидных включений: первичные многофазовые кристаллофлюидные включения и вторичные газово-жидкие включения с единичными кристаллическими фазами.





а – бинарная диаграмма Ca vs Sr для флюоритов из нефелиновых сиенитов (Ne-sy), щелочных сиенитов (Alk-sy) (в том числе низкомагнезиальных разновидностей (↓Mg)), кварцевых сиенитов (Qz-sy) и апатит-флюоритовых пород (Ap-Flu); b – нормированные на хондрит по [Sun, McDonough, 1989] редкоземельные спектры для нефелиновых сиенитов и апатит-флюоритовых пород

Fig 2. The variations of fluorite compositions from Burpala rocks:

a – binary Ca vs Sr diagram for fluorites from nepheline syenites (Ne-sy), alkaline syenites (Alk-sy) (including low-magnesian varieties $(\downarrow Mg)$), quartz syenites (Qz-sy) and apatite-fluorite rocks (Ap-Flu); b – chondrite-normalized according to [Sun, McDonough, 1989] rare earth element patterns for nepheline syenites and apatite-fluorite rocks

Первичные многофазовые кристаллофлюидные включения располагаются азонально и чаще всего образуют группы из 3–10 включений, реже встречаются одиночные. Размеры первичных включений варьируют от 5 до 50 мкм, большинство включений имеет размер 10–20 мкм. Наряду с жидкостью и газовым пузырем включения содержат 4–5 разных дочерних кристаллических фаз, причем соотношение между фазами визуально одинаково во всех включениях.

С помощью КР-спектроскопии в первичных включениях были диагностированы следующие дочерние фазы: нахколит – NaHCO₃, бурбанкит – (Na,Ca)₃(Sr,Ba,Ce)₃(CO₃)₅, фасфато-карбонат (сидоренкит – Mn) – Na₃(Fe,Mn,Mg)PO₄CO₃ и тенардит – Na₂SO₄ (рис. 3). Кроме того, во включениях присутствует крупная дочерняя фаза, образующая кристаллы кубического габитуса желтовато-серого цвета, которая не имеет явно выраженного КРспектра и является галитом (NaCl) – минералом с ионной связью. Также в газовом пузыре обнаружен водный пар – H₂O и метан – CH₄. Бурбанкит образует зеленоватую фазу округлой или неправильной формы с оптически высоким рельефом. Тенардит представляет собой пластинчатый кристалл бесцветного цвета с низким рельефом. Фаза фосфато-карбонатного состава имеет зеленый цвет и пластинчатую форму. Диагностированные кристаллические фазы были также подтверждены результатами исследований на СЭМ. Кроме того, были обнаружены дополнительные дочерние фазы, такие как виллиомит – NaF, сильвин – KCl, а также фосфат Na и Mn (рис. 4, a, b). Нам удалось определить состав остаточного раствора первичного флюидного включения, вытекшего непосредственно во время исследований на СЭМ. Согласно картам распределения элементов, в нем были зафиксированы калий, натрий и хлор (рис. 4, с), причем калий и хлор из остаточного раствора образуют сильвин при вскрытии включений.



Рис. 3. Микрофотография в проходящем свете первичного кристаллофлюидного включения во флюорите из апатит-флюоритовых пород Бурпалинского массива и КР-спектры основных дочерних фаз включения и минерала-хозяина (флюорита)

г.ф. – газовая фаза, ж.ф. – жидкая фаза, фаза 1 – неизвестный сульфат, фаза 2 – неизвестный карбонат, Bbn – бурбанкит, Flr – флюорит, Nah – нахколит, Sdo – сидоренкит, Thn – тенардит

Fig. 3. Microphotography of the primary multiphase fluid inclusion in fluorite from Burpala apatite-fluorite rock (in transmitted light) and KR-spectra of the main daughter phases of the fluid inclusion and the host mineral (fluorite)

gas - gas phase, liq - liquid phase, phase 1 - unknown sulfate, phase 2 - unknown carbonate, Bbn - burbankite, Flr - fluorite, Nah - nahcolite, Sdo - sidorenkite, Thn - thenardite



Рис. 4. BSE-изображения первичных кристаллофлюидных включений во флюорите (a, b) и карты распределения (c) элементов остаточного раствора, вытекшего из первичного кристаллофлюидного включения во флюорите

Fig. 4. BSE-images of primary multiphase fluid inclusions in fluorite (a, b) and distribution maps (c) of the elements of the residual solution leaking out the primary multiphase fluid inclusions



Рис. 5. Микрофотографии, отражающие поведение первичного многофазового кристаллофлюидного включения в процессе микротермометрического эксперимента

Fig. 5. Micrographs reflecting the behavior of a primary multiphase fluid inclusion during the heating experiment

Микротермометрические эксперименты (см. рис. 5) первичных включений показали, что температура их гомогенизации составляет 595–620 °С. Температура растворения газового пузырька в растворе происходит при 180–200 °С. Температура плавления карбонато-фосфатов – около 380 °С, тенардита – 410– 440 °С, галита – около 470–550 °С, а последняя кристаллическая фаза бурбанкит плавится при температурах полной гомогенизации – 595–620 °С.

Согласно результату ГХ-МС (таблица), Н₂О, углеводороды и СО2 являются основными соединениями в составе летучих первичных кристаллофлюидных включений, при этом H₂O существенно преобладает. Доля H₂O во включениях составляет 50,9 отн. %, углеводородов - 19,6 отн. %, CO₂ - 17,6 отн. %, а доля остальных соединений – 11,9 отн. %. В составе последних встречаются азот-, серо-, галоген- и фософорсодержащие соединения, причем количество серосодержащие соединений (9,63 отн. %) преобладает (рис. 6, а, таблица). Среди УВ в газовой фазе преобладают кислородсодержащие (16,91 отн. %) УВ (спирты, эфиры простые и сложные, альдегиды, кетоны и карбоновые кислоты) (рис. 6, b, c), а алифатические и циклические в подчиненном количестве. Происхождение углеводородных газов в щелочных породах объясняется исследователями либо абиогенным синтезом в щелочном расплаве до или в процессе магматической кристаллизации, либо ассимиляцией магмой и последующего преобразования органического вещества осадочных толщ или поздней миграцией углеводородов из вмещающих толщ [Нивин и др., 2003].

Вторичные флюидные включения образуют цепочки и сетки и приурочены к залеченным трещинам. Их размеры колеблются от первых микрон до 10–20 мкм. Они содержат жидкость, газовый пузырек, иногда призматическую, изометричную или игольчатую кристаллическую фазу. Согласно результатам КР-спектроскопии (см. рис. 7), кристаллические фазы представлены бурбанкитом, стронцианитом и целестином, а в растворе были обнаружены сульфат- и карбонат-ионы, диагностируемые пики которых описаны в работе [Frezotti et al., 2012].

Результаты криотермометрии вторичных включений показали, что достичь гомогенизации содержимого трех-, четырехфазовых флюидных включений с 1–2 кристаллическими фазами не удалось, температура исчезновения газового пузырька – 187– 215 °C. При этом кристаллическая фаза не растворяется при повышении температуры, что, вероятно, может быть связано с постзахватным процессом расшнурования.

Содержание летучих компонентов, извлечённых из первичных флюидных включений при ударном разрушении флюоритов из апатит-флюоритовой породы Бурпалинского массива (по данным ГХ-МС-анализа), отн. %

Composition of volatiles released from primary fluid inclusions during mechanical shock destruction of fluorite from Burpala apatite-fluorite rock (GC-MS analysis), relative %

Компонент	Номинальная масса	Флюорит
Алифатические УВ:		1,520
Парафины (CH ₄ -C ₁₇ H ₃₆)	16-240	0,845
Олефины (C ₂ H ₂ -C ₁₇ H ₃₄)	26-238	0,675
Циклические УВ:		0,752
Циклоалканы и циклоалкены (C ₆ H ₁₀ -C ₁₁ H ₂₂)	82–154	0,038
Арены (С6H6-С15H24)	78-204	0,582
Полициклические ароматические УВ (С10Н8-С14Н10)	128-178	0,132
Гетероциклические соединения:		0,356
Диоксаны (C4H8O2-C7H14O2), диоксины и фураны (C4H4O-C17H30O)	68-250	0,356
Кислородсодержащие углеводороды:		16,690
Спирты и эфиры (CH4O-C13H8ClFO2)	32-250	6,621
Альдегиды (CH ₂ O-C ₁₅ H ₃₀ O)	30-226	2,282
Кетоны (C ₃ H ₆ O-C ₁₅ H ₃₀ O)	58-226	3,074
Карбоксильные кислоты (CH2O2-C14H28O2)	46-228	4,713
Азотсодержащие соединения (N2-C11H23NO)	28-185	2,217
Серосодержащие соединения (H ₂ S-C ₁₄ H ₂₄ S)	34–224	9,632
Галогенсодержащие соединения (C ₆ H ₁₃ Cl-C ₁₃ H ₈ ClFO ₂)	120-250	0,263
Фосфорсодержащие соединения (C ₆ H ₁₄ FO ₂ P-C ₁₂ H ₂₇ O ₄ P)	168-266	0,072
CO ₂	44	17,573
H ₂ O	18	50,926
H/H+O		0,72



Рис. 6. Относительные содержания углеводородов, CO₂, H₂O, а также серо-, азоти галогенсодержащих соединений в газовой фазе первичных кристаллофлюидных включений во флюорите апатит-флюоритовой породы Бурпалинского массива, %

а – круговая диаграмма распределения летучих компонентов; b – гистограмма распределения углеводородов; с – гистограмма распределения кислородсодержащих углеводородов

Fig. 6. Relative content of hydrocarbons, carbon dioxide, water and nitrogenated, sulfonated, and halogenated compounds in primary fluid inclusions in fluorite obtained in the Burpala apatite-fluorite rock, % a – pie chart of the distribution of volatile components; b – histogram of the distribution of hydrocarbons; c – histogram of the distribution of oxygenated hydrocarbons



Рис. 7. Микрофотографии в проходящем свете вторичных флюидных включений во флюорите из апатит-флюоритовых пород Бурпалинского массива и КР-спектры жидкой и кристаллических фаз включений и минерала-хозяина (флюорита)

Условные обозначения: Bbn - бурбанкит, Clt - целестин, Flr - флюорит, Str - стронцианит, г.ф. - газовая фаза, ж.ф. - жидкая фаза

Fig. 7. Microphotography of the secondary fluid inclusions in fluorite from Burpala apatite-fluorite rock (in transmitted light) and and KR-spectra of liquid and crystalline phases of inclusions and the host mineral (fluorite)

Abbreviations: Bbn – burbankite, Clt – celestine, Flr – fluorite, Str – strontianite, $r.\phi$. – gas phase, $w.\phi$. – liquid phase

Температура плавления льда в этих включениях наблюдается при –11...–9 °С, в системе NaCl–H₂O солёность раствора 12,9–15 мас. %. Температура эвтектики составляет –37...–36 °С. Температура гомогенизации вторичных двухфазовых флюидных включений (Ж_{H2O} > Г) варьирует от 141 до 149 °С при гомогенизации в жидкость. Температура плавления льда в таких включениях составляет –5...–4 °С, в системе NaCl–H₂O солёность раствора 6,5–7,9 мас. %. Т_{эвт} = –37,5...–36,5 °С.

Обсуждение результатов и заключение

Состав флюоритов чувствителен к условиям образования и составу минералообразующих сред, что делает его возможным источником информации о параметрах кристаллизации и генетических особенностях пород. Было показано, что во флюоритах часто основным механизмом фракционирования REE и Y являются не структурные характеристики, а образование комплексов REE с ионами F [Xu et al., 2012]. При этом устойчивость YF²⁺ выше, чем REEF²⁺, что обусловливает возникновение положительной Y аномалии.

Также было отмечено, что при более высоких температурах (>250 °C) LREEF²⁺ комплексы существенно доминируют над HREEF²⁺, а с понижением температуры их устойчивость падает. Во всех исследованных флюоритах Бурпалинского массива наблюдается положительная Y аномалия, указывающая на то, что механизм комплексообразования внес существенный вклад в фракционирование REE во флюоритах. Резкое преобладание LREE над остальными во флюоритах из апатит-флюоритовых пород свидетельствует о высоких температурах их образования.

В то же время причиной обеднения LREE флюоритов из нефелиновых сиенитов может быть не температура, а последовательность кристаллизации минералов, концентрирующих REE. Например, кристаллизация фторапатита, содержание которого в этих породах достигает 1 об. %, а концентрация LREE в нем варьирует от 1,4 до 6,94 мас. % при содержании других REE < 0,16 мас. % [Старикова и др., 2023], приведет к существенному деплетированию LREE остаточного расплава. Флюориты из апатитфлюоритовых пород, вероятно, кристаллизовались до апатита, что подтверждается наличием минеральных включений флюорита в апатите.

Состав первичных многофазовых включений во флюорите апатит-флюоритовых пород отражает состав минералообразующей среды на начальной стадии кристаллизации флюорита. Об этом свидетельствуют высокие температуры гомогенизации первичных включений – 595–620 °С, которые оказались выше, чем полученные ранее (520–560 °С) [Сотникова и др., 2011]. Присутствие галита, тенардита, нахколита, Fe-Mn-фосфато-карбоната, бурбанкита, виллиомита, щелочного фосфата в составе первичных многофазовых флюидных включений во флюорите свидетельствует о том, что минералообразующая среда является щелочным сульфатно-хлоридно-фторидным солевым расплав-рассолом, обогащенным H_2O , CO_3^{-2} , PO_4^{-3} , Ca, Mn, Sr, Fe и LREE. При этом кальций полностью расходуется на образование флюорита, чем объясняется полное отсутствие кальциевых фаз среди дочерних.

Близкий набор минеральных фаз вторичных включений с дочерними фазами в первичных многофазовых включениях, а также близкие температуры эвтектики у вторичных включений свидетельствуют о едином составе водно-солевой системы, отличались лишь концентрации солей. Таким образом, состав вторичных газово-жидких включений может характеризовать состав флюидов на поздних стадиях кристаллизации апатит-флюоритовых пород. По сравнению с первичными многофазовыми включениями вторичные флюидные включения являются менее концентрированными и более низкотемпературными. При этом, судя по температурам плавления льда, соленость флюидных включений с 1-2 кристаллическими фазами (12,9-15 мас. % NaCl-экв) выше, чем в двухфазовых флюидных включениях (6,5-7.9 мас. % NaCl-экв), т.е. наблюдается общая тенденция понижения концентраций солей в исходном флюиде, законсервированном во включениях: от первичных многофазовых включений (концентрированные) → ко вторичным газово-жидким включениям с 1-2 кристаллическими фазами (низкоконцентрированные) → ко вторичным двухфазовым включениям (наиболее низкоконцетрированные).

Для реконструкции окислительно-восстановительных условий минералообразования используются отношения CO₂/(CO₂+H₂O) и H/(H+O). По данным ГХ-МС, отношение CO₂/(CO₂+H₂O) составляет 0,26 и H/(H+O) – 0,72, что говорит о восстановительных условиях. Наличие CH₄ в газовой фазе также подтверждает этот факт.

Существует несколько гипотез о происхождении апатит-флюоритовых пород Бурпалинского массива. Первоначально для них был предложен низкотемпературный гидротермальный генезис [Жидков, 1961], что не согласуется с высокими температурами гомогенизации включений. Также было сделано предположение об их пневматолитово-гидротермальном (пегматитовом) происхождении [Портнов, 1965]. Исследования И.А. Сотниковой и соавт. [2011, 2022] выявили сходство этих пород с карбонатитами или фоскоритами щелочно-карбонатитовых комплексов. Одним из вероятных механизмов происхождения фоскоритов является жидкостная несмесимость между силикатным и фосфатно-карбонатным расплавом [Расс и др., 2020]. В то же время карбонатиты могут быть как продуктом силикатно-карбонатной несмесимости, так и кристаллизационной дифференциации щелочного расплава без ликвационных явлений [Veksler et al., 1998]. Последний процесс схож с таковым для пегматитообразования, при котором происходит накопление летучих в остаточном расплаве.

В природных объектах были выявлены лишь единичные свидетельства силикатно-фторидной несме-[Перетяжко, симости Савина, 2010a, 20106; Vasyukova, Williams-Jones, 2014]. Однако она была получена в ряде экспериментальных работ, касающихся в том числе щелочных недосыщенных кремнеземом систем [Граменицкий, Щекина, 2005; Veksler et al., 2005]. В этих работах было показано изменение отношений различных REE между собой в силикатном и фторидном расплаве по сравнению с первоначальным расплавом: появление тетрад-эффектов и обогащение промежуточными REE силикатного расплава. Фракционирование REE во флюоритах из апатит-флюоритовых пород не показывает существенных отличий от такового для флюоритов из нефелиновых сиенитов Бурпалинского массива, что делает маловероятным явления ликвации при их образовании. Таким образом, апатит-флюоритовые породы, скорее всего, являются остаточным продуктом кристаллизационной дифференциации щелочной магмы, обогащенной летучими компонентами. Последние геохимические и геохронологические исследования выявили пульсационный характер внедрения различных фаз Бурпалинского массива [Избродин и др., 2024; Дорошкевич и др., 2024, в печати]. Судя по геологическому строению массива (см. рис. 1), материнским расплавом для апатит-флюоритовых пород мог быть расплав, ответственный за образование нефелиновых сиенитов массива.

Подводя итог, можно сказать, что апатит-флюоритовые породы образовались при температурах около 600 °C из щелочного сульфатно-хлоридно-фторидного солевого расплава-рассола, который, вероятно, был продуктом дифференциации исходного щелочного расплава, ответственного за образование нефелиновых сиенитов Бурпалинского массива.

Список источников

Архангельская В.В. Редкометальные щелочные комплексы южного края Сибирской платформы. М. : Недра, 1974. 128 с. Бульбак Т.А., Томиленко А.А., Гибшер Н.А., Сазонов А.М., Шапаренко Е.О., Рябуха М.А., Хоменко М.О., Сильянов С.А., Некрасова Н.А. Углеводороды во флюидных включениях из самородного золота, пирита и кварца месторождения Советское (Енисейский кряж, Россия) по данным беспиролизной газовой хромато-масс-спектрометрии // Геология и геофизика. 2020. Т. 61, № 11. С. 1535–1560. Владыкин Н.В., Сотникова И.А., Котов А.Б., Ярмолюк В.В., Сальникова Е.Б., Яковлева С.З. Строение, возраст и рудоносность Бурпалинского редкометального щелочного массива (Северное Прибайкалье) // Геология рудных месторождений. 2014. Т. 56, № 4. С. 272–290. doi: 10.7868/S0016777014040066

Граменицкий Е.Н., Щекина Т.И. Поведение редкоземельных элементов и иттрия на заключительных этапах дифференциации фторсодержащих магм // Геохимия. 2005. Т. 1. С. 45–59.

Жидков А.Я. Новая Северо-Байкальская щелочная провинция и некоторые черты нефелиноносности ее пород // Доклады АН СССР. 1961. Т. 140, № 1. С. 181–184.

Дорошкевич А.Г., Саватенков В.М., Малютина А.В., Избродин И.А., Прокопьев И.Р., Старикова А.Е., Радомская Т.А. Петрогенезис и источники вещества пород щелочного редкометального массива Бурпала (Северное Прибайкалье) // Петрология. 2024. (в печати)

Избродин И.А., Дорошкевич А.Г., Малютина А.В., Семенова Д.В., Радомская Т.А., Крук М.Н., Прокопьев И.Р., Старикова А.Е., Рампилов М.О. Геохронология пород щелочного массива Бурпала (Северное Прибайкалье): новые U-Pb данные // Геодинамика и тектонофизика. 2024. Т. 15 (1). 0741. doi: 10.5800/GT-2024-15-1-0741

Нивин В.А., Коноплева Н.Г., Treloar P., Икорский С.В. Формы нахождения, взаимосвязь и проблемы происхождения углеродистых соединений в породах Хибинского щелочного массива // Плюмы и проблема глубинных источников щелочного магматизма. 2003. С. 126–143.

Осоргин Н.Ю., Томиленко А.А. Микротермокамера. Авт. свидетельство № 1562816 СССР от 17.05.1990.

Пак А.С., Миков Н.А., Бушуев В.П., Михалев Д.Ф., Токарь Н.В., Юдовский А.Г. Отчет о результатах геолого-поисковых работ Сольской партии за 1960–1961 гг. в бассейне р. Майгунда. Улан-Удэ, 1962а. 213 с.

Перетяжко И.С., Савина Е.А. Тетрад эффекты в редкоземельных спектрах гранитоидных пород – следствие процессов жидкостной несмесимости в богатых фтором силикатных расплавах // ДАН. 2010а. Т. 433, № 4. С. 524–529.

Перетяжко И.С., Савина Е.А. Флюидно-магматические процессы при образовании пород массива онгонитов Ары-Булак (Восточное Забайкалье) // Геология и геофизика. 2010б. Т. 51, № 10. С. 1423–1442.

Портнов А.М. Редкометалльная минерализация щелочного массива Бурпала в Северном Прибайкалье : автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. М., 1965. 12 с.

Расс И.Т., Петренко Д.Б., Ковальчук Е.В., Якушев А.И. Фоскориты и карбонатиты: взаимоотношения, возможные петрогенетические процессы и исходная магма (массив Ковдор, Кольский п-ов) // Геохимия. 2020. Т. 65, № 7. С. 627–653.

Рипп Г.С., Прокопьев И.Р., Избродин И.А., Ласточкин Е.И., Рампилов М.О., Дорошкевич А.Г., Редина А.А., Посохов В.Ф., Савченко А.А., Хромова Е.А. Бастнезит-флюоритовые породы Улан-Удэнского проявления (минеральный состав, геохимические особенности, проблемы генезиса) // Геология и геофизика. 2019. Т. 12. С. 1754–1774.

Сотникова И.А., Прокофьев В.Ю., Владыкин Н.В. Генезис апатит-флюоритовых пород массива Бурпала // ДАН. 2011. Т. 441, № 5. С. 682–684.

Сотникова И.А., Алымова Н.В., Щербаков Ю.Д. Минералого-геохимические особенности апатит-флюоритовых пород Бурпалинского массива (Северное Прибайкалье) // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13, № 4. Ст. 0657. doi: 10.5800/GT-2022-13-4-0657

Старикова А.Е., Избродин И.А., Дорошкевич А.Г., Исакова А.Т., Малютина А.В. Состав апатита и флюорита из пород щелочного массива Бурпала, Северное Прибайкалье // Щелочной и кимберлитовый магматизм Земли и связанные с ним месторождения стратегических металлов и алмазов. Сборник статей Всероссийской научной конференции (11–15 сентября, 2023 г.). Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2023. С. 384–388.

Frezzotti M.L., Tecce F., Casagli A. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis // Journal of Geochemical Exploration. 2012. V. 112. P. 1–20. doi: 10.1016/j.gexplo.2011.09.009

Kozlov E.N., Fomina E.N., Bocharov V.N., Sidorov M.Yu., Vlasenko N.S., Shilovskikh V.V. Raman spectroscopic study of the natural carbonophosphates Na₃MCO₃PO₄ (*M* is Mn, Fe, and Mg) // European Journal of Mineralogy. 2021. V. 33. P. 283–297. doi: 10.5194/ejm-33-283-2021

Redina A.A., Doroshkevich A.G., Veksler I.V., Wohlgemuth-Ueberwasser C.C. Fluorite Mineralization Related to Carbonatitic Magmatism in the Western Transbaikalia: Insights from Fluid Inclusions and Trace Element Composition // Minerals. 2021. V. 11 (11). Article 1183. doi: 10.3390/min11111183

Richardson C.K., Holland H.D. Fluorite deposition in hydrothermal systems // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1979. V. 43(8). P. 1327–1335. doi: 10.1016/0016-7037(79)90122-4

Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Geol. Soc. Lond. Spec. Publ. 1989. V. 42. P. 313–345.

Vasyukova O., Williams-Jones A.E. Fluoride-silicate melt immiscibility and its role in REE ore formation: Evidence from the Strange Lake rare metal deposit, Que'bec-Labrador, Canada // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2014. V. 139. P. 110–130.

Veksler I.V., Nielsen T.F.D., Sokolov S.V. Mineralogy of crystallized melt inclusions from Gardiner and Kovdor ultramafic alkaline complexes: implications for carbonatite genesis // Journal of Petrology. 1998. V. 39 (11–12). P. 2015–2031. doi: 10.1093/petroj/39.11-12.2015

Veksler I.V., Dorfman A.M., Kamenetsky M., Dulski P., Dingwell D.B. Partitioning of lanthanides and Y between immiscible silicate and fluoride melts, fluorite and cryolite and the origin of the lanthanide tetrad effect in igneous rocks // Geochim. Cosmochim. Acta, 2005. V. 69. P. 2847–2860. doi: 10.1016/j.gca.2004.08.007

Xu Ch., Taylor R.N., Li W., Kynicky J., Chakhmouradian A.R., Song W. Comparison of fluorite geochemistry from REE deposits in the Panxi region and Bayan Obo, China // Journal of Asian Earth Sciences. 2012. V. 57. P. 76–89. doi: 10.1016/j.jseaes.2012.06.007

References

Arkhangelskaya V.V. Redkometal'nye chshelochnye kompleksy yuzhnogo kraya Sibirskoy platformy [Rare-Metal Alkaline Complexes of the Southern Margin of the Siberian Platform]. Moscow: Nedra. 1974. 128 p. In Russian

Bul'bak T.A., Tomilenko A.A., Gibsher N.A., Sazonov A.M., Shaparenko E.O., Ryabukha M.A., Khomenko M.O., Sil'yanov S.A., Nekrasova N.A. Hydrocarbons in fluid inclusions from native gold, pyrite, and quartz of the Sovetskoe Deposit (Yenisei Ridge, Russia) according to pyrolysis-free gas chromatography-mass spectrometry data // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2020. 61(11). pp. 1535–1560. In Russian

Vladykin N.V., Sotnikova I.A., Kotov A.B., Sal'nikova E.B., Yakovleva S.Z., Yarmolyuk V.V. Structure, age, and ore potential of the Burpala rare-metal alkaline massif, northern Baikal region // *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology of Ore Deposits]. 2014. 56(4). pp. 272–290. https://doi.org/10.7868/S0016777014040066. In Russian

Gramenitskii, E.N., Shchekina T.I. Behavior of rare earth elements and yttrium during the final differentiation stages of flourinebearing magmas // *Geokhimiya* [Geochemistry International]. 2005. 43(1). pp. 45–59. In Russian

Zhidkov A.Ya. NovayaSevero-Baikal'skaya chshelochnaya provinsiya I nekotorye cherty nephelinosnosti porod [New Northern Baikal Alkaline Province and Some Features of Nepheline Content in Rocks] // Doklady of the USSR Academy of Sciences. 1961. 140(1). pp. 181–184. In Russian

Doroshkevich A.G., Savatenkov V.M., Malyutina A.V., Izbrodin I.A., Prokopev I.R., Starikova A.E., Radomskaya T.A. *Petrogenezis i istochniki veshchestva porod chshelochnogo redkometal'nogo massiva Burpala (Severnoe Pribaikal'e)* [Petrogenesis and sources of matter of rocks of the Burpala alkaline rare-metal massif (Northern Baikal region)] // Petrology, 2024, *in press*.

Izbrodin I.A., Doroshkevich A.G., Malyutina A.V., Semenova D.V, Radomskaya T.A., Kruk M.N., Prokopyev I.R., Starikova A.E., Rampilov M.O. Geochronology of Alkaline Rocks from the Burpala Massif (Northern Pribaikalye): New U-Pb Data // Geodynamics & Tectonophysics. 2024. 15 (1). pp. 0741. In Russian. https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-1-0741

Nivin V.A., Konopleva N.G., Treloar P., Ikorskiy S.V. Formy nakhozhdeniya, vzaimosvyaz' i problemy proiskhozhdeniya uglerodistykh soedineniy v porodakh Khibinskogo chshelochnogo massiva [The forms of finding, corraletion and problems of the origin of carbonaceous compounds in rocks of the Khibiny alkaline massif]. Plumy i problem glubinnykh istochnikov chshelochnogo magmatizma – Plumes and the problem of deep sources of alkaline magmatism. 2003. pp. 126–143. In Russian

Osorgin N.Yu., Tomilenko A.A. *Mikrotermokamera* [Microthermostage], USSR Inventor Certificate No. 1562816. 1990. In Russian Pak A.S., Mikov N.A. Bushuev V.P., Mikhalev D.F., Tokar N.V., Yudovskiy A.G. *Otchet o rezul'tatakh geologo-poiskovykh rabot Sol'skoy partii za 1960-1961 gg. v basseine r. Maigunda* [Report on the results of geological exploration work of the Sol'skaya Party for 1960–1961 in the basin of the Maigunda River]. Ulan-Ude. 1962. 213 p. In Russian

Peretyazhko I.S., Savina E.A. Tetrad-effects in REE pattern of granitoid rocks: the result of liquid immiscibility in fluorine-rich silicate melts // DAN [Doklady Earth Sciences]. 2010a. 433(2). pp. 524–529. In Russian

Peretyazhko I.S., Savina E.A. Fluid and magmatic processes in the formation of the Ary-Bulak ongonite massif (eastern Transbaikalia) // Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]. 2010b. 51(10). pp. 1423–1442. In Russian

Portnov A.M. Redometall'naya mineralizatsiya chshelochnogo massiva Burpala v Severnom Pribaikal'e [Rare metal mineralization of the Burpala alkaline massif in the Northern Baikal region]. Brief PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Moscow, 1965. 12 p. In Russian

Rass I.T., Petrenko D.B., Koval'chuk E.V., Yakushev A.I. Phoscorites and carbonatites: relations, possible petrogenetic processes, and parental magma, with reference to the Kovdor Massif, Kola Peninsula // *Geokhimiya* [Geochemistry International]. 2020. 58(7). pp. 1754–1774. In Russian

Ripp G.S., Prokopev I.R., Izbrodin I.A., Lastochkin E.I., Rampilov M.O., Doroshkevich A.G., Redina A.A., Posokhov V.F., Savchenko A.A., Khromova E.A. Bastnaesite and fluorite rocks of the Ulan-Ude occurrence (mineral composition, geochemical characteristics, and genesis issues) // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. V. 60(12). 2019. pp. 1404–1424.

Sotnikova I.A., Prokofiev V.Y., Vladykin N.V. Genesis of apatite-fluorite rock in the Burpala pluton // DAN [Doklady Earth Sciences]. 2011. 441(2). pp. 682–684.

Sotnikova I.A., Alymova N.V., Scherbakov Yu.D. Mineralogical and Geochemical Features of Apatite-Fluorite Rocks of the Burpala Massif in the Northern Baikal Region // Geodynamics & Tectonophysics. 2022. 13 (4). Article 0657. In Russian https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-4-0657

Starikova A.E., Izbrodin I.A., Doroshkevich A.G., Isakova A.T., Malyutina A.V. (2023) *Sostav apatita i fluorita iz porod chshelochnogo massiva Burpala, Severnoe Pribaikal'e* [The composition of apatite and fluorite from the rocks of the Burpala alkaline massif, Northern Baikal region]. Proceedings of All-Russian Scientific Conference "Alkaline and kimberlite magnatism of the Earth and associated strategic metal deposits and diamonds" (11–15th of September 2023). Apatity: FRC KSC RAN. pp. 384–388. In Russian

Frezzotti M.L., Tecce F., Casagli A. (2012) Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis // Journal of Geochemical Exploration. 112. pp. 1–20. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.09.009

Kozlov E.N., Fomina E.N., Bocharov V.N., Sidorov M.Yu., Vlasenko N.S., Shilovskikh V.V. (2021) Raman spectroscopic study of the natural carbonophosphates Na₃*M*CO₃PO₄ (*M* is Mn, Fe, and Mg) // European Journal of Mineralogy. 33. pp. 283–297. https://doi.org/10.5194/ejm-33-283-2021

Redina A.A., Doroshkevich A.G., Veksler I.V., Wohlgemuth-Ueberwasser C.C. Fluorite Mineralization Related to Carbonatitic Magmatism in the Western Transbaikalia: Insights from Fluid Inclusions and Trace Element Composition. Minerals. 2021. 11 (11). Article 1183. https://doi.org/10.3390/min11111183

Richardson C.K., Holland H.D. Fluorite deposition in hydrothermal systems. Geochimica et Cosmochimica Acta.1979. 43(8). pp. 1327–1335. https://doi:10.1016/0016-7037(79)90122-4

Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geol. Soc. Lond. Spec. 1989. Publ. 42. pp. 313–345.

Vasyukova O., Williams-Jones A.E. Fluoride-silicate melt immiscibility and its role in REE ore formation: evidence from the Strange Lake rare metal deposit, Que'bec-Labrador, Canada // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2014. 139. pp. 110–130. https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.04.031

Veksler I.V., Nielsen T.F.D., Sokolov S.V. Mineralogy of crystallized melt inclusions from Gardiner and Kovdor ultramafic alkaline complexes: implications for carbonatite genesis // Journal of Petrology. 1998. 39(11–12). pp. 2015–2031. https://doi.org/10.1093/petroj/39.11-12.2015

Veksler I.V., Dorfman A.M., Kamenetsky M., Dulski P., Dingwell D.B. Partitioning of lanthanides and Y between immiscible silicate and fluoride melts, fluorite and cryolite and the origin of the lanthanide tetrad effect in igneous rocks // Geochim. Cosmochim. Acta. 2005. 69(11). pp. 2847–2860. https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.08.007

Xu Ch., Taylor R.N., Li W., Kynicky J., Chakhmouradian A.R., Song W. Comparison of fluorite geochemistry from REE deposits in the Panxi region and Bayan Obo, China // Journal of Asian Earth Sciences, 2012. 57, pp. 76–89. http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.06.007

Информация об авторах:

Исакова А.Т., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия; младший научный сотрудник Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия.

E-mail: atnikolaeva@igm.nsc.ru

Старикова А.Е., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия; научный сотрудник Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия. E-mail: starikova@igm.nsc.ru

Затолокина К.И., младший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: zatolokina@igm.nsc.ru

Избродин И.А., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия; младший научный сотрудник Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия.

E-mail: izbrodin@igm.nsc.ru

Дорошкевич А.Г., доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия; научный сотрудник, Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия.

E-mail: doroshkevich@igm.nsc.ru

Вклад авторов:

Исакова А.Т., изучения флюидных включений, написание исходного текста, итоговые выводы.

Старикова А.Е., научное руководство; изучение состава флюоритов, написание исходного текста, итоговые выводы. Затолокина К.И., ГХ-МС анализ флюидных включений во флюоритах.

Избродин И.А., полевые исследования на массиве и отбор образцов, итоговые выводы.

Дорошкевич А.Г. научное руководство; полевые исследования на массиве и отбор образцов, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Isakova A.T., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia; Junior researcher, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia.

E-mail: atnikolaeva@igm.nsc.ru

Starikova A.E., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia; Researcher Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia.

E-mail: starikova@igm.nsc.ru

Zatolokina K.I., Junior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: zatolokina@igm.nsc.ru

Izbrodin I.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia; junior researcher Novosibirsk state university, Novosibirsk, Russia.

E-mail: izbrodin@igm.nsc.ru

Doroshkevich A.G., Dr. Sci. (Geol.- Miner.), Head of Laboratory, Laboratory of Ore Bearing of Alkaline Magmatism, Institute of Geology and Mineralogy named after. V.S. Sobolev SB RAS; Leading Researcher, Petrology Laboratory, N.L. Dobretsov Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia.

E-mail: doroshkevich@igm.nsc.ru

Contribution of the authors:

Isakova A.T., fluid inclusion study, writing the draft, final conclusions.

Starikova A.E., scientific management; fluorite composition investigation, writing the draft, final conclusions.

Zatolokina K.I., GC-MS analysis of fluid inclusion from fluorite.

Izbrodin I.A., field investigations on the massif and rock sampling, final conclusions.

Doroshkevich A.G., scientific management; field investigations on the massif and rock sampling, final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.05.2024; одобрена после рецензирования 03.08.2024; принята к публикации 27.09.2024

The article was submitted 30.05.2024; approved after reviewing 03.08.2024; accepted for publication 27.09.2024

Научная статья УДК 552.11 doi: 10.17223/25421379/32/7

ТИТАНОМАГНЕТИТ-КАЛЬЦИТОВЫЕ СРАСТАНИЯ В АЙЛЛИКИТЕ ТРУБКИ ЮЖНОЙ, ВОСТОЧНАЯ СИБИРЬ: СОСТАВ МИНЕРАЛОВ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ



Валентина Борисовна Савельева¹, Юлия Владимировна Данилова², Екатерина Петровна Базарова³, Борис Станиславович Данилов⁴, Елена Александровна Хромова⁵

^{1, 2, 3, 4} Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

⁵ Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия

¹vsavel@crust.irk.ru

² jdan@crust.irk.ru

³ bazarova@crust.irk.ru

⁴ boris@crust.irk.ru

⁵ lena.khromova.00@mail.ru

Аннотация. В основной массе айлликита, прорывающего эксплозивную брекчию трубки взрыва Южная в Урикско-Ийском грабене (Восточная Сибирь), обнаружены обособления, сложенные срастаниями титаномагнетита и кальцита. Наиболее крупное обособление имеет величину около 1 см. В титаномагнетите ($Mag_{59-78}Usp_{20-36}Sp_2$) отмечаются мелкие вростки ильменита ($IIm_{71.7}Gk_{16.3}Pph_{8.8}Hem_{3.2}$). Срастания представляют собой продукты совместной кристаллизации из айлликитового расплава титаномагнетита и кальцита. Кристаллизация срастаний происходила в температурном интервале от 900 до 760 °C и $fO_2 \sim 10^{-15.5}$ и привела к обеднению остаточного расплава железом и титаном. Предполагается, что обилие титаномагнетита в лампрофире трубки Южной связано с резким изменением окислительных условий кристаллизации, вызванным захватом айлликитовым расплавом ксенолитов сланцев верхней коры.

Ключевые слова: айлликиты, титаномагнетит, зиминский комплекс, Урикско-Ийский грабен

Источник финансирования: работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект 23-17-00196. При выполнении работы задействовалось оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН в рамках гранта № 075-15-2021-682. Изучение химического состава минералов выполнено в рамках государственного задания ГИН СО РАН по проекту АААА-А21-121011390002-2.

Благодарности: авторы выражают признательность рецензенту за высказанные им критические замечания, послужившие переосмыслению фактического материала.

Для цитирования: Савельева В.Б., Данилова Ю.В., Базарова Е.П., Данилов Б.С., Хромова Е.А. Титаномагнетит-кальцитовые срастания в айлликите трубки Южной, Восточная Сибирь: состав минералов и условия образования // Геосферные исследования. 2024. № 3. С. 65–76. doi: 10.17223/25421379/32/7

Original article doi: 10.17223/25421379/32/7

TITANOMAGNETITE-CALCITE INTERGROWTHS IN AILLIKITE OF THE YUZHNAYA PIPE, EASTERN SIBERIA: COMPOSITION OF MINERALS AND CONDITIONS OF FORMATION

Valentina B. Savelyeva¹, Yulia V. Danilova², Ekaterina P. Bazarova³, Boris S. Danilov⁴, Elena A. Khromova⁵

^{1, 2, 3, 4} Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

⁵N.L. Dobretsov Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia

¹vsavel@crust.irk.ru

² jdan@crust.irk.ru

³bazarova@crust.irk.ru

⁴ boris@crust.irk.ru

⁵ lena.khromova.00@mail.ru

Abstract. In the groundmass of aillikite, which breaks through the explosive breccia of the Yuzhnaya explosion pipe in the Urik-Iya graben (Eastern Siberia), segregations composed of intergrowths of titanomagnetite and calcite were discovered. The largest segregation is about 1 cm in size. Small ingrowths of ilmenite ($IIm_{71.7}Gk_{16.3}Pph_{8.8}Hem_{3.2}$) are noted in titanomagnetite

(Mag₅₉₋₇₈Usp₂₀₋₃₆Sp₂). The intergrowths are products of joint crystallization of titanomagnetite and calcite from an aillikite melt. Crystallization of the intergrowths occurred in the temperature range from 900 to 760 °C and $fO_2 \sim 10^{-15.5}$ and led to the depletion of the residual melt in iron and titanium. It is assumed that the abundance of titanomagnetite in the lamprophyre of the Yuzhnaya pipe is associated with a sharp change in the oxidative conditions of crystallization caused by the capture of upper crustal shale xenoliths by the aillikite melt.

Keywords: aillikites, titanomagnetite, Zima complex, Urik-Iya graben

Source of funding: The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project 23-17-00196. When carrying out the work, the equipment of the Center for Shared Use "Geodynamics and Geochronology" of the Institute of the Earth's Crust SB RAS was used within the framework of grant No. 075–15–2021–682. The study of the chemical composition of minerals was carried out within the framework of the state assignment of the GIN SB RAS under the project AAAA-A21-121011390002-2.

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the reviewer for his critical comments, which served to rethink the factual material.

For citation: Savelyeva V.B., Danilova Yu.V., Bazarova E.P., Danilov B.S., Khromova E.A. (2024) Titanomagnetite-calcite intergrowths in aillikite of the Yuzhnaya pipe, Eastern Siberia: composition of minerals and conditions of formation. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research.* 3. 65–76. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/32/7

Введение

Айлликиты представляют собой разновидность ультрамафических лампрофиров и являются продуктами кристаллизации богатых углекислотой и калием мантийных расплавов. Они характеризуются присутствием вкрапленников оливина и флогопита в основной массе, состоящей из кальцита, флогопита, оксишпинели, богатого Ті граната, перовскита и других минералов [Тарре et al., 2005]. Айлликиты нередко встречаются в тесной пространственной ассоциации с карбонатитами, и существует точка зрения, согласно которой карбонатиты могут образоваться в результате фракционной кристаллизации богатого карбонатами айлликитового расплава [Tappe et al., 2006; Upton et al., 2006; Doroshkevich et al., 2022; Ogungbuyi et al., 2022]. В связи с этим представляет интерес изучение последовательности кристаллизации минералов, отражающей направленность эволюции химического состава айлликитового расплава.

Титаномагнетит является обычным акцессорным минералом айлликитов, кристаллизация которого происходит после кристаллизации хромшпинелида на фоне снижения температуры, роста fO₂ и увеличения концентрации железа и титана в остаточном расплаве [Тарре et al., 2006; Doroshkevich et al., 2019; Нугуманова, Дорошкевич, 2022; Prokopyev et al., 2020;]. Титаномагнетит обычно образует каймы вокруг зерен хромита и присутствует в основной массе. Нами в айлликите трубки взрыва Южной в Присаянье (Восточная Сибирь) обнаружены обособления титаномагнетита с кальцитом, структура которых указывает на совместную кристаллизацию этих минералов. Целью работы являлось изучение условий образования этих срастаний.

Геологическое строение района исследований

Трубка взрыва Южная находится на территории Иркутской области [Одинцов и др., 1962]. В геологическом отношении район исследований представляет собой юго-западную окраину Сибирского кратона (рис. 1, а). Трубка находится в центральной части Урикско-Ийского грабена и относится к неопротерозойскому щелочному зиминскому комплексу. В состав зиминского комплекса входят многофазные массивы щелочно-ультраосновных пород и карбонатитов, дайки айлликитов, пикритов и трубки взрыва (рис. 1, b). Возраст пород зиминского комплекса, определенный U-Pb методом по циркону и гранату и Ar-Ar методом по флогопиту составляет от 621±6 до 646±6 млн лет [Ярмолюк, 2005; Doroshkevich et al., 2016; Salnikova et al., 2019; Ashchepkov et al., 2020; Савельева и др., 2022; Stifeeva et al., 2023]. Породы зиминского комплекса прорывают дислоцированные палеопротерозойские осадочно-вулканогенные образования грабена, метаморфизм которых отвечает условиям зеленосланцевой фации. Дайки айлликитов имеют преимущественно северо-западное простирание, мощность от сантиметров до первых метров, крутопадающее залегание, резкие контакты с зонами закалки с песчаниками и сланцами.

Трубка взрыва Южная имеет форму овала длиной 350 м [Одинцов и др., 1962]. Она выполнена эксплозивной брекчией, состоящей из обломков сланцев, песчаников, кристаллокластических туфов, сцементированных тем же, но более тонкозернистым, рибекитизированным и доломитизированным материалом. Глыбы айлликита величиной до 0,7 м при толщине 0,2–0,3 м встречаются среди выходов брекчии. Б.М. Владимиров, обнаруживший трубку взрыва, описал ее как кимберлитовую трубку.





На рис. *a*: 1 – фанерозойский осадочный чехол; 2 – раннедокембрийские выступы фундамента (Бк – Байкальский, Б – Бирюсинский, Г – Голоустенский, Ш – Шарыжалгайский); 3 – палеопротерозойский Урикско-Ийский грабен (У); 4 – отложения неопротерозойской окраины кратона; 5 – Центрально-Азиатский складчатый пояс; 6 – расположение участка работ; *b*: 7 – кайнозойские отложения; 8 – терригенные отложения R₁; 9 – вулканогенно-осадочные отложения PR₁ (ингашинская свита); 10, 11 – зиминский комплекс R₃: 10 – ультраосновные-щелочные породы и карбонатиты, 11 – дайки айлликитов (а) и трубки взрыва (б) (вне масштаба); 12 – гранитоиды чернозиминского комплекса R₁; 13 – граниты саянского комплекса PR₁; 14 – габбро-диабазы PR₁; 15 – гнейсо-граниты PR₁, 16 – разломы

Fig. 1. Location (a) and geological structure of the work site (b)

In Fig. a: 1 – Phanerozoic sedimentary cover; 2 – Early Precambrian projections of the basement (Bk – Baikal, B – Biryusinsky, G – Goloustensky, Sh – Sharyzhalgai); 3 – Paleoproterozoic Urik-Iya graben (U); 4 – sediments of the Neoproterozoic margin of the craton; 5 – Central Asian fold belt; 6 – location of the work site; in Fig. b: 7 – Cenozoic deposits; 8 – terrigenous deposits R_1 ; 9 – volcanic-sedimentary deposits PR_1 (Ingashina suite); 10, 11 – Ziminsky complex R_3 : 10 – ultrabasic-alkaline rocks and carbonatites, 11 – aillikit dikes (a) and explosion pipes (b) (out of scale); 12 – granitoids of the Chernozyma complex R_1 ; 13 – granites of the Sayan complex PR_1 ; 14 – gabbro-diabase PR_1 ; 15 – PR_1 gneiss granites, 16 – faults

Петрография и химический состав минералов айлликита

Айлликит, прорывающий эксплозивную брекчию, представляет собой породу грубо порфировидного облика. Она содержит макро- и мегакристаллы (1– 3 см) оливина (10–15 %), флогопита (15–17 %), клинопироксена (2–3 %), амфибола (1–2 %), а также мелкие (доли сантиметра) обломки шпинелевого клинопироксенита и вмещающих сланцев (несколько сантиметров). Изучение химического состава минералов выполнено на растровом электронном микроскопе LEO-1430VP (Carl Zeiss) с системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350 (Oxford Instruments) в ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ). Основная масса лампрофира сложена кальцитом, флогопитом, клинопироксеном, серпентином (предположительно, заместившим оливин), хромшпинелидом, титаномагнетитом, перовскитом, Ti-содержащим андрадитом, апатитом и др. Зерна оливина ксеноморфные, деформированные; зерна клинопироксена и амфибола также деформированы и корродированы по краям кальцитом. Вкрапленники флогопита изогнуты, изломаны, часто расщеплены и обрастают флогопитом поздней генерации с вростками титаномагнетита, апатита, перовскита (рис. 2).

Оливин полностью замещен серпентином (Мg# 0,95–0,98; Mg# = Mg/(Mg+Fe), атомные количества) с небольшой примесью мелких зерен магнетита. Макрокристаллы клинопироксена представлены Cr-диопсидом (Cr₂O₃ = 0,6–1,1 мас. %) и диопсидом (Al₂O₃ = 0,7–3,2 мас. %, TiO₂ до 0,9 мас. %) с каймами титанистого авгита (Al₂O₃ = 4,3–10,3 мас. %, TiO₂ = 1,6–4,6 мас. %). Присутствуют также зерна диопсида с обратной зональностью: Mg# возрастает от значений 0,59–0,74 в центре зерен до 0,72–0,92 на

краях зерен. Зерна амфибола по химическому составу отвечают богатому титаном магнезиогастингситу ($TiO_2 = 3,0-3,6$ мас. %, $K_2O=1,6-2,4$ мас. %). Шпинелиды представлены зернами магнезиохромита (Cr/(Cr+Al) = 0,58-0,68), вероятно, ксеногенного, захваченного из мантийных перидотитов [Roeder, Schulze,

2008] (рис. 3, *a*), которые по краям замещаются хромитом (Cr/(Cr+Al) = 0,58–0,64) и окружены каймой титаномагнетита (TiO₂= 8,2–11,2 мас. %) (табл. 1); эволюция состава оксишпинелидов отвечает титаномагнетитовому тренду [Mitchell, 1995], характерному для айлликитов [Tappe et al., 2005] (рис. 3 *b*).



Рис. 2. Взаимоотношения минералов в айлликите (фотографии шлифов в скрещенных (*a*) и параллельных (*b*) николях)

Условные обозначения: Cal – кальцит, Di – диопсид, Mag – магнетит, Ol – оливин, Phl – флогопит, Srp – серпентин

Fig. 2. Relationships of minerals in aillikite (photographs of thin sections in crossed (*a*) and parallel (*b*) nicols) Abbreviators: Cal – calcite, Di – diopside, Mag – magnetite, Ol – olivine, Phl – phlogopite, Srp – serpentine



Рис. 3. Состав шпинели из айлликита трубки Южной на диаграммах Al-Fe³⁺-Cr (*a*) и Ti/(Ti+Al+Cr)-Fe²⁺T/(Fe²⁺T+Mg) (*b*)

Условные обозначения: Chr – хромит, Mag – магнетит, Mum – магнезио-ульвошпинель-магнетит, Ple – плеонастовая шпинель, Xen – ксенокристаллическая перидотитовая шпинель

Fig. 3. Composition of spinel from aillikite from the Yuzhnaya pipe on the Al–Fe³⁺–Cr (*a*) and Ti/(Ti+Al+Cr)–Fe²⁺T/(Fe²⁺T+Mg) (*b*) diagrams

Abbreviators: Chr - chromite, Mag - magnetite, Mum - magnesio-ulvospinel-magnetite, Ple - pleonaste spinel, Xen - xenocrystalline peridotite spinel

Титаномагнетит широко распространен в айлликите. Кроме кайм вокруг хромита он образует вкрапленники до 5 мм с включениями апатита и зерна в основной массе величиной 10–20 мкм. Количество TiO₂ в титаномагнетите снижается в краевой части рудных выделений от 15,3 до 3,6 мас. %.

Слюда представлена тремя главными типами: макрокристаллами богатого Ті и Сг флогопита (0,3–

2,0 мас. % Cr₂O₃, 2,5–4,5 мас. % TiO₂, Mg# 0,87–0,89), умереннотитанистым безхромистым флогопитом основной массы (0,7–2,4 мас. % TiO₂, Mg# 0,85–0,90), редкими зернами биотита (Mg# 0,56–0,67) в основной массе, окруженными каёмками флогопита (табл. 1, рис. 4). Богатый Ti и Cr флогопит по химическому составу соответствует вторичному Ti-Cr флогопиту из мантийных ксенолитов [Giuliani et al., 2016], что позволяет предполагать его захват расплавом из метасоматизированных пород литосферной мантии. Флогопит основной массы лампрофира по химическому составу близок к флогопиту основной массы как эталонных айлликитов п-ова Лабрадор [Тарре et al., 2006], так и кимберлитов, однако тренды эволюции его состава отличаются от трендов, присущих флогопиту из кимберлитов (рис. 4). Происхождение биотита в основной массе айлликита дискуссионно. Это могут быть либо антекристаллы, либо слюда, захваченная из палеопротерозойских гнейсов и гранитогнейсов, залегающих в основании Урикско-Ийского грабена.

Перовскит из айлликита содержит примеси Ce₂O₃ в количестве 1,2–2,6 мас. % и Nb₂O₅ в количестве 0,7–1,2 мас. %. Апатит представлен членами ряда фторапатит-гидроксилапатит. Кальцит содержит примесь SrO в количестве 0,4–0,8 мас. %.



Рис. 4. Состав слюды из лампрофира трубки Южной

1 – богатый Ті-Сг флогопит макрокристаллов; 2 – безхромистый флогопит основной массы; 3 – биотит из ядер зональных зерен; 4 – каймы флогопита вокруг ядер биотита (стрелки показывают направленность изменения состава слюды); 5 – поле состава слюды из айлликитов п-ова Лабрадор [Тарре et al., 2006]. Также показаны поля и тренды состава слюды по [Mitchell, 1995]: К – слюда из кимберлитов, L – лампроитов, М – минетт, О – оранжеитов; TFP – тетраферрифлогопит

Fig. 4. Composition of mica from the Yuzhnaya lamprophyre pipe

1 - Ti-Cr-rich phlogopite macrocrystals; 2 - chromium-free phlogopite groundmass; 3 - biotite from cores of zoned grains; 4 - phlogopite rims around biotite cores (arrows show the direction of change in mica composition); 5 - field of mica composition from aillikite of the Labrador Peninsula [Tappe et al., 2006]. Fields and trends of mica composition according to [Mitchell, 1995] are also shown: K - mica from kimberlites, L - lamproites, M - minettes, O - orangeites; TFP - tetraferriphlogopite

Таблица 1

Table 1

	· •		· · · · · · · ·		r r J	· · · · · ·	1	
Оксиды, мас. %	1 MgChr	2 Chr	3 TiMag 1	4 TiMag 2	5 Ti–Cr Phl	6 Phl	7 Bt	8 Phl
SiO ₂	_	_	-	-	37,76	36,97	35,77	36,03
TiO ₂	1,00	3,75	7,51	3,67	3,62	2,44	3,41	1,60
Al ₂ O ₃	21,41	14,53	4,95	1,19	14,87	17,18	13,44	16,82
Cr ₂ O ₃	46,58	31,31	3,32	2,50	1,91	_	_	_
FeO	16,00	38,83	76,29	86,49	4,94	6,15	17,43	7,11
MnO	_	2,87	1,96	0,96	-	_	_	-
MgO	16,48	6,32	1,28	1,21	21,71	21,99	15,40	22,75
Na ₂ O	-	-	-	-	-	1,36	0,43	1,00
K ₂ O	_	_	_	_	10,77	9,28	9,61	8,78
V_2O_3	_	0,34	0,35		-	_	_	-
Сумма	101,48	97,94	95,66	96,02	95,58	95,35	95,49	94,09
			Коэффицие	енты в формул	ax			
Si	_	_	_	_	2,72	2,66	2,72	2,63
Ti	0,02	0,09	0,21	0,10	0,20	0,13	0,19	0,09

Representative analyzes of spinels and mica from the lamprophyre Yuzhnaya pipe

Представительные анализы шпинелидов и слюды из лампрофира трубки Южной

Минералогия, геохимия / Mineralogy, geochemistry

Оксиды, мас. %	1 MgChr	2 Chr	3 TiMag 1	4 TiMag 2	5 Ti–Cr Phl	6 Phl	7 Bt	8 Phl
Al	0,75	0,58	0,21	0,05	1,26	1,45	1,21	1,45
Cr	1,10	0,83	0,10	0,07	0,11	—	_	—
Fe ³⁺	0,08	0,30	0,95	1,25	-	_	-	-
Fe ²⁺	0,32	0,80	1,39	1,42	0,30	0,37	1,11	0,43
Mn	-	0,08	0,06	0,03	-	_	-	-
Mg	0,73	0,32	0,07	0,07	2,33	2,35	1,75	2,48
Na	-	—	-	-	-	0,19	0,06	0,14
K	-	—	_	_	0,99	0,85	0,93	0,82
V	-	0,01	0,01	-	-	_	-	-

Примечание. 1–4 – зональное зерно оксишпинелида: 1 – центр, 2 – промежуточная точка, 3 – внутренняя кайма, 4 – внешняя кайма; 5–8 – слюда из лампрофира: 5 – богатый Ti-Cr макрокристалл флогопита, 6 – флогопит основной массы, 7 – биотит из центра зональных зерен в основной массе, 8 – флогопит – кайма вокруг биотита. Здесь и в табл. 2: прочерк – содержание ниже предела обнаружения. Символы минералов: Bt – биотит, Chr – хромит, MgChr – магнезиохромит, Phl – флогопит, Ti-Cr Phl – богатый Ti-Cr флогопит.

Note. 1-4 – zoned oxyspinelide grain: 1 – center, 2 – intermediate point, 3 – inner rim, 4 – outer rim; 5–8 – mica from lamprophyre: 5 – Ti-Cr-rich phlogopite macrocrystal, 6 – phlogopite of the groundmass, 7 – biotite from the center of zoned grains in the groundmass, 8 – phlogopite – rim around biotite. Here and in Table 2: dash – content below the detection limit. Mineral symbols: Bt – biotite, Chr – chromite, MgChr – magnesiochromite, Phl – phlogopite, Ti-Cr-rich phlogopite.

Строение титаномагнетит-кальцитовых срастаний и условия кристаллизации

В основной массе айлликита часто наблюдаются мелкие (величиной 50–700 мкм) срастания титаномагнетита с кальцитом (рис. 5). Крупные крапленники титаномагнетита также бывают окружены каёмкой, образованной срастаниями титаномагнетита с кальцитом. Нередко в этой ассоциации присутствует также перовскит.

В одном из раздробленных в лаборатории образцов айлликита в обломке породы обнаружено округлое обособление величиной около 0,7–1,0 см, состоящее из срастаний титаномагнетита и кальцита. Фотография пришлифованного фрагмента этого обособления и его внутреннее строение показаны на рис. 6. Граница обособления с основной массой айлликита достаточно отчетливая, а строение его неоднородное: преобладают каплевидные включения кальцита в титаномагнетите, реже наблюдаются червеобразные вростки титаномагнетита в кальците (рис. 6). В титаномагнетите отмечаются мелкие вростки ильменита и слабое замещение титанитом.

Химический состав титаномагнетита и ильменита из обособления приведен в табл. 2. Кальцит в срастании с титаномагнетитом содержит примеси (мас. %) FeO 0,4–0,7, MgO 0,3–0,7 и SrO 0,5–0,7. По содержанию примесей кальцит из обособления не отличается от кальцита основной массы породы. Титаномагнетит из обособления по сравнению с титаномагнетитом из основной массы обеднен Мп, в меньшей мере Al и характеризуется умеренно высоким содержанием Ti (рис. 7, a–c).



Рис. 5. Срастания титаномагнетита с кальцитом в лампрофире трубки Южной (фотографии шлифов) Условные обозначения здесь и на рис. 6: Cal – кальцит, Phl – флогопит, TMag – титаномагнетит

Fig. 5. Intergrowths of titanomagnetite with calcite in the lamprophyre of the Yuzhnaya pipe (photographs of thin sections)

Abbreviators here and in Fig. 6: Cal - calcite, Phl - phlogopite, TMag - titanomagnetite



Рис. 6. Строение титаномагнетит-кальцитового обособления

а – зона контакта с основной массой породы (фотография пришлифованного образца); b, с – изображения в обратнорассеянных
электронах: b – обособления кальцита в титаномагнетите; с – червеобразный вросток титаномагнетита в кальците, контакт с основной массой

Fig. 6. Structure of titanomagnetite-calcite segregation

a - zone of contact with the bulk of the rock (photograph of a polished sample); b, c - backscattered electron images: b - calcite segregations in titanomagnetite; c - worm-shaped ingrowth of titanomagnetite in calcite, contact with the groundmass

Таблица 2

Химический состав титаномагнетита и ильменита из рудно-кальцитового обособления

Table 2

Chemical composition	of titanomagnetit	e and ilmenite from	ore-calcite isolation

Оксиды, мас. %	1	2	3	4	5
TiO ₂	10,94	10,86	5,62	10,01	53,91
Al ₂ O ₃	2,17	2,32	0,83	2,02	_
FeO	81,91	85,01	87,83	81,36	39,12
MnO	0,53	0,94	0,99	1,20	4,35
MgO	2,04	0,99	0,71	2,57	4,58
V_2O_3	-	-	0,31	—	0,68
Сумма	97,60	100,13	96,30	97,16	102,64
Коэффициенты в формулах					
Ti	0,30	0,29	0,16	0,27	0,96
Al	0,09	0,10	0,04	0,09	_
Fe ³⁺	0,98	0,99	1,23	1,03	0,06
Fe ²⁺	1,50	1,54	1,50	1,44	0,71
Mn	0,02	0,03	0,03	0,04	0,09
Mg	0,11	0,05	0,04	0,14	0,16
V	—	—	0,01	—	0,01

Примечание. 1-4 – титаномагнетит, 5 – ильменит – вростки в зерне 1.

Note. 1-4 - titanomagnetite, 5 - ilmenite - intergrowths in grain 1.

По модифицированному титаномагнетит-ильменитовому геотермометру А.Ф. Баддингтона и Д.Х. Линдсли [Полтавец, 1975] была оценена температура равновесия пары титаномагнетит–ильменит из титаномагнетит-кальцитового обособления – около 790 °С при $fO_2\sim10^{-15.5}$. Оценка температуры кристаллизации титаномагнетита из обособления по его магнезиальности [Canil, Lacourse, 2020] дала значения от 908 до 722 °С. Титаномагнетит из основной массы породы кристаллизовался в основном в интервале 860–765 °С, а завершилась его кристаллизация при температуре около 690 °С (рис. 7, d).

Температура кристаллизации флогопита из основной массы, определенная по геотермометру Д.Дж. Генри и соавт. [Henry et al., 2005], составляла 670–750 °C.

Обсуждение

Наблюдаемые в айлликите трубки Южной срастания титаномагнетита с кальцитом представляют собой продукты совместной кристаллизации, нередко наблюдаемые в различных горных породах. Особенности строения агрегатов позволяют рассматривать их как нормальную эвтектику, когда «фронт кристаллизации происходит по поверхности раздела между жидкостью и двумя твердыми фазами, находящимися в эвтектическом срастании» [Жабин, 1979, с. 174]. Хотя титаномагнетит-кальцитовые срастания из айлликита трубки Южной и напоминают продукты жидкостной несмесимости в магматических и флюидномагматических системах, хорошо изученные экспериментально [Котельников и др., 2019; Шаповалов и др., 2019], интерпретации их как продуктов жидкостной несмесимости противоречат следующие факты: а) близость минерального состава титаномагнетиткальцитовых обособлений и основной массы айлликита (см. рис. 5); б) отсутствие в составе обособлений минералов, содержащих «флюсовые» компоненты (P, S, Cl, F) [Панина, Моторина, 2008]; в) отсутствие экспериментальных данных, однозначно указывающих на возможность отделения кальциокарбонатитового расплава от силикатного расплава [Gittins, Mitchell, 2023]; г) невозможность существования расплавов оксидов железа и титана при геологически приемлемых PT-параметрах [Lindsley, Epler, 2017].



Рис. 7. Соотношения (к.ф.) Mg-Ti (а), Al-Ti (b), Mn-Ti (с) и Ti (к.ф.)-T, °С (d) в титаномагнетите Титаномагнетит: 1 – из основной массы, 2 – из титаномагнетит-кальцитового обособления

Fig. 7. Ratios (c.f.) Mg-Ti (a), Al-Ti (b), Mn-Ti (c) and Ti (c.f.)-T, °C (d) in titanomagnetite Titanomagnetite: 1 – from the groundmass, 2 – from titanomagnetite-calcite isolation

Петрографические данные указывают на то, что образованию титаномагнетита предшествала кристаллизация из силикатно-карбонатного расплава оливина и диопсида, что обусловило обеднение расплава магнием. Показателем роста концентрации железа в расплаве являлось образование кайм хромита вокруг зерен магнезиохромита. Образование эвтектических срастаний началось, согласно полученным данным, в интервале 900– 850 °C, а дальнейшая кристаллизация рассеянных в основной массе зерен титаномагнетита совместно с кальцитом, апатитом, перовскитом происходила на фоне снижения температуры примерно до 700–750 °C. Широкие вариации содержания титана в титаномагнетитах основной массы, кристаллизовавшихся при 800–850 °C (см. рис. 7, d), обусловлены, вероятно, одновременной с титаномагнетитом кристаллизацией перовскита.
Заключение

Изменение состава айлликитового расплава, вызванное кристаллизацией титаномагнетита, привело к образованию на поздней стадии в парагенезисе с кальцитом флогопита со сравнительно невысоким содержанием титана (0,7–2,4 мас. % TiO₂) и высокой магнезиальностью (Mg# 0,85–0,90).

С.С. Долгушин и А.Л. Павлов, изучавшие железорудные месторождения Алтае-Саянской горной области [Долгушин, Павлов, 1987], отводят важную роль в процессах концентрирования железа в силикатных расплавах реакциям окисления ионов Fe^{2+} до ионов Fe^{3+} , что приводит к перестройке структуры расплава и образованию ферритной жидкости. Можно предполагать, что обилие титаномагнетита в лампрофире трубки Южной связано с резким изменением окислительных условий кристаллизации, вызванным захватом айлликитовым расплавом ксенолитов верхней коры (сланцы и песчаники ингашинской свиты PR₁). Мы не наблюдали титаномагнетит-кальцитовых обособлений, подобных описанному выше (см. рис. 6), в других дайках айлликитов. Это может быть связано с недостаточным объемом наблюдений либо обусловлено особенностями условий внедрения лампрофира трубки взрыва Южной (быстрый подъем айлликитового расплава и резкая смена окислительно-восстановительных условий).

Список источников

Долгушин С.С., Павлов А.Л. Механизм формирования магнетитовых месторождений (на примере Алтае-Саянской складчатой области). Новосибирск : Наука, 1987. 166 с.

Жабин А.Г. Онтогения минералов. Агрегаты. М. : Наука, 1979. 278 с.

Котельников А.Р., Сук Н.И., Котельникова З.А., Янев Й., Енчева С., Ананьев В.В. Жидкостная несмесимость во флюидно-магматических системах (экспериментальное исследование) // Петрология. 2019. Т. 27, № 2. С. 206–224. doi: 10.31857/S0869-59032206-224

Нугуманова Я.Н., Дорошкевич А.Г. Состав шпинелидов из позднепротерозойских ультраосновных лампрофиров Большетагнинского щелочно-ультраосновного карбонатитового массива (Урикско-Ийский грабен, Восточное Присаянье) // Геодинамика и тектонофизика. 2022. V. 12 (4). 0656. doi: 10.5800/GT-2022-13-4-0656

Одинцов М.М., Твердохлебов В.А., Владимиров Б.М., Ильюхина А.В., Колесникова Т.П., Конев А.А. Структура, вулканизм и алмазоносность Иркутского амфитеатра. М. : Изд-во АН СССР, 1962. 180 с.

Панина Л.И., Моторина И.В. Жидкостная несмесимость глубинных магм и зарождение карбонатитовых расплавов // Геохимия. 2008. № 5. С. 487–504.

Полтавец Ю.А. Обсуждение титаномагнетитового геотермометра Баддингтона–Линдсли на основе сравнительного анализа равновесий шпинелидов магнетитовой серии // Известия Академии наук СССР. Серия Геологическая. 1975. № 6. С. 63–72.

Савельева В.Б., Данилова Ю.В., Летников Ф.А., Демонтерова Е.И., С. Юдин Д.С., Базарова Е.П., Данилов Б.С., Шарыгин И.С. Возраст и источники расплавов ультрамафитовых даек и пород Большетагнинского щелочно-карбонатитового массива (Урикско-Ийский грабен, юго-западная окраина Сибирского кратона) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 505, № 1. С. 53–61. doi: 10.31857/S2686739722070167

Шаповалов Ю.Б., Котельников А.Р., Сук Н.И., Коржинская В.С., Котельникова З.А. Жидкостная несмесимость и проблемы рудогенеза (по экспериментальным данным) // Петрология. 2019. Т. 27, № 5. С. 577–597. doi: 10.31857/S0869-5903275577-597

Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Сальникова Е.Б., Никифоров А.В., Котов А.Б., Владыкин Н.В. Позднерифейский рифтогенез и распад Лавразии: данные геохронологических исследований ультраосновных щелочных комплексов в южном обрамлении Сибирского кратона // ДАН. 2005. Т. 404. С. 1031–1037.

Ashchepkov I., Zhmodik S., Belyanin D., Kiseleva O.N., Medvedev N., Travin A., Yudin D., Karmanov N.S., Downes H. Aillikites and Alkali Ultramafic Lamprophyres of the Beloziminsky Alkaline Ultrabasic-Carbonatite Massif: Possible Origin and Relations with Ore Deposits // Minerals. 2020. V. 10. P. 404. doi: 10.3390/min10050404

Canil D., Lacourse T. Geothermometry using minor and trace elements in igneous and hydrothermal magnetite // Chemical Geology. 2020. V. 541. 119576. doi: 10.1016/j.chemgeo.2020.119576

Doroshkevich A.G., Chebotarev D.A., Sharygin V.V., Prokopyev I.R., Nikolenko A.M. Petrology of alkaline silicate rocks and carbonatites of the Chuktukon massif, Chadobets upland, Russia: Sources, evolution and relation to the Triassic Siberian LIP // Lithos. 2019. V. 332–333. P. 245–260. doi: 10.1016/j.lithos.2019.03.006

Doroshkevich A., Prokopyev I., Kruk M., Sharygin V., Izbrodin I., Starikova A., Ponomarchuk A., Izokh A., Nugumanova Y. Age and Petrogenesis of Ultramafic Lamprophyres of the Arbarastakh Alkaline-Carbonatite Complex, Aldan-Stanovoy Shield, South of Siberian Craton (Russia): Evidencefor Ultramafic Lamprophyre-Carbonatite Link // Journal of Petrology. 2022. V. 63. P. 1–21. doi: 10.1093/petrology/egac073

Doroshkevich A.G., Veksler I.V., Izbrodin I.A., Ripp G.S., Khromova E.A., Posokhov V.F., Travin A.V., Vladykin N.V. Stable Isotope Composition of Minerals in the Belaya Zima Plutonic Complex, Russia: Implications for the Sources of the Parental Magma and Metasomatizing Fluids // Journal of Asian Earth Science. 2016. V. 116. P. 81–96. doi: 10.1016/j.jseaes.2015.11.011

Gittins J., Mitchell R.H. The genesis of calcite and dolomite carbonatiteforming magma by liquid immiscibility: a critical appraisal // Geological Magazine. 2023. V. 160. P. 1463–1480. doi: 10.1017/S001675682300050X

Giuliani A., Phillips D., Kamenetsky V.S., Goemann K. Constraints on kimberlite ascent mechanisms revealed by phlogopite compositions in kimberlites and mantle xenoliths // Lithos. 2016. V. 240–243. P. 189–201. doi: 10.1016/j.lithos.2015.11.013

Henry D.J., Guidotti C.V., Thompson J.A. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms // American Mineralogist. 2005. V. 90. P. 316–328. doi: 10.2138/am.2005.1498

Lindsley D.H., Epler N. Do Fe -Ti-oxide magmas exist? Probably not! // American Mineralogist. 2017. V. 102 (11). P. 2157–2169. doi: 10.2138/am-2017-6091

Mitchell R.H. Kimberlites, orangeites and related rocks. New York : Plenium Press, 1995. 410 p.

Ogungbuyi P.I., Janney P.E., Harris C. Carbonatite, aillikite and olivine melilitite from Zandkopsdrift, Namaqualand, South Africa: Constraints on the origin of an unusual lamprophyre-dominated carbonatite complex and the nature of its mantle source // Lithos. 2022. V. 418–419. Article 106678. P. 1–16. doi: 10.1016/j.lithos.2022.106678

Prokopyev I., Starikova A., Doroshkevich A., Nugumanova Y., Potapov V. Petrogenesis of Ultramafic Lamprophyres from the Terina Complex (Chadobets Upland, Russia): Mineralogy and Melt Inclusion Composition // Minerals. 2020. V. 10. 419. doi: 10.3390/min10050419

Roeder P.L., Schulze D.J. Crystallization of groundmass spinel in kimberlite // Journal of Petrology. 2008. V. 49. P. 1473–1495. doi: 10.1093/petrology/egn034

Salnikova E.B., Chakhmouradian A.R., Stifeeva M.V., Reguir E.P., Kotov A.B., Gritsenko Y.D., Nikiforov A.V. Calcic Garnets as a Geochronological and Petrogenetic Tool Applicable to a Wide Variety of Rocks // Lithos. 2019. V. 338–339. P. 141–154. doi: 10.1016/j.lithos.2019.03.032

Stifeeva M.V., Salnikova E.B., Savelyeva V.B., Kotov A.B., Danilova Y.V., Bazarova E.P., Danilov B.S. Timing of Carbonatite Ultramafic Complexes of the Eastern Sayan Alkaline Province, Siberia: U–Pb (ID–TIMS) Geochronology of Ca–Fe Garnets // Minerals. 2023. V. 13. P. 1086. doi: 10.3390/min13081086

Tappe S., Foley S.F., Jenner G.A., Kjarsgaard B. Ultramafic Lamprophyres into the IUGS Classification of Igneous Rocks: Rationale and Implications // Journal of Petrology. 2005. V. 46. No. 9. P. 1893–1900. doi: 10.1093/petrology/egi039

Tappe S., Foley S.F., Jenner G.A., Heaman L.M., Kjarsgaard B.A., Romer R.L., Stracke A., Joyces N., Hoefs J. Genesis of Ultramafic Lamprophyres and Carbonatites at Aillik Bay, Labrador: a Consequence of Incipient Lithospheric Thinning beneath the North Atlantic Craton // Journal of Petrology. 2006. V. 47, No. 7. P. 1261–1315 doi: 10.1093/petrology/egl008

Upton B.G.J., Craven J.A., Kirstein L.A. Crystallisation of mela-aillikites of the Narsaq region, Gardar alkaline province, south Greenland and relationships to other aillikitic–carbonatitic associations in the province // Lithos. 2006. V. 92. P. 300–319. doi: 10.1016/j.lithos.2006.03.046

References

Dolgushin S.S., Pavlov A.L. Mekhanizm formirovaniya magnetitovykh mestorozhdeniy (na primere Altaye-Sayanskoy skladchatoy oblasti) [The mechanism of formation of magnetite deposits (using the example of the Altai-Sayan folded region)]. Novosibirsk: Nauka. 1987. 166 p. In Russian

Zhabin A.G. Ontogeniya mineralov. Agregaty [Ontogeny of minerals. Aggregates]. Moscow : Nauka. 1979. 278 p. In Russian

Kotel'nikov A.R., Suk N.I., Kotel'nikova Z.A., Yanev Y., Yencheva S., Anan'yev V.V. Zhidkostnaya nesmesimost' vo flyuidnomagmaticheskikh sistemakh (eksperimental'noye issledovaniye) [Liquid immiscibility in fluid-magmatic systems (experimental study)] // Petrologiya [Petrology]. 2019. V. 27. No. 2. pp. 206–224. https://doi.org/10.31857/S0869-59032206-224. In Russian

Nugumanova Ya.N., Doroshkevich A.G. Composition of Spinel Group Minerals from Late Proterozoic Ultramafic Lamprophyres of the Bolshetagninskii Alkaline Ultramafic Carbonatite Complex Located at the Urik-Iya Graben, Eastern Sayan Region // Geodynamics & Tectonophysics. 2022. V. 13 (4). p. 0656. https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-4-0656. In Russian

Odintsov M.M., Tverdokhlebov V.A., Vladimirov B.M., Il'yukhina A.V., Kolesnikova T.P., Konev A.A. *Struktura, vulkanizm i almazonosnost' Irkutskogo amfiteatra* [Structure, volcanism and diamond potential of the Irkutsk amphitheater]. Moscow : Izd-vo AN SSSR. 1962. 180 p. In Russian

Panina L.I., Motorina I.V. Zhidkostnaya nesmesimost' glubinnykh magm i zarozhdeniye karbonatitovykh rasplavov [Liquid immiscibility of deep magmas and the origin of carbonatite melts] // Geokhimiya [Geochemistry]. 2008. No 5. pp. 487–504. In Russian

Poltavets Yu.A. Obsuzhdeniye titanomagnetitovogo geotermometra Baddingtona-Lindsli na osnove sravniteľnogo analiza ravnovesiy shpinelidov magnetitovoy serii [Discussion of the Buddington-Lindsley titanomagnetite geothermometer based on a comparative analysis of the equilibria of magnetite series spinels] // Izv. Akademii nauk SSSR. Ser. Geologicheskaya [Izv. Academy of Sciences of the USSR. Series: Geological]. 1975. No. 6. pp. 63–72. In Russian

Savel'yeva V.B., Danilova Yu.V., Letnikov F.A., Demonterova Ye.I., S. Yudin D.S., Bazarova Ye.P., Danilov B.S., Sharygin I.S. *Vozrast i istochniki rasplavov ul'tramafitovykh dayek i porod Bol'shetagninskogo shchelochno-karbonatitovogo massiva (Uriksko-Iyskiy graben, yugo-zapadnaya okraina Sibirskogo kratona)* [Age and sources of melts of ultramafic dikes and rocks of the Bolshetagninsky alkaline-carbonatite massif (Urik-Iysky graben, southwestern margin of the Siberian craton)] // DAN. Nauki o Zemle [Doklady Earth Sciences]. 2022. V. 505. No. 1. pp. 53–61. https://doi.org/10.31857/S2686739722070167. In Russian

Shapovalov YU.B., Kotel'nikov A.R., Suk N.I., Korzhinskaya V.S., Kotel'nikova Z.A. *Zhidkostnaya nesmesimost' i problemy rudogeneza (po eksperimental'nym dannym)* [Liquid immiscibility and problems of ore genesis (based on experimental data)] // *Petrologiya* [Petrology]. 2019. V. 27. No. 5. pp. 577–597. https://doi.org/10.31857/S0869-5903275577-597. In Russian

Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Sal'nikova Ye.B., Nikiforov A.V., Kotov A.B., Vladykin N.V. *Pozdnerifeyskiy riftogenez i raspad Lavrazii: dannyye geokhronologicheskikh issledovaniy ul'traosnovnykh shchelochnykh kompleksov v yuzhnom obramlenii Sibirskogo kratona* [Late Riphean rifting and breakup of Laurasia: geochronological data from ultramafic alkaline complexes in the southern framing of the Siberian craton] // *DAN* [Doklady Earth Sciences]. 2005. V. 404. pp. 1031–1037. In Russian

Ashchepkov I., Zhmodik S., Belyanin D., Kiseleva O.N., Medvedev N., Travin A., Yudin D., Karmanov N.S., Downes H. Aillikites and Alkali Ultramafic Lamprophyres of the Beloziminsky Alkaline Ultrabasic-Carbonatite Massif: Possible Origin and Relations with Ore Deposits // Minerals. 2020. V. 10. p. 404. https://doi.org/10.3390/min10050404

Canil D., Lacourse T. Geothermometry using minor and trace elements in igneous and hydrothermal magnetite // Chemical Geology. 2020. V. 541. 119576. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119576

Doroshkevich A.G, Chebotarev D.A., Sharygin V.V., Prokopyev I.R., Nikolenko A.M. Petrology of alkaline silicate rocks and carbonatites of the Chuktukon massif, Chadobets upland, Russia: Sources, evolution and relation to the Triassic Siberian LIP // Lithos. 2019. V. 332–333. pp. 245–260. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.03.006

Doroshkevich A., Prokopyev I., Kruk M., Sharygin V., Izbrodin I., Starikova A., Ponomarchuk A., Izokh A., Nugumanova Y. Age and Petrogenesis of Ultramafic Lamprophyres of the Arbarastakh Alkaline-Carbonatite Complex, Aldan-Stanovoy Shield, South of

Siberian Craton (Russia): Evidencefor Ultramafic Lamprophyre-Carbonatite Link // Journal of Petrology. 2022. V. 63. pp. 1–21. https://doi.org/10.1093/petrology/egac073

Doroshkevich A.G., Veksler I.V., Izbrodin I.A., Ripp G.S., Khromova E.A., Posokhov V.F., Travin A.V., Vladykin N.V. Stable Isotope Composition of Minerals in the Belaya Zima Plutonic Complex, Russia: Implications for the Sources of the Parental Magma and Metasomatizing Fluids // Journal of Asian Earth Science. 2016. V. 116. pp. 81–96. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.11.011

Gittins J., Mitchell R.H. The genesis of calcite and dolomite carbonatiteforming magma by liquid immiscibility: a critical appraisal // Geological Magazine. 2023. V. 160. pp. 1463–1480. https://doi.org/10.1017/S001675682300050X

Giuliani A., Phillips D., Kamenetsky V.S., Goemann K. Constraints on kimberlite ascent mechanisms revealed by phlogopite compositions in kimberlites and mantle xenoliths // Lithos. 2016. V. 240–243. P. 189–201. http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2015.11.013

Henry D.J., Guidotti C.V., Thompson J.A. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms // American Mineralogist. 2005. V. 90. P. 316–328. DOI: 10.2138/am.2005.1498

Lindsley D.H., Epler N. Do Fe -Ti-oxide magmas exist? Probably not! // American Mineralogist. 2017. V. 102 (11). pp. 2157–2169. https://doi.org/10.2138/am-2017-6091

Mitchell R.H. Kimberlites, orangeites and related rocks. New York: Plenium Press, 1995. 410 p.

Ogungbuyi P.I., Janney P.E., Harris C. Carbonatite, aillikite and olivine melilitite from Zandkopsdrift, Namaqualand, South Africa: Constraints on the origin of an unusual lamprophyre-dominated carbonatite complex and the nature of its mantle source // Lithos. 2022. V. 418–419. 106678. pp. 1–16. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106678

Prokopyev I., Starikova A., Doroshkevich A., Nugumanova Y., Potapov V. Petrogenesis of Ultramafic Lamprophyres from the Terina Complex (Chadobets Upland, Russia): Mineralogy and Melt Inclusion Composition // Minerals. 2020. V. 10. p. 419. doi:10.3390/min10050419

Roeder P.L., Schulze D.J. Crystallization of groundmass spinel in kimberlite // Journal of Petrology. 2008. V. 49. pp. 1473–1495. doi:10.1093/petrology/egn034

Salnikova E.B., Chakhmouradian A.R., Stifeeva M.V., Reguir E.P., Kotov A.B., Gritsenko Y.D., Nikiforov A.V. Calcic Garnets as a Geochronological and Petrogenetic Tool Applicable to a Wide Variety of Rocks // Lithos. 2019. V. 338–339. pp. 141–154. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.03.032

Stifeeva M.V., Salnikova E.B., Savelyeva V.B., Kotov A.B., Danilova Y.V., Bazarova E.P., Danilov B.S. Timing of Carbonatite Ultramafic Complexes of the Eastern Sayan Alkaline Province, Siberia: U–Pb (ID–TIMS) Geochronology of Ca–Fe Garnets // Minerals. 2023. V. 13. p. 1086. https://doi.org/10.3390/min13081086

Tappe S., Foley S.F., Jenner G.A., Kjarsgaard B. Ultramafic Lamprophyres into the IUGS Classification of Igneous Rocks: Rationale and Implications // Journal of Petrology. 2005. V. 46. No. 9. P. 1893–1900. https://doi.org/10.1093/petrology/egi039

Tappe S., Foley S.F., Jenner G.A., Heaman L.M., Kjarsgaard B.A., Romer R.L., Stracke A., Joyces N., Hoefs J. Genesis of Ultramafic Lamprophyres and Carbonatites at Aillik Bay, Labrador: a Consequence of Incipient Lithospheric Thinning beneath the North Atlantic Craton // Journal of Petrology. 2006. V. 47 (7). pp. 1261–1315. https://doi.org/10.1093/petrology/egl008

Upton B.G.J., Craven J.A., Kirstein L.A. Crystallisation of mela-aillikites of the Narsaq region, Gardar alkaline province, south Greenland and relationships to other aillikitic–carbonatitic associations in the province // Lithos. 2006. V. 92. pp. 300–319. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.03.046

Информация об авторах:

Савельева В.Б., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория петрологии, геохимии и рудогенеза, Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: vsavel@crust.irk.ru

Данилова Ю.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория петрологии, геохимии и рудогенеза, Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: jdan@crust.irk.ru Базарова Е.П., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, лаборатория петрологии, геохимии и рудогенеза,

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: bazarova@crust.irk.ru

Данилов Б.С., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории петрологии, геохимии и рудогенеза, Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: boris@crust.irk.ru

Хромова Е.А., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, лаборатория инструментальных методов анализа, Геологический института им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия. E-mail: lena.khromova.00@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Savelyeva V.B., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Laboratory of Petrology, Geochemistry and Ore Genesis, Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia.

E-mail: vsavel@crust.irk.ru

Danilova Yu.V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Laboratory of Petrology, Geochemistry and Ore Genesis, Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia.

E-mail: jdan@crust.irk.ru

Bazarova E.P., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, Laboratory of Petrology, Geochemistry and Ore Genesis, Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia.

E-mail: bazarova@crust.irk.ru

Danilov B.St., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Laboratory of petrology, geochemistry and ore genesis, Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia. E-mail: boris@crust.irk.ru

Khromova E.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, Laboratory of Instrumental Analysis Methods, N.L. Dobretsov Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia.

E-mail: lena.khromova.00@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 29.05.2024; одобрена после рецензирования 03.08.2024; принята к публикации 27.09.2024 The article was submitted 29.05.2024; approved after reviewing 03.08.2024; accepted for publication 27.09.2024 Научная статья УДК 550.424.4, 550.424.6 doi: 10.17223/25421379/32/8

МОБИЛЬНОСТЬ ТИТАНА И НИОБИЯ ПРИ ПОСТМАГМАТИЧЕСКИХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯХ РУТИЛА, АНАТАЗА, ПИРОХЛОРА И ЛУЕШИТА



Дмитрий Александрович Чеботарев¹, Багай-оол Юрьевич Сарыг-оол², Евгений Николаевич Козлов³, Екатерина Николаевна Фомина⁴, Михаил Юрьевич Сидоров⁵, Анна Андреевна Редина⁶

^{1, 2, 6} Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

^{3, 4, 5} Геологический институт, Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия

¹ chebotarev@igm.nsc.ru ² sarygool@igm.nsc.ru

³ kozlov e.n@mail.ru

⁴ fomina_e.n@mail.ru

⁵sidorov@geoksc.apatity.ru

⁶ redina@igm.nsc.ru

Аннотация. Представлены исследования по растворению рутила и анатаза в смеси с пирохлором или луешитом в 1,0 M растворах HF, HCl, H₂SO₄ при 50 и 200 °C. Рутил и анатаз устойчивы к воздействию растворов, а луешит – умеренно устойчив. HCl и H₂SO₄ выщелачивают компоненты пирохлора, а HF приводит к замещению флюоритом. Показано, что при постмагматических низкотемпературных процессах эффективность растворения и переноса титана и ниобия снижается в ряду фторидных, сульфатных и хлоридных комплексов, при этом понижение температуры также негативно сказы-

вается на растворимости титана и ниобия. Ключевые слова: выветривание, мобильность ниобия, мобильность титана, гидротермальные процессы, флюидные растворы

Источник финансирования: исследование проведено за счет средств базового проекта НИР № 122041400241-5 (расходные материалы для экспериментов) и гранта РНФ № 23-77-01075 (исходные вещества, аналитические работы).

Для цитирования: Чеботарев Д.А., Сарыг-оол Б.Ю., Козлов Е.Н., Фомина Е.Н., Сидоров М.Ю., Редина А.А. Мобильность титана и ниобия при постмагматических низкотемпературных преобразованиях рутила, анатаза, пирохлора и луешита // Геосферные исследования. 2024. № 3. С. 77–86. doi: 10.17223/25421379/32/8

Original article doi: 10.17223/25421379/32/8

THE MOBILITY OF TITANIUM AND NIOBIUM DURING POSTMAGMATIC LOW-TEMPERATURE TRANSFORMATIONS OF RUTILE, ANATASE, PYROCHLORE AND LUESHITE

Dmitry A. Chebotarev¹, Bagai-ool Yu. Saryg-ool², Evgeniy N. Kozlov³, Ekaterina N. Fomina⁴, Mikhail Yu. Sidorov⁵, Anna A. Redina⁶

^{1, 2, 6} V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

^{3, 4, 5} Geological Institute, Kola Science Center, RAS, Apatity, Russia

¹chebotarev@igm.nsc.ru

² sarygool@igm.nsc.ru

³kozlov_e.n@mail.ru

⁴fomina_e.n@mail.ru

⁵sidorov@geoksc.apatity.ru

⁶ redina@igm.nsc.ru

Abstract. Niobium and titanium are refractory metals, which are both included as impurities in the composition of many minerals and form their own ore minerals. These metals are considered to be inactive under conditions of low-temperature hydrothermal transformation and weathering, and their minerals are considered resistant to such processes. On the other hand, there is evidence of crystallization of niobium and titanium oxides during postmagmatic low-temperature transformations of carbonatites, which indicates the possibility of their transfer by solutions. This is confirmed by a number of experimental works, however, the studies were carried out under conditions corresponding to earlier and high-temperature stages of the formation of magmatic objects for systems with simple composition. This paper presents the results of studies on the complex dissolution of rutile and anatase crystals mixed with pyrochlore or lueschite in 1.0 M solutions of HF, HCl, H_2SO_4 at 50 and 200 °C for 4 hours. Experiments were carried out in Teflon autoclaves. Minerals after the experiments were analyzed by scanning microscopy and microprobe, and solutions were analyzed by ICP-AES. Rutile and anatase are resistant to acids, and luesite is moderately resistant. Solutions of hydrochloric acid solution, and this effect increases with increasing temperature. Exposure to fluoride solutions caused the replacement of pyrochlore with fluorite. At the same time, the solutions are most intensively saturated with both niobium and titanium: during the experiments, more than 70% Nb₂O₅ and up to 3% TiO₂ from the initial amounts went into solution. Thus, it has been shown that during post-magmatic low-temperature processes, the efficiency of dissolution and transfer of titanium and niobium decreases in a series of fluoride, sulfate and chloride complexes, and lowering the temperature also has a negative effect on the solubility of titanium and niobium.

Keywords: weathering, niobium mobility, titanium mobility, hydrothermal processes, fluid solutions

Source of financing: The research was funded by the research project No. 122041400241-5 (consumables for experiments) and the Russian Science Foundation grant No. 23-77-01075 (starting materials, analytical work).

For citation: Chebotarev D.A., Saryg-ool B.Yu., Kozlov E.N., Fomina E.N., Sidorov M.Yu., Redina A.A. (2024) The mobility of titanium and niobium during postmagmatic low-temperature transformations of rutile, anatase, pyrochlore and lueshite. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 3. pp. 77–86. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/32/8

Введение

Ниобий и титан склонны концентрироваться в остаточном расплаве, что приводит к их накоплению в поздних дифференциатах щелочных магм (в том числе сиенитовых, карбонатитовых и др.). Это объясняется их высоким сродством к кислороду и, как следствие, к магматическому расплаву [Шаповалов и др., 2019]. Они могут быть как примесными элементами в составе многих магматических минералов, так и видообразующими в рудных минеральных фазах, в первую очередь разнообразных оксидах ниобия (пирохлор, луешит и др.) и титана (рутил, анатаз, брукит, ильменит, перовскит и др.). Указанные минералы считаются устойчивыми или умеренно устойчивыми к природным постмагматическим процессам (гидротермальным и гипергенным), благодаря чему могут накапливаться в россыпях и корах выветривания. При этом предполагается, что ниобий и титан не переносятся, что ведет к увеличению их концентрации в породах до промышленно значимых величин [Chebotarev et al., 2017; Bollaert et al., 2023; Lapin et al., 2024], а пирохлоровую минерализацию, ассоциированную с карбонатитами, рассматривают как главный источник добычи ниобия [Mitchell, 2015; United States Geological Survey, 2015].

Также отметим, что, исходя из такого убеждения об устойчивости минералов супергруппы пирохлора к постмагматическим изменениям, геологи восстанавливают прошлое геологических событий [Cann, 1970; Kurtz et al., 2000; Hastie et al., 2011], а соединения на базе этих минералов рассматриваются как перспективные контейнеры для захоронения ядерных отходов, инертные к воздействию окружающей среды [Ewing et al., 2004]. Однако оксиды титана и ниобия часто встречаются в гидротермальных жилах различного типа и кущих их, причем как в высокотемпературных (700-400 °С), так и в средне- (300-150 °С) и низкотемпературных (150-50 °C) [Rabbia, Hernandez, 2012; Schrira, Laurent, 2021; Bollaert et al., 2023]. Нередко в Ті-оксидах (рутиле, бруките, анатазе) из таких жил обнаруживается осцилляционная и секториальная зональности по Ti, Fe, Si, Nb и другим элементам, что также указывает на их формирование в открытой системе, а содержание Nb₂O₅ может достигать десятков весовых процентов, что особенно часто наблюдается в каймах Тіоксидов [Rabbia, Hernandez, 2012; Andersen et al., 2016; Chebotarev et al., 2017; Giovannini et al., 2017, 2020; Win et al., 2017; Kozlov et al., 2018; Schrira, Laurent, 2021; Bollaert et al., 2023]. При этом в Ті-оксидах содержание примеси Nb₂O₅ может достигать десятков весовых процентов, что представляет экономический интерес [Bollaert et al., 2023]. В качестве ярких примеров таких геологических объектов можно назвать целый ряд карбонатитовых комплексов, с которыми ассоциированы промышленно значимые редкометальные месторождения, такие как Чуктуконский массив Чадобецкого комплекса в Красноярском крае [Chebotarev et al., 2017], массив Вуориярви в Кольской щелочной провинции (КЩП) [Kozlov et al., 2018], Bear Lodge в США [Andersen et al., 2016], а также крупнейшее в мире месторождение титана и ниобия Morros dos Seis Lagos в Бразилии [Giovannini et al., 2017, 2020; Bollaert et al., 2023]. Необходимо отметить, что в коре выветривания по карбонатитам Morros dos Seis Lagos описаны оксиды титана и ниобия, предположительно сформировавшиеся именно в ходе низкотемпературных гидротермальных или гипергенных процессов [Giovannini et al., 2017, 2020; Bollaert et al., 2023].

генезиса, в том числе в ассоциированных со щелочными породами (сиенитами и карбонатитами) или се-

На данный момент отечественными и зарубежными исследователями наработана экспериментальная база по изучению свойств минералов титана и ниобия в широком диапазоне температур и давлений в разных средах, включая растворы кислот и щелочей [Nasraoui, Bilal, 2000; Geisler et al., 2004, 2005a, 2005b; Timofeev et al., 2015; Шаповалов и др., 2019]. Однако в ней отсутствуют экспериментальные работы, моделирующие преобразование в ходе поздних гидротермальных и гипергенных процессов наборов титан-ниобиевых минералов, характерных для карбонатитов и других щелочных пород.

Таким образом, представления о подвижности титана и ниобия и устойчивости их минералов при процессах позднего гидротермального преобразования и выветривания магматических тел противоречивы, а экспериментальные данные для построения надёжных моделей отсутствуют. В этих целях нами была проведена серия экспериментов при 50 и 200 °C по воздействию на смесь рутила, анатаза, пирохлора и луешита растворами кислот HF, HCl, и H₂SO₄, которые принимают участие в позднем гидротермальном преобразовании и (или) выветривании минералов карбонатитов и щелочных пород [Rabbia, Hernandez, 2012; Chakhmouradian et al., 2017; Walter et al., 2021; Wu et al., 2021].

Методика исследований

Из фрагментов керна карбонатитов участка Неске-Вара массива Вуориярви были изготовлены полированные аншлифы, помещенные в эпоксидную смолу. Состав пирохлоров в образцах карбонатитов исследовался методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на сканирующем электронном микроскопе MIRA3 LMU (TESCAN) с системой микроанализа INCA Energy 450+ на базе энергодисперсионного спектрометра X-MAX 80 (Oxford Instruments NanoAnalysis).

Для проведения экспериментов были изготовлены смеси кристаллов рутила (из эклогитов Куру-Ваара, Кольский регион) и анатаза (г. Додо, Приполярный Урал) с кристаллами пирохлора (из карбонатитов массива Себльявр, КЩП) или луешита (из карбонатитов массива Салланлатва, КЩП): рутил, анатаз, пирохлор (RAP) и рутил, анатаз, луешит (RAL). Минералы анализировались до и после экспериментов указанным СЭМ. Навеска минералов каждой разновидности составляла не менее 10 мг. Готовые минеральные смеси помещались в автоклавы закрытого типа из политетрафторэтилена (ПТФЭ) высокого давления объемом 50 мл. К смеси минералов добавлялось 10 мл раствора 1,0 М минеральной кислоты (марок «ос.ч.» для соляной и плавиковой кислот и «х.ч.» для серной кислоты), после чего закрытые автоклавы помещались в нагревательный блок НОТ ВОХ 300 («Сибирские аналитические системы»). Таким образом, всего было приготовлено 12 смесей минералов и растворов кислот (табл. 1, 2). Эксперименты проводились при 50 и 200 °С в течение 4 ч после установления температуры. По окончании экспериментов автоклавы охлаждались до комнатной температуры. Растворы кислот декантировались от смеси минералов и анализировались на содержание элементов методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС) на приборе iCAP Pro XP Duo (Thermo Scientific). Смеси минералов дважды промывались дистиллированной водой и сушились при комнатной температуре на протяжении нескольких часов до полного высыхания для повторного исследования указанным методом сканирующей электронной микроскопии и микрозонда. Аналитические и минералогические исследования проводились в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск).

Результаты исследований и заключение

На основе вещественного состава и структурнотекстурных особенностей было выделено три типа пирохлора в изученных образцах участка Неске-Вара массива Вуориярви. В пирохлорах 1-го и 2-го типа наблюдается осцилляционная зональность: более темные участки характеризуются более высокими содержаниями TiO₂, Ce₂O₃ и Nd₂O₃, а более светлые повышенными содержаниями ВаО. Для пирохлоров 1-го типа характерны повышенные содержания TiO2 (среднее 7 мас. %), CaO (среднее 16 мас. %), Ce₂O₃ (среднее 2,1 мас. %) (табл. 1). Для пирохлоров 2-го типа характерны пониженные содержания TiO₂ (среднее 4 мас. %) и Ce₂O₃ (среднее 1,3 мас. %), повышенные содержания ThO₂ (среднее 3 мас. %) и P_2O_5 (среднее 0,9 мас. %). Пирохлор 3-го типа имеет неравномерную пятнистую зональность: более темные участки содержат больше ТіО2 (среднее 7 мас. %) и Та₂О₅ (среднее 11 мас. %), а более светлые – ВаО (среднее 6 мас. %). Помимо этого, состав пирохлоров 3-го типа отличается отсутствием фтора и наличием серы (среднее содержание SO₃ 8 мас. %), пониженными содержаниями CaO (среднее 4 мас. %), Na₂O (среднее 1 мас. %), Nb₂O (среднее 33 мас. %), и большими содержаниями UO₂ (среднее 15 мас. %), FeO (среднее 3 мас. %) и P₂O₅ (среднее 1,6 мас. %).

Составы исследованных пирохлоров нанесены на дискриминационные диаграммы по количеству формульных единиц Nb–Ti–Ta и Na–Ca–A (А – вакансии и другие катионы) и классифицированы согласно современной номенклатуре пирохлоров [Atencio et al., 2010, 2021].

		Сумма	94 (3)	94 (1)	87 (4)	100,3 (8)	101,0 (15)	98,9 (9)	98,6 (9)	97,6 (23)	100,0(7)	97,2 (9)	100,8 (4)	96,0 (55)	98,5 (25)	97,2 (25)	98,1 (31)	93,5 (27)	99,0 (35)	94,0 (47)	100,4 (27)	аниями
Ę	-	$O=F_2$	1,6(2)	1,6(2)	0,1(2)	I	I	Ι	1,9 (2)	I	I	I	I	I	Ι	19,5 (7)	18,5 (8)	1,7 (2)	1,8 (3)	1,8 (4)	1,6 (3)	и с назн
•		F	3,8(5)	3,7(5)	0,2 (4)	I	I	Ι	4,5 (4)	I	I	I	Ι	Ι	Ι	46,2 (16)	44,0 (20)	4,0 (4)	4,2 (8)	4,4 (10)	3,9 (7)	ирядол
		SO_3	Ι	Ι	8 (6)																	занном
		P_2O_5	Ι	0,9(1)	1,6(9)	I	I	Ι	I	I	I	I	Ι	Ι	I	0.5 (11)	2,3 (22)	I	I	I	I	30B, YKa
		Nd2O3	(0) (0)	0 (0)	0 (0)	I	I	Ι	0,3 (3)	I	I	L	0,5 (3)	Ι	0,0~(1)	0,4 (6)	0,9 (7)	0,6 (1)	0,2 (3)	0,3 (3)	0,2 (3)	анализ
		La2O3	Ι	I	I	I	I	Ι	0,2 (3)	0,8 (0)	0,3 (3)	I	0,1 (2)	Ι	0,2 (3)	0,2 (5)	0,6 (8)	Ι	0,1 (3)	I	0,1 (2)	ичеству
		Ce2O3	2,1 (4)	1,3 (3)	0 (0)	I	I	0,3 (3)	1,1 (5)	0,6 (1)	0,7 (4)	L	0,5 (3)	0,7 (1)	0,4~(4)	1,5 (15)	2,0 (12)	1,7 (5)	1,5 (3)	1,5 (5)	1,3 (5)	по кол
	•	Υ_2O_3	Ι	Ι	Ι	I	I		0,2 (3)	I	0,6 (2)	Ĩ		Ι	0,5 (4)	I	Ι	Ι	0,4 (3)	Ι	0,5 (3)	анного ся.
мас. %	its, wt °	V_2O_3	T	Ι	I	0,8(0)	0,5(2)	Ι	Ι	I	I	I	Ι	Ι	Ι	I	I	Ι	I	I	Ι	рассчит оводил
eнтов, 1	erimen	Ta ₂ O ₅	0(1)	0 (0)	11 (4)	I	I	0,3 (5)	0 (0)	I	0,2 (3)	I	0,3 (6)	Ι	0,1 (2)	I	I	Ι	0,2 (4)	I	0,5 (5)	нента, р ы не пр
иерима	fter exl	Nb2O5	60 (8)	60 (3)	31 (8)	0 (0)	0 (0)	77,2 (18)	63,5 (7)	76,3 (21)	77 (10)	74,4 (18)	76 (2)	72,3 (41)	75,1 (20)	6,8 (31)	4,1 (19)	60,9 (21)	64,1 (27)	62,7 (32)	63,5 (23)	компон
сле экс	e and a	Na ₂ O	6(1)	6(1)	1 (0)	I	I	16,9 (5)	6,3 (4)	16,5 (8)	15,4 (3)	16,1 (7)	16,2 (5)	16,2 (16)	15,4 (5)	2,5 (7)	1,3 (4)	6,4 (11)	6,0 (11)	6,6 (8)	6,0 (5)	жания на ком
оп и от	s before	PbO	(0) (0)	(0) 0	4 (12)	I	Ι	0,6 (5)	0,8(4)	I	0,9 (1)	I	0,8 (2)	Ι	0,8~(4)	Ι	Ι	Ι	0,8 (3)	0,5 (6)	0,5 (5)	о содер анализ
pa.rob	mineral	BaO	(0) 0	0 (0)	6 (5)	I	I	Ι	Η	I	I	I	Ι	Ι	Ι	0,2 (8)	0,2 (3)	Ι	0,4 (9)	0,4 (5)	0,1 (4)	зреднег ает, что
ы мине	ions of 1	SrO	0,4(6)	0,1 (2)	0,3 (9)	I	I	Ι	0,8 (1)	I	0,6 (3)	I	0,5 (3)	Ι	0,5 (3)	1,0 (5)	1,3 (5)	0,5 (4)	1,1 (3)	0,3 (5)	0,8 (4)	знака (к означа
Coctabi	mposit	CaO	16(3)	15 (1)	4 (3)	I	I	1,5 (6)	16,4 (3)	1,6 (6)	1,6 (2)	2,2 (7)	1,9 (7)	2,5 (4)	1,8 (5)	53,9 (49)	55,9 (36)	15,1 (27)	14,1 (31)	14,4 (28)	15,7 (21)	іеднего Ірочері
Ū	C	MgO	Ι	0,1(1)	0,3 (8)	I	I	Ι	Ι	I	I	I,	Ι	Ι	Ι	(5) 6,0	0,3 (3)	Ι	Ι	I	Ι	пя посл ас. %. I
		FeO	(0) (0)	1 (1)	3 (3)	I	I	Ι	0,1 (3)	I	I	I	0,1 (1)	0 (0)	0,1 (3)	1,1 (9)	0,8 (8)	Ι	0,5 (7)	1,0 (9)	0,2 (2)	іение д ± 0,9 м
		UO_2	(0) (0)	0 (0)	15 (5)																	отклон как 1,1
		ThO_2	(0) (0)	3 (1)	0 (1)	I	I	Ι	0,8 (4)	I	0,1 (2)	Í	0,1 (2)	0 (0)	0,1 (3)	0,5 (6)	0,5 (5)	0,8 (5)	1,5 (20)	0,7 (4)	2,9 (28)	(артное читать
		TiO_2	7 (1)	4 (1)	7 (2)	100,0 (9)	100.5 (15)	2,8 (9)	5,6 (2)	2,8 (8)	2,6 (6)	4,2 (8)	$ \begin{array}{c} 3,6 \\ (10) \end{array} $	4,3 (8)	3,4 (9)	0,3 (3)	1,0 (9)	5,6 (10)	(9) (9)	4,7 (13)	4,7 (17)	о станд ледует
		SiO_2	(0) (0)	0 (0)	2,8(42)	I	I	Ι	Ι	0,1 (2)	0,1 (2)	I	0,1 (2)	0,2 (3)	Ι	Ι	Ι	1,1 (11)	0,6 (9)	1,4 (13)	Ι	указан 1.1 (9) с
		Минерал	Пирохпор(5)	Пирохлор (16)	Пирохлор (29)	Рутил (18)	Анатаз (10)	Луешит (16)	Пирохлор (10)	Луешит (4)	Луешит (18)	Луешит (13)	Луешит (40)	Луешит (14)	Луешит (15)	Пирохлор (8)	Пирохлор (28)	Пирохлор (22)	Пирохлор (19)	Флюорит (24)	Флюорит (34)	В скобках например,
			Тип 1	Тип 2	Тип 3	Исходный	Исходный	Исходный	Исходный	HCl, 50 °C	HCl, 200 °C	H ₂ SO ₄ , 50 °C	H₂SO4, 200 °C	HF, 50 °C	HF, 200 °C	HC1, 50 °C	HCl, 200 °C	H ₂ SO ₄ , 50 °C	H₂SO4, 200 °C	HF, 50 °C	HF, 200 °C	<i>Примечание.</i> минералов –

Note. The standard deviation for the last digit of the average component content, calculated from the number of analyzes indicated next to the names of the minerals, is indicated in parentheses – for example, 1.1 (9) should be read as 1.1 ± 0.9 wt %. A dash indicates that component analysis was not performed.

Таблица 1

Таблица 2

Содержание титана и ниобия в исходных смесях и в растворах после экспериментов

Table 2

Content of titanium and niobium in the initial mixtures and in solutions after experiments

		TiO ₂	Nb ₂ O ₅	Ti	Nb	TiO ₂	Nb ₂ O ₅	TiO ₂	Nb ₂ O ₅	TiO ₂	Nb ₂ O ₅
Рас- твор	Минералы	Мг в навеске	Мг в навеске	г/т	г/т	мкг (в p-pe)	мкг (в р- ре)	МГ (в p-pe) / мг (в навеске)	мг (в p-pe) / мг (в навеске)	мг (в p-pe) / мг (в навеске)*100	мг (в p-pe) / мг (в навеске)*100
HCl,	Pcl+Rt+An	22,9	5,8	0,04	0,03	0,67	0,40	0,00003	0,00007	<0,1	<0,1
50 °C	Lue+Rt+An	21,0	9,6	0,035	0,015	0,59	0,20	0,00003	0,00002	<0,1	<0,1
HCl,	Pcl+Rt+An	22,7	5,6	0,33	0,36	5,5	4,8	0,00024	0,00087	<0,1	<0,1
200 °C	Lue+Rt+An	22,0	8,6	0,96	0,14	1,6	1,9	0,00007	0,00022	<0,1	<0,1
H ₂ SO ₄ ,	Pcl+Rt+An	21,3	5,7	0,046	0,19	0,77	2,6	0,00004	0,00045	<0,1	<0,1
50 °C	Lue+Rt+An	21,3	8,6	0,031	0,063	0,52	0,84	0,00002	0,0001	<0,1	<0,1
H ₂ SO ₄ ,	Pcl+Rt+An	25,7	6,9	1,9	18,8	32	250	0,00124	0,03673	0,1	3,7
200 °C	Lue+Rt+An	22,0	8,7	0,46	0,67	7,7	9,0	0,00035	0,00103	<0,1	0,1
HF,	Pcl+Rt+An	21,5	5,5	30	375	500	5000	0,02329	0,91231	2,3	91,2
50 °C	Lue+Rt+An	21,0	8,2	1,7	4,6	28	62	0,00135	0,00755	0,1	0,8
HF,	Pcl+Rt+An	22,4	5,5	44	300	730	4000	0,0328	0,73707	3,3	73,7
200 °C	Lue+Rt+An	23,9	8,2	23	58	380	780	0,01607	0,09525	1,6	9,5

Примечание. Pcl – пирохлор, Rt – рутил, An – анатаз, Lue – луешит.

Note. Pcl - pyrochlore, Rt - rutile, An - anatase, Lue - luesite.





Fig. 1. Plot diagrams of the compositions of pyrochlores from Vuorijärvi carbonatites (types 1, 2, 3 [Sorokhtina et al., 2022] and pyrochlores before and after experiments. Trends are plotted according to [Lumpkin, Ewing, 1995] На дискриминационной диаграмме по содержаниям Nb-Ti-Ta зерна пирохлоров 1-го и 2-го типа преимущественно относятся к пирохлорам с отдельными анализами с повышенным содержанием бетафитового минала, в то время как анализы пирохлора 3-го типа также относятся к составам пирохлора, однако отличаются повышенным содержанием микролитового минала (см. рис. 1).

По содержанию Na-Ca-A точки составов пирохлоров 1-го и 2-го типа концентрируются вдоль оси Na-Ca в области Ca-пирохлоров с небольшим содержанием A, что дает возможность их отнести к магматическим пирохлорам (рис. 1) [Lumpkin, Ewing, 1995], однако отдельные точки составов находятся ближе к стороне Ca-A, что позволяет отнести их уже к гидротермально измененным пирохлорам [Lumpkin, Ewing, 1995]. Также вдоль стороны Ca-A растянулось поле составов пирохлоров 3-го типа, что характерно для гипергенно измененных пирохлоров и позволяет отнести их к кенопирохлорам [Lumpkin, Ewing, 1995].

Полученные данные согласуются с уже опубликованными данными по эволюции состава пирохлоров из карбонатитов Вуориярви [Сорохтина и др, 2022] от магматической стадии к гидротермально измененным и выветрелым разновидностям и в целом воспроизводят тренд, характерный для пирохлоров из карбонатитов мира [Lumpkin, Ewing, 1995].

Исходные кристаллы рутила и анатаза однородны по своему строению и имеют незначительную примесь V₂O₃ 0,8 и 0,5 мас. % соответственно (см. табл. 1). Зерна пирохлора в различных срезах имеют сложную зональность как осцилляционного, так и пятнистого типа, однако вариации состава оказались незначительными. Изученный пирохлор до экспериментов содержал 5,9-7,0 мас. % Na₂O, 16,0-17,0 мас. % CaO, 62,8-64,3 мас. % Nb₂O₅, 5,2-6,1 мас. % TiO₂, 3,5-5,0 мас. % F, 0,5-1,5 мас. % Се₂О₃, 0,6-1,0 мас. % SrO, 0,5-1,6 мас. % ThO₂ и 0,7-1,2 мас. % РbO (табл. 1). В ряде анализов установлено наличие FeO, La₂O₃, Nd₂O₃ и Y₂O₃ (до 1 мас. %). Помимо этого, исследованные кристаллы пирохлора в обилии содержали включения доломита, кальцита, апатита, амфибола, сульфатов (преимущественно барита), а также разнообразных Na-Ca фторидов, хлоридов и фосфатов, что дополнительно подчеркивает высокую активность и важную роль фтора, хлора, сульфатной серы и других летучих в минералообразующей среде, в контакте с которой могут находиться пирохлоры. Исследованный луешит также имеет осцилляционную и секториальную зональность и характеризуется выдержанным химическим составом: 16,3-17,5 мас. % Na₂O, 74,0-79,9 мас. % Nb₂O₅, 1,8–4,5 мас. % ТiO₂ и 1,0–3,0 мас. % СаО (табл. 1). Локально установлено присутствие примесей (до 1 мас. %) Та₂O₅, Ce₂O₃, PbO. Изредка в кристаллах луешита и вокруг них встречаются включения или нарастания единичных кристаллов пирохлора.

Анализы минералов после экспериментов показали, что кристаллы рутила и анатаза оказались устойчивы к химическому воздействию всех растворов кислот как при 50 °C, так и при 200 °C (рис. 1). При этом не обнаружено обогащенных ниобием каём в оксидах титана или отдельных новообразованных фаз ниобия или титана. Основываясь на анализах природных оксидов титана, можно предположить, что причиной этому могло быть недостаточное количество железа в экспериментах, которое может участвовать в процессе изоморфного замещения по схемам $2Ti^{4+} \rightleftharpoons Nb^{5+} + Fe^{3+}$ и $3Ti^{4+} \rightleftharpoons 2Nb^{5+} + Fe^{2+}$ [Werner, Cook, 2001].

Кристаллы луешита также выглядят устойчивыми к воздействию всех растворов кислот, сохранив форму зерен и состав, за исключением эксперимента с плавиковой кислотой при 200 °С, в котором заметны признаки незначительного растворения кристаллов как по краям, так и во внутренней части за счет просачивания кислоты (табл. 1).

В анализах кристаллов пирохлора после контакта с соляной и серной кислотами отмечается снижение содержаний CaO до 8 мас. %, TiO₂ до 2,5 мас. %, Na₂O до 4,5 мас. %, Nb₂O₅ до 58– 61 мас. % (табл. 1). Реакция с плавиковой кислотой привела к интенсивному выщелачиванию пирохлоров и замещению флюоритом как кристаллов самих пирохлоров, так и их включений. Отметим, что в случаях, когда флюорит развивался по пирохлору, в его составе обнаруживаются примеси титана, ниобия, натрия, а когда по апатиту – может присутствовать фосфор (табл. 1).

По сравнению с исследованными пирохлорами из карбонатитов Вуориярви, пирохлоры после экспериментов преимущественно также находятся в области магматических пирохлоров, однако воздействие растворов привело к вариациям содержания компонентов и расширению полей их составов относительно состава исходных пирохлоров до экспериментов (рис. 1). Обращает внимание поле составов пирохлоров после эксперимента с соляной кислотой при 200 °C, которое на дискриманационной диаграмме Na-Ca-A расположилось ближе к вершине A и области составов 3-го типа пирохлоров из карбонатитов Вуориярви, однако не пересекается с ним.

Описанные результаты СЭМ согласуются с результатами анализов составов растворов кислот после экспериментов (см. табл. 2, рис. 2).



Рис. 2. Содержания титана и ниобия в растворах после экспериментов

Fig. 2. Contents of titanium and niobium in solutions after experiments

Растворы соляной кислоты слабо насыщаются титаном и ниобием, однако эффект немного усиливается при повышенной температуре, причем в случае с пирохлором содержания получились в разы выше, чем в экспериментах с луешитом. Растворы серной кислоты также практически не насыщаются титаном и ниобием при 50 °C, однако при 200 °C демонстрируют немного большее насыщение титаном и весьма существенно насыщаются ниобием: в раствор может перейти до 3,7 % исходного Nb₂O₅ в случае реакции с пирохлором и всего 0,1 % при реакции с луешитом. Растворы плавиковой кислоты наиболее интенсивно насыщаются титаном и ниобием: при контакте с пирохлором в раствор может перейти около 2 % TiO₂ при 50 °C и около 3 % TiO₂ при 200 °C, в то время как для Nb2O5 эти показатели составляют около 91 и 74 % соответственно. Однако для образца с луешитом эти показатели составляют уже менее 1 % при 50 °C и 1,6 % для ТіО₂ и 9,5 % для Nb₂O₅ при 200 °C. Проведенные исследования показывают, что растворы низкотемпературных гидротермальных или гипергенных процессов могут значительно влиять на состав минералов титана и ниобия, в особенности пирохлора, а также переносить и переотлагать титан и ниобий, что может приводить к повышению их концентраций в породах.

Однако это зависит от состава и температуры растворов: наибольший эффект достигается в присутствии ионов фтора, а при низкотемпературных гидротермальных процессах агентами массопереноса ниобия и титана также могут быть растворы, обогащенные сульфат-ионами. С учетом того, что в карбонатитах весьма часто обнаруживаются фториды, хлориды, сульфаты и сульфиды, происхождение и участие таких растворов в ходе поздних преобразований карбонатитовых комплексов представляется вполне вероятным.

Список источников

Шаповалов Ю.Б., Чевычелов В.Ю., Коржинская В.С., Котова Н.П., Редькин А.Ф., Конышев А.А. Физико-химические условия образования редкометальных месторождений во фторсодержащих гранитоидных системах по экспериментальным данным // Петрология. 2019. Т. 27, № 6. С. 617–637. doi: 10.31857/S0869-5903276617-637

Сорохтина Н.В., Беляцкий Б.В., Кононкова Н.Н. Неоднородность состава минералов группы пирохлора и возраст редкометальных руд щелочно-ультраосновного с карбонатитами комплекса Вуориярви, Кольский п-ов // Уральская минералогическая школа. 2022. № 28. С. 143–145.

Andersen A.K., Clark J.G., Larson P.B., Neill O.K. Mineral chemistry and petrogenesis of a HFSE(+HREE) occurrence, peripheral to carbonatites of the Bear Lodge alkaline complex, Wyoming // American Mineralogist. 2016. V. 101 (7). P. 1604–1623. doi: 10.2138/am-2016-5532

Atencio D. Pyrochlore-Supergroup Minerals Nomenclature: An Update // Frontiers in Chemistry. 2021. V. 9. doi: 10.3389/fchem.2021.713368

Atencio D., Andrade M.B., Christy A.G., Giere R., Kartashov M. The pyrochlore group of minerals: nomenclature // The Canadian Mineralogist. 2010. V. 48. P. 673–698.

Bollaert Q., Chassé M., Neto A.B., Baptiste B., Courtin A., Galoisy L., Mathon O., Quantin C., Vantelon D., Calas G. Mechanisms leading to exceptional niobium concentration during lateritic weathering: The key role of secondary oxides // Chemical Geology. 2023. V. 641. Article 121767. doi: 10.1016/j.chemgeo.2023.121767

Cann J.R. Rb, Sr, Y, Zr, and Nb in some ocean floor basaltic rocks // Earth and Planetary Science Letters. 1970. V. 10. P. 7–11.

Chakhmouradian A.R., Cooper M.A., Reguir E.P., Moore M.A. Carbocernaite from Bear Lodge, Wyoming: Crystal chemistry, paragenesis, and rare-earth fractionation on a microscale // American Mineralogist. 2017. V. 102 (6). P. 1340–1352. doi: 10.2138/am-2017-6046

Chebotarev D.A., Doroshkevich A.G., Klemd R., Karmanov N.S. Evolution of Nb-mineralization in Chuktukon carbonatite massif, Chadobets upland (Krasnoyarsk territory, Russia) // Periodico di Mineralogia. 2017. V. 86. P. 99–118.

Ewing R.C., Weber W.J., Lian J. Nuclear waste disposal-Пирохлор (A₂B₂O₇): Nuclear waste form for the immobilization of plutonium and "minor" actinides // Journal of Applied Physics. 2004. V. 95. P. 5949–5971.

Geisler T., Berndt J., Meyer H.-W., Pollok K., Putnis A. Low-temperature aqueous alteration of crystalline pyrochlore: correspondence between nature and experiment // Mineralogical Magazine. 2004. V. 68 (6). P. 905–922. doi: 10.1180/0026461046860230

Geisler T., Pöml P., Stephan T., Janssen A., Putnis A. Letter: Experimental observation of an interface-controlled pseudomorphic replacement reaction in a natural crystalline pyrochlore // American Mineralogist. 2005a. V. 90 (10). P. 1683–1687. doi: 10.2138/am.2005.1970

Geisler T., Seydoux-Guillaume A.-M., Poeml P., Golla-Schindler U., Berndt J., Wirth R., Pollok K., Janssen A., Putnis A. Experimental hydrothermal alteration of crystalline and radiation-damaged pyrochlore // Journal of Nuclear Materials. 2005b. V. 344 (1–3). P. 17–23. doi: 10.1016/j.jnucmat.2005.04.009

Giovannini A.L., Bastos Neto A.C., Porto C.G., Pereira V.P., Takehara L., Barbanson L., Bastos P.H.S. Mineralogy and geochemistry of laterites from the Morro dos Seis Lagos Nb (Ti, REE) deposit (Amazonas, Brazil) // Ore Geology Reviews. 2017. V. 88. P. 461–480. doi: 10.1016/j.oregeorev.2017.05.008

Giovannini A.L., Mitchell R.H., Bastos Neto A.C., Moura C.A.V., Pereira V.P., Porto C.G. Mineralogy and geochemistry of the Morro dos Seis Lagos siderite carbonatite, Amazonas, Brazil // Lithos. 2020. V. 360–361. 105433. doi: 10.1016/j.lithos.2020.105433

Hastie A.R., Mitchell S.F., Kerr A.C., Minifie M.J., Millar I.L. Geochemistry of rare high-Nb basalt lavas: Are they derived from a mantle wedge metasomatised by slab melts? // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2011. V. 75. P. 5049–5072.

Kozlov E., Fomina E., Sidorov M., Shilovskikh V. Ti-Nb Mineralization of Late Carbonatites and Role of Fluids in Its Formation: Petyayan-Vara Rare-Earth Carbonatites (Vuoriyarvi Massif, Russia) // Geosciences. 2018. V. 8 (8). P. 281. doi: 10.3390/geosciences8080281

Kurtz A.C., Derry L.A., Chadwick O.A., Alfano M.J. Refractory element mobility in volcanic soils // Geology. 2000. V. 28. P. 683–686. Lapin A.V., Tolstov A.V., Nabelkin O.A., Kulikova I.M. Unique Multicomponent Fe, Mn, Ti, V Mineralization in Laterite Profiles of Weathered Carbonatites: New Prospects // Russian Geology and Geophysics. 2024. doi: 10.2113/RGG20234676

Lumpkin G.R., Ewing R.C. Geochemical alteration of pyrochlore group minerals: pyrochlore subgroup // American Mineralogist. 1995. V. 80. P. 732–743.

Mitchell R.H. Primary and secondary niobium mineral deposits associated with carbonatites // Ore Geology Reviews. 2015. V. 64. P. 626–641. doi: 10.1016/j.oregeorev.2014.03.010

Nasraoui M., Bilal E. Pyrochlores from the Lueshe carbonatite complex (Democratic Republic of Congo): a geochemical record of different alteration stages // Journal of Asian Earth Sciences. 2000. V. 18. P. 237–251.

Rabbia O.M., Hernandez L.B. Mineral chemistry and potential applications of natural-multi-doped hydrothermal rutile from porphyrycopper deposits // Rutile: Properties, Synthesis and Applications, Editor: It-Meng (Jim) Low. 2012. P. 209–228.

Schirra M., Laurent O. Petrochronology of hydrothermal rutile in mineralized porphyry Cu systems // Chemical Geology. 2021. V. 581. 120407. doi: 10.1016/j.chemgeo.2021.120407

Timofeev A., Migdisov Art.A., Williams-Jones A.E. An experimental study of the solubility and speciation of niobium in fluoridebearing aqueous solutions at elevated temperature. // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2015. V. 158. P. 103–111. doi: 10.1016/j.gca.2015.02.015

U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2015: U.S. Geological Survey, 2015. 196 p. doi: 10.3133/70140094

Walter B.F., Giebel R.J., Steele-MacInnis M., Marks M.A.W., Kolb J., Markl G. Fluids associated with carbonatitic magmatism: A critical review and implications for carbonatite magma ascent // Earth-Science Reviews. 2021. V. 215. 103509. doi: 10.1016/j.earscirev.2021.103509

Werner M., Cook N.J. Nb-rich brookite from Gross Brukkaros, Namibia: Substitution mechanisms and Fe²⁺/Fe³⁺ ratios // Mineralogical Magazine. 2001. V. 65. P. 437–440. doi: 10.1180/002646101300119510

Win M.M., Enami M., Kato T., Thu Y.K. A mechanism for Nb incorporation in rutile and application of Zr-in-rutile thermometry: A case study from granulite facies paragneisses of the Mogok metamorphic belt, Myanmar. // Mineralogical Magazine. 2017. V. 81 (6). P. 1503–1521. doi: 10.1180/minmag.2017.081.014

Wu B., Hu Y.Q., Bonnetti C., Xu C., Wang R.C., Zhang Z.S, Li Z.Y., Yin R. Hydrothermal alteration of pyrochlore group minerals from the Miaoya carbonatite complex, central China and its implications for Nb mineralization // Ore Geology Reviews. 2021. V. 132. 104059. doi: 10.1016/j.oregeorev.2021.104059

References

Shapovalov Y.B., Chevychelov V.Y., Korzhinskaya V.S., Kotova N.P., Redkin A.F., Konyshev A.A. Physical and chemical parameters of processes producing rare-metal deposits in granitoid systems with fluorine: experimental data // Petrologiya [Petrology]. 2019. V. 27. pp. 617–637. https://doi.org/10.31857/S0869-5903276617-637. In Russian

Sorokhtina N.V., Belyatskiy B.V., Kononkova N.N. *Neodnorodnost' sostava mineralov gruppy pirokhlora i vozrast redkometal'nykh rud shchelochno-ul'traosnovnogo s karbonatitami kompleksa Vuoriyarvi, Kol'skiy p-ov* [Heterogeneity of the composition of pyrochlore group minerals and the age of rare metal ores of the alkaline-ultrabasic complex with carbonatites of the Vuorijärvi complex, Kola Peninsula] // Ural'skaya mineralogicheskaya shkola. 2022. No. 28. pp. 143–145. In Russian

Andersen A.K., Clark J.G., Larson P.B., Neill O.K. Mineral chemistry and petrogenesis of a HFSE(+HREE) occurrence, peripheral to carbonatites of the Bear Lodge alkaline complex, Wyoming // American Mineralogist. 2016. V. 101(7). pp. 1604–1623. https://doi.org/10.2138/am-2016-5532

Atencio D. Pyrochlore-Supergroup Minerals Nomenclature: An Update. // Frontiers in Chemistry. 2021. V. 9. https://doi.org/10.3389/fchem.2021.713368

Atencio D., Andrade M.B., Christy A.G., Giere R., Kartashov M. The pyrochlore group of minerals: nomenclature // The Canadian Mineralogist. 2010. V. 48. pp. 673–698.

Bollaert Q., Chassé M., Neto A.B., Baptiste B., Courtin A., Galoisy L., Mathon O., Quantin C., Vantelon D., Calas G. Mechanisms leading to exceptional niobium concentration during lateritic weathering: The key role of secondary oxides // Chemical Geology. 2023. V. 641. 121767. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2023.121767

Cann J.R. Rb, Sr, Y, Zr, and Nb in some ocean floor basaltic rocks. // Earth and Planetary Science Letters. 1970. V. 10. pp. 7–11.

Chakhmouradian A.R., Cooper M.A., Reguir E.P., Moore M.A. Carbocernaite from Bear Lodge, Wyoming: Crystal chemistry, paragenesis, and rare-earth fractionation on a microscale // American Mineralogist. 2017. V. 102(6). pp. 1340–1352. https://doi.org/10.2138/am-2017-6046

Chebotarev D.A., Doroshkevich A.G., Klemd R., Karmanov N.S. Evolution of Nb-mineralization in Chuktukon carbonatite massif, Chadobets upland (Krasnoyarsk territory, Russia) // Periodico di Mineralogia. 2017. V. 86. pp. 99–118.

Ewing R.C., Weber W.J., Lian J. Nuclear waste disposal-Пирохлор (A2B2O7): Nuclear waste form for the immobilization of plutonium and "minor" actinides. // Journal of Applied Physics. 2004. V. 95. pp. 5949–5971.

Geisler T., Berndt J., Meyer H.-W., Pollok K., Putnis A. (2004) Low-temperature aqueous alteration of crystalline pyrochlore: correspondence between nature and experiment // Mineralogical Magazine. 2004. V. 68(6). pp. 905–922. https://doi.org/10.1180/0026461046860230

Geisler T., Pöml P., Stephan T., Janssen A., Putnis A. Letter: Experimental observation of an interface-controlled pseudomorphic replacement reaction in a natural crystalline pyrochlore // American Mineralogist. 2005. V. 90(10). pp. 1683–1687. https://doi.org/10.2138/am.2005.1970

Geisler T., Seydoux-Guillaume A.-M., Poeml P., Golla-Schindler U., Berndt J., Wirth R., Pollok K., Janssen A., Putnis A. Experimental hydrothermal alteration of crystalline and radiation-damaged pyrochlore // Journal of Nuclear Materials. 2005. V. 344(1–3). pp. 17–23, ISSN 0022-3115, https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2005.04.009.

Giovannini A.L., Bastos Neto A.C., Porto C.G., Pereira V.P., Takehara L., Barbanson L., Bastos P.H.S. Mineralogy and geochemistry of laterites from the Morro dos Seis Lagos Nb (Ti, REE) deposit (Amazonas, Brazil) // Ore Geology Reviews. 2017. V. 88. pp. 461–480, ISSN 0169-1368. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.05.008.

Giovannini A.L., Mitchell R.H., Bastos Neto A.C., Moura C.A.V., Pereira V.P., Porto C.G. Mineralogy and geochemistry of the Morro dos Seis Lagos siderite carbonatite, Amazonas, Brazil // Lithos. 2020. V. 360–361. 105433. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105433.

Hastie A.R., Mitchell S.F., Kerr A.C., Minifie M.J., Millar I.L. Geochemistry of rare high-Nb basalt lavas: Are they derived from a mantle wedge metasomatised by slab melts? // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2011. V. 75. pp. 5049–5072.

Kozlov E., Fomina E., Sidorov M., Shilovskikh V. Ti-Nb Mineralization of Late Carbonatites and Role of Fluids in Its Formation: Petyayan-Vara Rare-Earth Carbonatites (Vuoriyarvi Massif, Russia) // Geosciences. 2018. V. 8(8). pp. 281. https://doi.org/10.3390/geosciences8080281

Kurtz A.C., Derry L.A., Chadwick O.A., Alfano M.J. Refractory element mobility in volcanic soils // Geology. 2000. V. 28. pp. 683–686.

Lapin A.V., Tolstov A.V., Nabelkin O.A., Kulikova I.M. Unique Multicomponent Fe, Mn, Ti, V Mineralization in Laterite Profiles of Weathered Carbonatites: New Prospects // Russian Geology and Geophysics. 2024. 65 (8). pp. 927–935. https://doi.org/10.2113/RGG20234676

Lumpkin G.R., Ewing R.C. Geochemical alteration of pyrochlore group minerals: pyrochlore subgroup // American Mineralogist. 1995. V. 80. pp. 732–743.

Mitchell R.H. Primary and secondary niobium mineral deposits associated with carbonatites // Ore Geology Reviews. 2015. V. 64. pp. 626–641. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.03.010

Nasraoui M., Bilal E. Pyrochlores from the Lueshe carbonatite complex (Democratic Republic of Congo): a geochemical record of different alteration stages // Journal of Asian Earth Sciences. 2000. V. 18. pp. 237–251.

Rabbia O.M., Hernandez L.B. Mineral chemistry and potential applications of natural-multi-doped hydrothermal rutile from porphyrycopper deposits. // Rutile: Properties, Synthesis and Applications, Editor: It-Meng (Jim) Low. 2012. ISBN 978-1-61942-233-9. pp. 209–228.

Schirra M., Laurent O. Petrochronology of hydrothermal rutile in mineralized porphyry Cu systems // Chemical Geology. 2021. V. 581. 120407. ISSN 0009-2541. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120407

Timofeev A., Migdisov Art.A., Williams-Jones A.E. An experimental study of the solubility and speciation of niobium in fluoridebearing aqueous solutions at elevated temperature // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2015. V. 158. pp. 103–111. ISSN 0016-7037. https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.02.015

U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2015: U.S. Geological Survey. 2015. 196 p. http://dx.doi.org/10.3133/70140094

Walter B.F., Giebel R.J., Steele-MacInnis M., Marks M.A.W., Kolb J., Markl G. Fluids associated with carbonatitic magmatism: A critical review and implications for carbonatite magma ascent // Earth-Science Reviews. 2021. V. 215. 103509. ISSN 0012–8252. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103509

Werner M., Cook N.J. Nb-rich brookite from Gross Brukkaros, Namibia: Substitution mechanisms and Fe2+/Fe3+ ratios // Mineralogical Magazine. 2001. V. 65. pp. 437–440. https://doi.org/10.1180/002646101300119510

Win M.M., Enami M., Kato T., Thu, Y.K. A mechanism for Nb incorporation in rutile and application of Zr-in-rutile thermometry: A case study from granulite facies paragneisses of the Mogok metamorphic belt, Myanmar // Mineralogical Magazine. 2017. V. 81 (6). pp. 1503–1521. https://doi.org/10.1180/minmag.2017.081.014

Wu B., Hu Y.Q., Bonnetti C., Xu C., Wang R.C., Zhang Z.S, Li Z.Y., Yin R. Hydrothermal alteration of pyrochlore group minerals from the Miaoya carbonatite complex, central China and its implications for Nb mineralization // Ore Geology Reviews. 2021. V. 132. 104059. ISSN 0169-1368. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104059

Информация об авторах:

Чеботарев Д.А., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия. E-mail: chebotarev@igm.nsc.ru Сарыг-оол Б.Ю., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия. E-mail: sarygool@igm.nsc.ru Козлов Е.Н., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Геологический институт, Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия. E-mail: kozlov e.n@mail.ru Фомина Е.Н., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Геологический институт, Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия. E-mail: fomina e.n@mail.ru Сидоров М.Ю., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Геологический институт, Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия. E-mail: sidorov@geoksc.apatity.ru Редина А.А., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия. E-mail: redina@igm.nsc.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors:

Chebotarev D.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: chebotarev@igm.nsc.ru

Saryg-ool B.Yu., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: sarygool@igm.nsc.ru

Kozlov E.N., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, Geological Institute, Kola Science Center, RAS, Apatity, Russia.

E-mail: kozlov_e.n@mail.ru

Fomina E.N., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, Geological Institute, Kola Science Center, RAS, Apatity, Russia E-mail: fomina e.n@mail.ru

Sidorov M.Yu., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, Geological Institute, Kola Science Center, RAS, Apatity, Russia.

E-mail: sidorov@geoksc.apatity.ru

Redina A.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: redina@igm.nsc.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 02.06.2024; одобрена после рецензирования 03.08.2024; принята к публикации 27.09.2024

The article was submitted 02.06.2024; approved after reviewing 03.08.2024; accepted for publication 27.09.2024

Научная статья УДК 548.4+552.33 doi: 10.17223/25421379/32/9

ВЫСОКОНАТРОВЫЕ КАРБОНАТЫ И КАРБОНАТ-ФОСФАТЫ В ПОРОДАХ ЩЕЛОЧНО-КАРБОНАТИТОВЫХ МАССИВОВ ЧУКТУКОН И СРЕДНЯЯ ЗИМА: ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ В ПИРИТЕ



Виктор Викторович Шарыгин¹

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия, sharygin@igm.nsc.ru

Аннотация. Представлен обзор недавних находок Na-Ca-карбонатов («ньеререит», шортит, пирссонит), Na-карбонатфосфатов (бонштедтит, брэдлиит) и Na-Ba-REE-карбонатов (кордилит-(Ce), кухаренкоит-(Ce)), выявленных во включениях в пирите из пород двух щелочно-карбонатитовых массивов России (Чуктукон, Средняя Зима). Приводятся данные по химическому составу и рамановской спектроскопии для этих редких минералов. В пирите кальциокарбонатитов Чуктуконского массива были выявлены одиночные включения брэдлиита и полиминеральные Na-Ca-карбонатные включения («ньеререит» + шортит ± пирссонит \pm бурбанкит \pm арканит \pm кальцит \pm тайниолит). «Ньеререит» (Na,K)₂Ca(CO₃)₂ существенно обогащен K₂O (до 11 мас. %) и SO₃ (до 1 мас. %), является первичной фазой включений, а шортит и пирссонит – более поздние фазы или продукты преобразования «ньеререита». Брэдлиит Na₃Mg(CO₃)(PO₄) из Чуктукона значительно варьирует в разных породах по содержанию других миналов, бонштедтита Na₃Fe(CO₃)(PO₄) и сидоренкита Na₃Mn(CO₃)(PO₄). Состав бонштедтита из включений в пирите карбонатно-силикатных пород Средней Зимы также сильно варьирует, но по содержанию брэдлиитового и сидоренкитового миналов. Кордилит-(Се) кухаренкоит-(Се) ИЗ карбонатно-силикатных пород Средней Зимы имеют слелующие формулы и

Ключевые слова: шортит, ньеререит, пирссонит, бонштедтит, брэдлиит, кордилит-(Се), кухаренкоит-(Се), щелочно-карбонатитовые массивы, карбонатиты, карбонатно-силикатные породы, Чуктукон, Средняя Зима

Источник финансирования: петрографические исследования и сканирующая микроскопия выполнены за счет гранта РНФ № 23-17-00098. КР-спектроскопия минералов была изучена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН (FWZN-2022-0035, № 122041400312-2).

Для цитирования: Шарыгин В.В. Высоконатровые карбонаты и карбонат-фосфаты в породах щелочно-карбонатитовых массивов Чуктукон и Средняя Зима: по данным изучения включений в пирите // Геосферные исследования. 2024. № 3. С. 87–100. doi: 10.17223/25421379/32/9

Original article doi: 10.17223/25421379/32/9

SODIUM-RICH CARBONATES AND CARBONATE-PHOSPHATES IN ROCKS OF CHUKTUKON AND SREDNIA ZIMA ALKALINE-CARBONATITE MASSIFS: DATA ON STUDY OF INCLUSIONS IN PYRITE

Victor V. Sharygin¹

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia, sharygin@igm.nsc.ru

Abstract. The article is devoted to recent findings of Na-Ca-carbonates ("nyerereite", shortite, pirssonite), Na-carbonate-phosphates (bonshtedtite, bradleyite) and Na-Ba-REE-carbonates (cordylite-(Ce), kukharenkoite-(Ce)), observed in pyrite-hosted inclusions from rocks of two Russian alkaline-carbonatite massifs (Chuktukkon, Srednia Zima). Data on chemical composition and Raman spectroscopy for these rare minerals are given. Pyrite for the Chuktukon calciocarbonatite contains single inclusions of bradleyite and polymineralic Na-Ca-carbonate inclusions ("nyerereite" + shortite \pm pirssonite \pm burbankite \pm arcanite \pm calcite \pm tainiolite). "Nyerereite" (Na,K)₂Ca(CO₃)₂ is essentially enriched in K₂O (up to 11 wt %) and SO₃ (up to 1 wt %) and it is a primary phase of the inclusions, whereas shortite and pirssonite are later phases of the inclusions and seem to be products of "nyerereite" transformation. Bradleyite Na₃Mg(CO₃)(PO₄) from the Chuktukon rocks is drastically varied in the content of other end-members, bonshtedtite Na₃Fe(CO₃)(PO₄) and sidorenkite Na₃Mn(CO₃)(PO₄). Composition of bonshtedtite from the pyrite-hosted inclusions in the Srednia Zima carbonate-silicate rocks is also strongly varied, but in the contents of the bradleyite and sidorenkite end-members. Cordylite-(Ce) and kukharenkoite-(Ce) from Srednia Zima carbonate-silicate rocks have the following formulas: (Na_{0.5}Ca_{0.5})Ba_{1.0}(*LREE*_{1.6}Sr_{0.3}Fe_{0.1})(CO₃)_{3.98}(SO₄)_{0.02} (F_{0.7}OH_{0.2}O_{0.1}) and (Ba_{1.9}Sr_{0.05}Ca_{0.05})(*LREE*_{0.98}Ca_{0.02})(CO₃)₃ (F_{0.91}OH_{0.03}O_{0.02}).

Keywords: shortite, nyerereite, pirssonite, bonshtedtite, bradleyite, cordylite-(Ce), kukharenkoite-(Ce), alkaline-carbonatite intrusions, carbonatites, carbonate-silicate rocks, Chuktukon, Srednia Zima

Source of financing: The petrographic and scanning microscopy investigations were supported by the Russian Science Foundation (N_{2} 23-17-00098). The Raman spectroscopic studies of minerals were done according to state assignment of IGM SB RAS (FWZN-2022-0035, N_{2} 122041400312-2).

For citation: Sharygin V.V. (2024) Sodium-rich carbonates and carbonate-phosphates in rocks of Chuktukon and Srednia Zima alkaline-carbonatite massifs: data on study of inclusions in pyrite. *Geosfernye issledovaniya* – *Geosphere Research*. 3. pp. 87–100. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/32/9

Введение

Высоконатровые карбонаты («ньеререит», шортит, нортупит, эйтелит и др.) и Na-карбонат-фосфаты (бонштедтит, брэдлиит) в последнее время достаточно часто находят при изучении включений в минералах щелочно-карбонатитовых комплексов [Kogarko et al., 1991; Nielsen et al., 1997; Veksler et al., 1998; Михайлова 2002; И дp., Zaitsev, Chakhmouradian, 2002; Panina, 2004; Zaitsev et al., 2004, 2015; Соколов и др., 2006; Andreeva et al., 2006; Stoppa et al., 2009; Шарыгин и др., 2011; Chen et al., 2013; Andreeva, 2014; Шарыгин, 2016; Sharygin, Doroshkevich, 2017; Potter et al., 2020; Chayka et al., 2021; 2023; Doroshkevich et al., 2021; Kamenetsky et al., 2021; Kozlov et al., 2021; Prokopyev et al., 2021; Шарыгин, Дорошкевич, 2022; 2023]. При этом их выявляют в таких минералах, как оливин, магнетит, ильменит, бадделиит, циркон, перовскит, флюорит, которые рассматриваются как относительно «надежные контейнеры», предохраняющие Na-карбонаты от воздействия постмагматических и вторичных процессов.

Однако недавно стали обращать внимание и на такой «не очень надежный» минерал как пирит, который иногда присутствует в значительных количествах в породах щелочно-карбонатитовых комплексов. Этот сульфид в таких ассоциациях является первичным и также может содержать щелочно-карбонатные включения [Zaitsev et al., 2004; Kozlov et al., 2021; Шарыгин, Дорошкевич, 2023].

Данная работа посвящена обзору недавних находок Na-Ca-карбонатов (шортит, «ньеререит», пирссонит), Na-карбонат-фосфатов (бонштедтит, брэдлиит) и Na-Ba-REE-карбонатов (кордилит-(Ce), кухаренкоит-(Ce)), выявленных во включениях в пирите из пород двух щелочно-карбонатитовых массивов России (Чуктукон, Средняя Зима), которые располагаются в обрамлении Сибирской платформы.

Методы исследования

Для исследований была выбрана коллекция керновых образцов пород Чуктуконского и Среднезиминского массивов, собранная сотрудниками лаборатории рудоносности щелочного магматизма ИГМ СО РАН (А.Г. Дорошкевич, И.Р. Прокопьев, И.А. Избродин и др.) во время полевых работ в 2015–2023 гг. Тонкие полированные пластинки пород были использованы для изучения текстурно-структурных характеристик и минерального состава пород, а также химического состава минералов посредством оптической и сканирующей микроскопии и рамановской спектроскопии в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск).

Петрографическое изучение пород проводилось на микроскопе Olympus BX51 с фотокамерой. Фотографии в обратно-рассеянных электронах (BSE), элементные карты, качественный и количественный анализ минералов (по энергодисперсионным спектрам, EDS метод, время набора – 20 с) были выполнены на сканирующем микроскопе TESCAN MIRA3 LMU (система микроанализа INCA Energy450 XMax-80). В качестве стандартов для большинства элементов были использованы простые оксиды, чистые металлы и стехиометричные минералы (силикаты): кварц (Si, O), корунд (Al), Ti^o, Fe^o, Mn^o, Co^o, Ni^o, диопсид (Ca, Mg), Cr₂O₃ (Cr), Ca₂P₂O₇ (P), Cs₂ReCl₆ (Cl), альбит NaAlSi₃O₈ (Na), ортоклаз KAlSi₃O₈ (K), FeS₂ (S) и др. Условия съемки: V = 20 кВ, I = 1 нА. Для количественной оптимизации (нормировка на ток зонда и калибровка спектрометра по энергии) применялся Со°. Для количественного анализа подбирались зерна размером более чем 5 × 5 микрон.

Карбонатные минералы были исследованы рамановским методом с помощью спектрометра LabRAM HR 800 мм (Horiba Scientific), соединенного с ССД детектором и конфокальным микроскопом Olympus BX40 (объектив ×100). Линия 514,5 нм от Nd:YAG лазера и мощность 50 мВт использовались для возбуждения образца. Параметры съемки: 10 накоплений по 10–15 с, фокальная диафрагма 200 мкм. Спектры были зарегистрированы в интервале 100–1 200 и 3 000–3 800 см⁻¹. Монохроматор был откалиброван по рамановской линии рассеяния для кремния (520,7 см⁻¹).

Следует отметить, что с целью набора большей информации по щелочно-карбонатным включениям каждый выбранный образец дважды подвергался шлифованию и полировке. На финальной стадии обработки (доводка на тонких абразивных порошках и шкурках, полировка алмазными пастами) в качестве жидкости, очищающей поверхность образца, использовался этанол, что минимизировало разрушение фаз, неустойчивых в водных средах.

Исследованные образцы

Как отмечалось выше, щелочно-карбонатитовые массивы Чуктукон и Средняя Зима располагаются в обрамлении Сибирской платформы и представляют собой потенциально промышленные объекты на редкие металлы, такие как Ta, Nb, U и REE.

Чуктуконский массив является частью Чадобецского щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса (Чуктуконский и Териновский массивы), который располагается в пределах Чадобецкого поднятия (бассейн р. Чадобец, Красноярский край, югозападная часть Сибирского кратона). Карбонатиты, мелилититы и ультраосновные лампрофиры (айликиты, дамтьерниты) представляют основные разновидности пород этого массива [Doroshkevich et al., 2019; 2021]. Возраст пород существенно варьирует: от 256,7±1,1 и 252±12 млн лет (U-Pb возраст, циркон из дамтьернитов и перовскит из мелилититов соответственно) до 231±2,7 млн лет (Ar-Ar возраст, риппит из кальциокарбонатитов) [Chebotarev et al., 2017; Doroshkevich et al., 2021]. Для исследования включений в пирите были отобраны два образца кальциокарбонатита из керна скважины № 539, глубина 151-158 м (рис. 1). Кальцит является главным минералом в этих средне- и мелкозернистых породах, в меньшем количестве встречаются доломит, пирит и кварц. Второстепенные и акцессорные фазы представлены минералами группы пирохлора (фторкальциопирохлор, кено- и гидропирохлоры с PbO до 3-33 мас. %), баритом, Ca-REE-фторкарбонатами, риппитом, тайниолитом, карбонат-фторапатитом и др. (табл. S1). Взаимоотношения минералов показывают, что пирит является первично-магматической фазой (рис. 1). Изученные образцы являются более свежими в сравнении с кальциокарбонатитами, в которых был впервые описан редкий шиклосиликат риппит К2(Nb,Ti)2(Si4O12)(O,F)2 [Sharygin et al., 2020], по отсутствию Ва-Мп-минерализации и гётита, а также по малому количеству карбонат-фторапатита.

Щелочно-карбонатитовый массив Средняя Зима входит в состав Восточно-Саянской (Зиминской) щелочно-карбонатитовой провинции на юге Сибирского кратона [Пожарицкая, Самойлов, 1972; Савельева и др., 2020; Прокопьев и др., 2024].

Массив преимущественно сложен карбонатитами, и выделяют несколько их разновидностей, которые

сформировались в следующей последовательности: кальциокарбонатиты — доломит-кальцитовые карбонатиты → анкеритовые карбонатиты [Пожарицкая, Самойлов, 1972; Прокопьев и др., 2024]. Силикатные породы (пироксениты, мельтейгиты, ийолиты и др.) присутствуют в подчиненном количестве. Возраст пород составляет 637±4 млн лет (U-Pb возраст, циркон из кальциокарбонатитов) [Прокопьев и др., 2024]. Для исследования включений в пирите были отобраны два образца карбонатно-силикатных пород из керна (рис. 1). Эти среднезернистые породы содержат варьирующие содержания карбонатов (в основном кальцит, доломит в подчиненном количестве), силикатов (полевые шпаты, слюда, реже циркон, клинопироксен) и сульфидов (главным образом пирит). Второстепенные и акцессорные фазы представлены минералами группы пирохлора (фторкальциопирохлор, кено- и гидропирохлоры, Ta₂O₅ – до 11 мас. %, UO₂ – до 6 мас. %), Са-REE-фторкарбонатами, бурбанкитом, гидроксил-фторапатитом, ильменитом, колумбитом-(Fe), **Fe-хлоритом**, реже серпентином (табл. S1¹). В целом по минеральному составу эти породы напоминают фениты, распространенные в пределах массива Средняя Зима [Пожарицкая, Самойлов, 1972]. Не исключено, что исследованные образцы представляют собой метасоматические породы, образовавшиеся за счет фенитизации вмещающих пород Среднезиминского массива. При этом пирит является первичной фазой в этих породах, а не продуктом наложенной минерализации.

Щелочно-карбонатные включения в пирите

Щелочно-карбонатные включения (размер 5– 50 µm) в пирите кальциокарбонатитов Чуктукона по фазовому составу можно разделить на моно- и полиминеральные включения (рис. 2, 3). Карбонат-фосфаты (брэдлиит, Na₃Mg(CO₃)(PO₄)), как правило, образуют одиночные мономинеральные включения и очень редко присутствуют в полиминеральных включениях (рис. 2). Для ассоциации Na-Ca-карбонатов («ньеререит» Na₂Ca(CO₃)₂ + шортит Na₂Ca₂(CO₃)₃ + пирссонит Na₂Ca(CO₃)₂·H₂O) более характерны полиминеральные включения (рис. 2, 3), но иногда встречаются одиночные включения шортита и пирссонита.

Помимо главных Na-Ca-карбонатов в полиминеральных включениях присутствуют бурбанкит (Na,Ca)₃(Sr,Ba,Ce)₃(CO₃)₅, арканит K₂(SO₄), кальцит, иногда магнетит и тайниолит KMg₂Li(Si₄O₁₀)F₂ (рис. 3, S1, S2). Следует отметить, что в отраженном свете большинство фаз слабо различимы, но хорошо

¹ Данные приложения (табл. S1, puc. S1, S2) высылаются при обращении к автору по электронной почте sharygin@igm.nsc.ru.

выделяются на BSE-картинках и элементных картах (рис. S1, S2). Помимо щелочно-карбонатных включений в пирите кальциокарбонатитов Чуктукона в качестве кристаллических включений постоянно присутствуют кальцит, доломит, кварц, флюорит, сульфиды (пирротин, халькопирит, галенит, сфалерит), тайниолит и минералы группы пирохлора, т.е. все основные и второстепенные минералы этих пород (рис. 2).

В пределах массива Чуктукон щелочно-карбонатные включения были ранее выявлены в цирконах из разных пород [Doroshkevich et al., 2021].



Рис. 1. Пирит-содержащие породы Чуктуконского и Среднезиминского массивов (полированные шлифы, проходящий свет)

Условные обозначения: Сс – кальцит, Dol – доломит, Руг – пирит, Ар – карбонат-фторапатит, Kfs – калишпат, Ab – альбит, Zrc – циркон, Ann – аннит, Ae – эгирин

Fig. 1. Pyrite-containing rocks from the Chuktukon and Srednia Zima massifs (polished thin sections, ordinary light)

Abbreviations: Cc – calcite, Dol – dolomite, Pyr – pyrite, Ap – carbonate-fluorapatite, Kfs – potassic feldspar, Ab – albite, Zrc – zircon, Ann – annite, Ae – aegirine



Рис. 2. Мономинеральные включения брэдлиита в пирите из кальциокарбонатитов Чуктуконского массива, BSE фотографии

Условные обозначения: Руг – пирит, Brd – брэдлиит, Cc – кальцит, Dol – доломит, Qu – кварц, Syn – синхизит-(Ce) + паризит-(Ce), Sph – сфалерит

Fig. 2. Pyrite-hosted monomineralic inclusions of bradleyite in the Chuktukon massif calciocarbonatites, BSE images

Abbreviations: Pyr – pyrite, Brd – bradleyite, Cc – calcite, Dol – dolomite, Qu – quartz, Syn – synchysite-(Ce) + parisite-(Ce), Sph – sphalerite



Рис. 3. Полиминеральные и мономинеральные Na-Ca-карбонатные включения в пирите из кальциокарбонатитов Чуктуконского массива, BSE фотографии

Условные обозначения: Shrt – шортит, Nye – «ньеререит», Pirs – пирссонит, Brb – бурбанкит, Arc – арканит, Cc – calcite, Tai – тайниолит, Fl – флюорит, Syn – синхизит-(Ce)

Fig. 3. Pyrite-hosted polymineralic and monomineralic Na-Ca-carbonate inclusions in the Chuktukon massif calciocarbonatites, BSE images

Abbreviations: Shrt – shortite, Nye – "nyerereite", Pirs – pirssonite, Brb – burbankite, Arc – arcanite, Cc – calcite, Tai – tainiolite, Fl – fluorite, Syn – synchysite-(Ce)

На Среднезиминском массиве (Восточно-Саянская провинция) включения щелочных карбонатов были выявлены в пирите карбонатно-силикатных пород. Na-Ca-карбонатные включения в нем не обнаружены, зато встречаются включения бонштедтита Na₃Fe(CO₃)(PO₄). Этот минерал образует одиночные включения (размер 10–80 µm), реже ассоциации с фторапатитом (рис. 4). В пределах минерала-хозяина включения с бонштедтитом обычно ассоциируют с включениями силикатов (калишпат, альбит, аннит), карбонатов (кальцит, стронцианит, бастнезит-(Ce)), сульфидов (пирротин, халькопирит, сфалерит), фосфатов (фторапатит, монацит-(Ce)) и минералов группы пирохлора [Шарыгин, Дорошкевич, 2023]. Следует отметить, что щелочно-карбонатные включения в минералах пород Восточно-Саянской щелочной провинции ранее отмечались в оливине и магнетите карбонатитов массива Белая Зима [Andreeva, 2014; Sharygin, Doroshkevich, 2017], во флюорите фторкарбонатитов массива Большая Тагна [Andreeva et al., 2006], в магнезиохромите айлликитов трубки Южная [Шарыгин, Дорошкевич, 2022].

В пирите некоторых среднезиминских карбонатносиликатных пород были выявлены одиночные включения редких карбонатов, кордилита-(Ce) NaBaCe₂(CO₃)₄F и кухаренкоита-(Ce) Ba₂Ce(CO₃)₃F (рис. 5). Эти минералы в пределах минерала-хозяина обычно ассоциируют со стронцианитом и Ca-REE-фторкарбонатами.



Рис. 4. Бонштедтит во включениях в пирите карбонат-силикатных порода массива Средняя Зима, BSE фотографии

Условные обозначения: Руг – пирит, Bnsh – бонштедтит, Kfs – калишпат, Ab – альбит, Chl – Fe-хлорит, Ann – аннит, llm – ильменит, Ap – гидроксил-фторапатит

Fig. 4. Bonshtedtite in pyrite-hosted inclusions from the carbonate-silicate rocks of the Srednia Zima massif, BSE images Abbreviations: Pyr – pyrite, Bnsh – bonshtedtite, Kfs – potassic feldspar, Ab – albite, Chl – Fe-chlorite, Ann – annite, Ilm – ilmenite, Ap – hydroxyl-fluorapatite



Рис. 5. Кордилит-(Ce) и кухаренкоит-(Ce) во включениях в пирите карбонатно-силикатных пород массива Средняя Зима, BSE фотографии

Условные обозначения: Руг – пирит, Crd – кордилит-(Ce), Prs – паризит-(Ce), Syn – синхизит-(Ce), Mnz – монацит-(Ce), Bsn – бастнезит-(Ce), Str – стронцианит, Chl – Fe-хлорит, Khr – кухаренкоит-(Ce)

Fig. 5. Cordylite-(Ce) and kukharenkoite-(Ce) as pyrite-hosted inclusions in carbonate-silicate rocks of the Srednia Zima massif, BSE images

Abbreviations: Pyr – pyrite, Crd – cordylite-(Ce), Prs – parisite-(Ce), Syn – synchysite-(Ce), Mnz – monazite-(Ce), Bsn – bastnäsite-(Ce), Str – strontianite, Chl – Fe-chlorite, Khr – kukharenkoite-(Ce)

Химический состав щелочно-карбонатных включений

Состав индивидуальных фаз во включениях определялся посредством сканирующей микроскопии. К сожалению, из малых размер фаз не всегда удавалось получить их корректный химический анализ изза захвата соседних минеральных фаз и минерала-хозяина (пирит). Тем не менее такие анализы использовались только для идентификации фаз совместно с элементными картами (см. рис. 2–5, S1, S2) и рамановской спектроскопией.

В табл. 1 приведены представительные анализы Na-Ca-карбонатов из наиболее крупных включений в пирите из кальциокарбонатитов Чуктукона. Следует отметить, что их составы достаточно трудно различить в виду относительно близких концентраций Na₂O и CaO, и в первую очередь это касается пирссонита Na₂Ca(CO₃)₂·H₂O и «ньеререита» Na₂Ca(CO₃)₂ с низким содержанием K₂O. По рамановским спектрам все три фазы («ньерерит», шортит, пирссонит) достаточно четко различаются по набору пиков в области валентных колебаний (CO₃)-групп (рис. 6). В целом совокупность двух методов (сканирующая и рамановская микроскопия) позволяет четко различить Na-Caкарбонатные фазы. Немного хотелось бы сказать о «ньеререите». Для соединений состава Na₂Ca(CO₃)₂ существуют две модификации (низкотемпературная – ньеререит, высокотемпературная – земкорит). Между ними существует обратный фазовый переход по температуре. К сожалению, обе эти фазы практически неразличимы по химическому составу, КР-спектроскопии и другим характеристикам. Все это препятствует четкой диагностики чуктоконской фазы, поэтому мы использовали кавычки, подразумевая, что она может быть как ньеререитом, так и земкоритом.

«Ньеререит» (Na,K)₂Ca(CO₃)₂ из щелочно-карбонатных включений в пирите карбонатитов Чуктукона характеризуется значительными вариациями состава, в первую очередь K₂O (4,1–11,0 мас. %) и SO₃ (0,1–1,0 мас. %). При этом наблюдается корреляция между K₂O и CaO: с повышением содержаний K₂O понижаются концентрации CaO, а количества Na₂O примерно постоянны (табл. 1). В «ньеререитах» также фиксируются относительно высокие концентрации SrO (0,6–1,2 мас. %).

Химический состав Na-Ca-карбонатов из кальциокарбонатитов массива Чуктукон, мас. %

Таблица 1 Table 1

										14010 1				
Chemical composition of Na-Ca-carbonates from the Chuktukon massif calciocarbonatites, wt %														
Образец	п	Минерал	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	SrO	FeO	MnO	SO ₃	Сумма				
151-2	3	Shrt	20,44	0,53	34,64	0,59	0,64	0,00	0,00	56,85				
151-3-2	6	Nye	19,44	5,62	31,25	1,22	0,62	0,05	0,85	59,05				
151-3-4	9	Pirs	27,63	0,55	26,84	0,04	0,41	0,00	0,00	55,47				
158-8	2	Nye	20,35	10,71	25,74	0,32	0,51	0,00	0,38	58,01				
158-8	5	Shrt	19,36	0,57	34,91	0,61	0,33	0,00	0,00	55,78				
158-12	2	Pirs	25,89	0,14	27,65	0,00	0,44	0,00	0,00	54,11				

Примечание. n – число анализов. Shrt – шортит, Nye – «ньеререит», Pirs – пирссонит.

Note. n - average. Shrt - shortite, Nye - "nyerereite", Pirs - pirsonite.



Рис. 6. Рамановские спектры (область валентных колебаний СО3-групп) Na-Ca-карбонатов из включений в пирите кальциокарбонатита, Чуктуконский массив

BSE фотографии включений и составы фаз смотри на рис. 2 и в табл. 1

Fig. 6. Raman spectra (region of valence vibrations for CO₃-group) of Na-Ca-carbonates from pyrite-hosted inclusions in calciocarbonatite, Chuktukon massif BSE images of inclusions and chemistry of the phases see Fig. 2 and Table 1

Шортит характеризуется соотношением CaO/Na₂O = 2, низкими содержаниями K₂O (0,2-0,8 мас. %) и SrO (0,3-1,0 мас. %) и отсутствием SO₃ (см. табл. 1). Соотношение CaO/Na₂O в пирссоните Na₂Ca(CO₃)₂·H₂O составляет 0,5, минерал практически не содержит каких-либо существенных примесей (K₂O, SrO, SO₃ -< 0,1 мас. %). Кальцит из включений в пирите сопоставим с породообразующим кальцитом по низким концентрациям MgO, MnO и FeO (< 0,3 мас. %). Арканит близок к идеальному составу К₂(SO₄), но, согласно EDS и элементным картам, может содержать до 5-7 мас. % Na₂O (см. рис. S1). Бурбанкит также близок к идеальному (Na,Ca)₃(Sr,Ba,Ce)₃(CO₃)₅, отклонения в сторону ханнешита незначительны (ВаО – 3–6 мас. %). Единственный силикат во включениях, тайниолит, не содержит FeO, близок к тайниолиту породы и соответствует идеальному составу $KMg_2Li(Si_4O_{10})F_2$ (см. рис. S2). Следует отметить, что «ньеререит» является первичной фазой во включениях в пирите Чуктукона, тогда как шортит и пирссонит, скорее всего, продукты его преобразования. При трансформации «ньеререита» в шортит или пирссонит минерал избавляется от примесей K₂O и SO₃ с появлением арканита (см. рис. 3, S1).

Карбонат-фосфаты брэдлиит и бонштедтит являются изоструктурными минералами и совместно с сидоренкитом образуют группу с общей формулой Na₃M(CO₃)(PO₄) (где M = Mn, Fe, Mg) [Fahey, Tunnel, 1941; Хомяков, 1979; Хомяков и др., 1982; Тју et al., 1984; Krivovichev et al., 2013; Kozlov et al., 2021]. Карбонат-фосфаты, выявленные в породах Чуктуконского и Среднезиминского массивов, существенно варьируют по линии составов Na₃Mg(CO₃)(PO₄) – Na₃Fe(CO₃)(PO₄), а доля сидоренкитового компонента Na₃Mn(CO₃)(PO₄) не слишком велика (5,6– 15,0 мол. %, табл. 2, рис. 7).

Таблица 2

Химический состав бонштедтита и брэдлиита из пород массивов Средняя Зима и Чуктукон, мас. % Table 2

Chemical composition of bradleyite and bonshtedtite from rocks of the Chuktukon and Srednia Zima massifs, wt %

Образец	n	Минерал	Na ₂ O	FeO	MnO	MgO	P_2O_5	Сумма	Bnsh	Brd	Sid
Ch151-3-5n	8	Brd	36,26	12,75	1,70	7,86	27,88	86,44	44,78	49,19	6,03
Ch158-10-2	5	Brd	37,04	5,68	2,19	11,66	28,30	84,88	19,81	72,45	7,74
SZ145Zr-6	25	Bnsh	34,35	20,27	1,60	2,79	26,53	85,55	75,47	18,49	6,04
SZ137,5-16n	8	Bnsh	34,45	14,92	4,07	4,76	26,58	84,78	54,20	30,84	14,96

Примечание. n – число анализов, Bnsh, Brd, Sid – бонштедтитовый, брэдлиитовый и сидоренкитовый миналы, мол. %.

Note. n - average, Bnsh, Brd, Sid - bonshtedtite, bradleyite and sidorenkite end-members, mole %.



Рис. 7. Брэдлиит и бонштедтит из пород Чуктукона и Средней Зимы на классификационном треугольнике для Na-карбонат-фосфатов Na₃*M*(CO₃)(PO₄) (где *M* = Mn, Fe, Mg) в сопоставлении минералами из пород щелочно-карбонатитовых массивов мира

Данные по включениям в минералах других массивов [Veksler et al., 1998; Михайлова и др., 2002; Zaitsev, Chakhmouradian, 2002; Cоколов и др., 2006; Andreeva, 2014; Kozlov et al., 2021; неопубликованные данные автора по массиву Ковдор]

Fig. 7. Bradleyite and bonshtedtite from rocks of the Chuktukon and Srednia Zima massifs on the classification triangle for Na-carbonate-phosphates Na₃*M*(CO₃)(PO₄) (*M* is Mn, Fe, Mg) in comparison with minerals from rocks of other alkaline-carbonatite intrusions worldwide

Data on mineral-hosted inclusions from other massifs are quoted from [Veksler et al., 1998; Mikhailova et al., 2002; Zaitsev, Chakhmouradian, 2002; Sokolov et al., 2006; Andreeva, 2014; Kozlov et al., 2021; unpublished author's data for the Kovdor massif]

Так, брэдлииты из пирита в кальциокарбонатитах Чуктукона располагаются вблизи медианных значений пары брэдиит – бонштедтит (см. рис. 7), что сближает их с тем же минералом из пирита силикокарбонатитовой брекчии массива Салланлатви [Kozlov et al., 2021]. Составы бонштедтита из пирита карбонатно-силикатных пород Средней Зимы попадают в поле бонштедтита и в целом близко соответствуют минералу из прожилковых силикокарбонатитов Хибинского массива [Kozlov et al., 2021]. Составы из образца SZ137.5 характеризуются высокими содержаниями сидоренкитового минала (до 15 мол. %, табл. 3, рис. 7).

К сожалению, на КР-спектрах карбонат-фосфатов Чуктукона и Средней Зимы присутствуют линии, соответствующие минералу-хозяину (пирит) (рис. 8). Однако эти линии пирита (область 350–450 см⁻¹) не перекрывают линии карбонат-фосфатов и не мешают их рамановской диагностике. В целом в зависимости от состава и ориентировки КР-спектры брэдлиита и бонштедтита немного различаются, но эти отклонения находятся в пределах закономерностей, выявленных для карбонат-фосфатов из разных карбонатитовых массивов мира [Kozlov et al., 2021].

Кордилит-(Се) и кухаренкоит-(Се) достаточно редко встречаются в карбонатитовых массивах [Zaitsev et al., 1996, 1998; Giester et al., 1998; Horváth et al., 1998; Krivovichev et al., 1998; Zemann, 2002; Koneva et al., 2010; Mills et al., 2012; Dalsin et al., 2015; Попова и др., 2021]. Химические составы и КРспектры кордилита-(Се) и кухаренкоита-(Се) из пирита в карбонатно-силикатных породах массива Средняя Зима представлены в табл. 3 и на рис. 9. Формула кордилита-(Ce) соответствует (Na_{0,54-0,59}Ca_{0,43-0,48}Ba_{0,03}) Ba0,97-1,03(LREE1,61-1,64Sr0,27-0,32Fe0,07-0,08)(CO3)4,0(SO4) 0.02(F0.73-0.76OH0.19O0.06-0.07), при этом вероятное присутствие (ОН)-группы в минерале фиксируется по полосе 3 210 см⁻¹ на КР-спектре (рис. 8). Кухаренкоит-(Се) имеет эмпирический состав (Ba_{1.88}Ca_{0.08}Sr_{0.04}) $(LREE_{0,98}Sr_{0,02})(CO_3)_3(F_{0,91}OH_{0,03}O_{0,02})$ (табл. 3). По химизму и КР-спектру (рис. 9) среднезиминский минерал очень близок к хибинскому и ильменскому кухаренкоиту-(Се) [Zaitsev et al., 1996; Попова и др., 2021].



Рис. 8. Рамановские спектры (интервал 100–1 200 см⁻¹) брэдлиита и бонштедтита из включений в пирите кальциокарбонатитов Чуктуконского массива и карбонатно-силикатных пород массива Средняя Зима ВSE фотографии включений и составы фаз смотри на рис. 4 и в табл. 2. Составы минералов приведены в миналах, мол. %

Fig. 8. Raman spectra (100–1,200 cm⁻¹ range) of bradleyite and bonstedtite from pyrite-hosted inclusions in calciocarbonatite of the Chuktukon massif and carbonate-silicate rocks of the Srednia Zima massif BSE images of inclusions and chemistry of the phases see Fig. 4 and Table 2. Mineral compositions are given in end-members, mole %

Таблица 3

Химический состав кордилита-(Ce) и кухаренкоита-(Ce) из карбонатно-силикатных пород массива Средняя Зима, мас. %

Table 3

Chemical composition of cordylite-(Ce) and kukharenkoite-(Ce) from carbonate-silicate rocks of the Srednia Zima massif, wt %

Образец	n	Фаза	Na ₂ O	CaO	BaO	SrO	FeO	La ₂ O ₃	Ce_2O_3	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	CO ₂	F	H ₂ O	Сумма
SZ00-3	18	Crd	2,40	3,48	22,70	4,72	0,79	13,46	19,12	1,48	3,88	25,33	2,07	0,25	99,68*
SZ00-8	3	Crd	2,62	3,84	21,38	3,96	0,68	14,93	19,22	1,22	3,38	25,23	2,00	0,26	98,72*
SZ137,2-8	9	Khr	0,00	0,76	48,00	1,05	0,00	7,68	13,76	1,41	4,08	22,03	2,88	0,04	101,69

Примечание. n – число анализов, CO₂ и H₂O рассчитаны по стехиометрии, H₂O – как 1-F 9 (в ф.е.). * – для кордилита-(Ce) суммы включают 0,27 и 0,26 мас. % SO₃ соответственно.

Note. n – average, CO₂ and H₂O were calculated by stoichiometry, H₂O – as 1-F (in a.p.f.u.). * – for cordylite-(Ce) totals include 0.27 and 0.26 wt % SO₃, respectively.



Рис. 9. Рамановские спектры (интервал 100–1 200 см⁻¹) кордилита-(Се) и кухаренкоита-(Се) из включений в пирите из карбонатно-силикатных пород массива Средняя Зима ВSE фотографии включений и составы фаз смотри на рис. 5 и в табл. 3

Fig. 9. Raman spectra (100–1,200 cm⁻¹ range) of cordylite-(Ce) and kukharenkoite-(Ce) in pyrite-hosted inclusions from carbonate-silicate rocks of the Srednia Zima massif BSE images of inclusions and chemistry of the phases see Fig. 5 and Table 3

Заключение

Таким образом, изучение моно- и полиминеральных включений в пирите из пород Чуктукона и Средняя Зима выявило присутствие Na-Ca-карбонатов («ньеререит», шортит, пирссонит), Na-карбонатофосфатов (бонштедтит, брэдлиит) и Na-Ba-REEкарбонатов (кордилит-(Ce), кухаренкоит-(Ce)). Это указывает на доминирующую роль щелочей, а именно Na₂O, на относительно поздних стадиях становления этих щелочно-карбонатитовых интрузий. Все это приводит к более лучшему пониманию процессов, происходящих при формировании не только этих массивов, но и других щелочно-карбонатитовых интрузий, где были выявлены щелочно-карбонатные включения в минералах [Kogarko et al., 1991; Veksler et al., 1998; Chen et al., 2013; Andreeva, 2014; Potter et al., 2020; Chayka et al., 2021, 2023; Kamenetsky et al., 2021].

В целом, учитывая то, что пирит является первичным минералом в кальциокарбонатитах Чуктокона, щелочно-карбонатные включения в пирите, вероятнее всего, указывают на щелочные условия на позднемагматическом этапе кристаллизации этих пород. В случае карбонатно-силикатных пород Средней Зимы, щелочно-карбонатные включения в пирите, по-видимому, свидетельствуют о щелочных условиях фенитизации. При этом разница между высокотемпературными позднемагматическим и метасоматическим процессами практически не видна.

Список источников

Михайлова Ю.А., Краснова Н.И., Крецер Ю.Л., Уолл Ф., Пахомовский Я.А. Включения в минералах Ковдорского массива ультраосновных, щелочных пород и карбонатитов как индикаторы эндогенных эволюционных процессов // Глубинный магматизм, его источники и плюмы. Иркутск, 2002. С. 312–338.

Пожарицкая Л.К., Самойлов В.С. Петрология, минералогия и геохимия карбонатитов Восточной Сибири. М. : Наука. 1972. 270 с.

Попова В.И., Рассомахин М.А., Попов В.А., Кузнецов А.М., Лебедева С.М. Кухаренкоит-(Се) и его минеральная ассоциация в пегматитах Вишнёвых гор (Южный Урал) // Минералогия. 2021. Т. 7, № 3. С. 68–77.

Прокопьев И.Р., Дорошкевич А.Г., Варченко М.Д., Семенова Д.В., Избродин И.А., Крук М.Н. Минералогия и возраст карбонатитов массива Средняя Зима (Восточный Саян) // Геодинамика и тектонофизика. 2024. Т. 15 (2). Ст. 0749.

Савельева В.Б., Данилова Ю.В., Базарова Е.П., Данилов Б.С. Кимберлитоподобные породы Урикско-Ийского грабена, Восточное Присаянье: минеральный состав, геохимия и условия формирования // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11, № 4. С. 678–696.

Соколов С.В., Ярмишко С.А., Чистякова Н.И. Включения в хризолите Ковдорского массива: генетическая и геммологическая значимость // Геохимия. 2006. Т. 44, № 6. С. 633–642.

Хомяков А.П., Семенов Е.И., Казакова М.Е., Шумяцкая Н.Г. Сидоренкит Na₃MnPO₄CO₃ – новый минерал // Записки ВМО. 1979. Ч. 108, вып. 1. С. 56–59.

Хомяков А.П., Александров В.Б., Краснова Н.И., Ермилов В.В., Смольянинова Н.Н. Бонштедтит Na₃Fe(PO₄)(CO₃) – новый минерал // Записки ВМО. 1982. Ч. 111, вып. 4. С. 486–490.

Шарыгин В.В. Скандиевые фазы во включениях в оливине карбонатитов Ковдорского массива, Кольский полуостров // 17-я Всероссийская конференция по термобарогеохимии : тез. докл. ГИН СО РАН. Улан-Удэ, 2016. С. 174–176.

Шарыгин В.В., Дорошкевич А.Г. Полифазные включения в магнезиохромите из карбонатитовых лампрофиров Зиминского щелочно-карбонатитового комплекса, В. Саян // 19-я Всероссийская конференция по термобарогеохимии : тез. докл. ИГМ СО РАН. Новосибирск, 2022. С. 107–108.

Шарыгин В.В., Дорошкевич А.Г. Редкие акцессорные минералы в карбонатитах и силикатно-карбонатных породах щелочного массива Средняя Зима, В. Саян // Всероссийская конференция. «Минералообразующие системы месторождений высокотехнологичных металлов: достижения и перспективы исследований» : тез. докл. ИГЕМ РАН. М., 2023. С. 408–411.

Andreeva I.A. Carbonatitic melts in olivine and magnetite from rare-metal carbonatite of the Belaya Zima alkaline carbonatite complex (East Sayan, Russia) // Dokl. Earth Sci. 2014. V. 455. P. 436–440.

Andreeva I.A., Kovalenko V.I., Kononkova N.N. Natrocarbonatitic melts of the Bol'shaya Tagna Massif, the eastern Sayan region // Dokl. Earth Sci. 2006. V. 408. P. 542–546.

Chayka I.F., Kamenetsky V.S., Malitch K.N., Vasil'ev Y.R., Zelenski M.E., Abersteiner A.B., Kuzmin I.A. Behavior of critical metals in cumulates of alkaline ultramafic magmas in the Siberian large igneous province: Insights from melt inclusions in minerals // Ore Geology Reviews. 2023. V. 160. Article 105577.

Chayka I.F., Kamenetsky V.S., Vladykin N.V., Kontonikas-Charos A., Prokopyev I.R., Stepanov S.Yu., Krasheninnikov S.P. Origin of alkali-rich volcanic and alkali-poor intrusive carbonatites from a common parental magma // Scientifc Reports. 2021. V. 11. Article 17627.

Chebotarev D.A., Doroshkevich A.G., Sharygin V.V., Yudin D.S., Ponomarchuk A.V., Sergeev S.A. Geochronology of the Chuktukon carbonatite massif, Chadobets uplift (Krasnoyarsk Territory) // Russian Geology and Geophysics. 2017. V. 58. P. 1222–1231.

Chen W., Kamenetsky V.S., Simonetti A. Evidence for the alkaline nature of parental carbonatite melts at Oka complex in Canada // Nat. Commun. 2013. V. 4. P. 1–6.

Dalsin M.L., Groat L.A., Creighton S., Evans R.J. The mineralogy and geochemistry of the Wicheeda Carbonatite Complex, British Columbia, Canada // Ore Geology Reviews. 2015. V. 64. P. 523–542.

Doroshkevich A.G., Chebotarev D.A., Sharygin V.V., Prokopyev I.R., Nikolenko A.M. Petrology of the alkaline silicate rocks and carbonatites of the Chuktukon massif, Chadobets upland, Russia: sources, evolution of the magmas and relation to the Triassic Siberian LIP // Lithos. 2019. V. 332–333. P. 245–260.

Doroshkevich A.G., Sharygin V.V., Belousova E.A., Izbrodin I.A., Prokopyev I.R. Zircon from the Chuktukon alkaline ultramafic carbonatite complex (Chadobets uplift, Siberian craton) as evidence of source heterogeneity // Lithos. 2021. V. 382–383. Article 105957.

Fahey J.J., Tunell G. Bradleyite, a new mineral, sodium phosphate-magnesium carbonate // American Mineralogist. 1941. V. 26. P. 646–650.

Giester G., Ni Yu., Jarosch D., Hughes J.M., Ronsbo J. G., Yang Zh., Zemann J. Cordylite-(Ce): a crystal chemical investigation of material from four localities, including type material // American Mineralogist. 1998. V. 83 (1). P. 178–184.

Horváth L., Gault R.A., Tarassoff P., Pfenninger-Horváth E. Mineralogy of the Saint-Amable Sill, Varennes and Saint-Amable, Quebec // Mineralogical Record. 1998. V. 29 (2). P. 83–118.

Kamenetsky V.S., Doroshkevich A.G., Elliott H.A.L., Zaitsev A.N. Carbonatites: Contrasting, Complex, and Controversial // Elements. 2021. V. 17. P. 307–314.

Kogarko L., Plant D., Henderson C., Kjarsgaard B. Na-rich carbonate inclusions in perovskite and calzirtite from the Guli intrusive Ca-carbonatite, polar Siberia // Contrib. Miner. Petrol. 1991. V. 109. P. 124–129.

Koneva A.A., Konev A.A., Vladykin N.V. Vein complex of the Biraya carbonatite deposit // 27th International conference «Alkaline Magmatism of the Earth and related strategic metal deposits» : Abstracts. Moscow ; Koktebel', 2010. P. 75–76.

Kozlov E.N., Fomina E.N., Bocharov V.N., Sidorov M.Yu., Vlasenko N.S., Shilovskikh V.V. A Raman spectroscopic study of the natural carbonophosphates Na₃*M*CO₃PO₄ (*M* is Mn, Fe, and Mg) // Eur. J. Mineral. 2021. V. 33. P. 283–297.

Krivovichev S.V., Chernyatieva A.P., Britvin S.N., Yakovenchuk V.N., Krivovichev V.G. Refinement of the crystal structure of bonshtedtite, Na₃Fe(PO₄)(CO₃) // Geology of Ore Deposits. 2013. V. 55. P. 669–675.

Krivovichev S.V, Filatov S.K, Zaitsev A.N. The crystal structure of kukharenkoite-(Ce), Ba₂*REE*(CO₃)₃F, and an interpretation based on cation-coordinated F tetrahedral // Canadian Mineralogist. 1998. V. 36. P. 809–815.

Mills S.J., Kartashov P.M., Kampf A.R., Konev A.A., Koneva A.A., Raudsepp M. Cordylite-(La), a new mineral species in fenite from the Biraya Fe-REE deposit, Irkutsk, Russia // Canadian Mineralogist. 2012. V. 50. P. 1281–1290.

Nielsen T.F.D., Solovova I.P., Veksler I.V. Parental melts of melilitolite and origin of alkaline carbonatite: Evidence from crystallised melt inclusions, Gardiner complex // Contrib. Mineral. Petrol. 1997. V. 126. P. 331–344.

Panina L.I. Multiphase carbonate-salt immiscibility in carbonatite melts: Data on melt inclusions from the Krestovskiy massif minerals (Polar Siberia) // Contrib. Mineral. Petrol. 2005. V. 150. P. 19–36.

Potter N.J., Kamenetsky V.S., Chakhmouradian A.R., Kamenetsky M.B., Goemann K., Rodemann T. Polymineralic inclusions in oxide minerals of the Afrikanda alkaline-ultramafic complex: Implications for the evolution of perovskite mineralisation // Contrib. Mineral. Petrol. 2020. V. 175. Article 18.

Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Zhumadilova D.V., Starikova A.E., Nugumanova Ya.N., Vladykin N.V. Petrogenesis of Zr–Nb (REE) carbonatites from the Arbarastakh complex (Aldan Shield, Russia): Mineralogy and inclusion data // Ore Geology Reviews. 2021. V. 131. Article 104042.

Sharygin V.V., Doroshkevich A.G. Mineralogy of secondary olivine-hosted inclusions in calcite carbonatites of the Belaya Zima alkaline massif, Eastern Sayan, Russia: Evidence for late-magmatic Na-Ca-rich carbonate composition // J. Geol. Soc. India. 2017. V. 90, No. 11. P. 524–530.

Sharygin V.V., Doroshkevich A.G., Seryotkin Yu.V., Karmanov N.S., Belogub E.V., Moroz T.N., Nigmatulina E.N., Yelisseyev A.P., Vedenyapin V.N., Kupriyanov I.N. Rippite, K₂(Nb,Ti)₂(Si₄O₁₂)O(O,F), a new K-Nb-cyclosilicate from Chuktukon carbonatite massif, Chadobets upland, Krasnoyarsk Territory, Russia // Minerals. 2020. V. 10 (12). Article 1102.

Sharygin V.V., Zhitova L.M., Nigmatulina E.N. Fairchildite K₂Ca(CO₃)₂ in phoscorites from Phalaborwa, South Africa: first occurrence in alkaline carbonatite complexes // Russian Geology and Geophysics. 2011. V. 52 (2). P. 208–219. Stoppa F., Jones A.P., Sharygin V.V. Nyerereite from carbonatitic rocks at Vulture volcano: implications for mantle metasomatism and petrogenesis of alkali carbonate melts // Central European Journal of Geosciences. 2009. V. 1 (2). P. 131–151.

Tjy C.T.L., Nadezhina T.N., Pobedimskaya E.A., Khomyakov A.P. The crystal-chemical characteristics of bradleyite, sidorenkite and bonshtedtite // Mineralogicheskii Zhurnal. 1984. No. 6. P. 79–84.

Veksler I., Nielsen T., Sokolov S. Mineralogy of crystallized melt inclusions from Gardiner and Kovdor ultramafic alkaline complexes: Implications for carbonatite genesis // J. Petrol. 1998. V. 39. C. 2015–2031.

Zaitsev A.N., Chakhmouradian A.R. Calcite – amphibole – clinopyroxene rock from the Afrikanda Complex, Kola Peninsula, Russia: mineralogy and a possible link to carbonatites. II. Oxysalt minerals // Can. Mineral. 2002. V. 40, P. 103–120.

Zaitsev A.N., Kamenetsky V.S., Chakhmouradian A.R. Magnetite-hosted multiphase inclusions in phoscorites and carbonatites of the Kovdor complex, Kola alkaline province // 32nd International Conference «Alkaline Magmatism of the Earth and related strategic metal deposits» : Abstracts. Apatity, 2015. P. 144–145.

Zaitsev A.N., Sitnikova M.A., Subbotin V.V., Fernández-Suárez J., Jeffries T.E. Sallanlatvi Complex – a rare example of magnesite and siderite carbonatites // Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: the Key Example of the Kola Alkaline Province / eds. by F. Wall, A.N. Zaitsev. London, 2004. P. 201–245.

Zaitsev A.N., Wall F., Le Bas M.J. REE-Sr-Ba minerals from the Khibina carbonatites, Kola peninsula, Russia: their mineralogy, paragenesis and evolution // Mineralogical Magazine. 1998. V. 62. P. 225–250.

Zaitsev A.N., Yakovenchuk V.N., Chao G.J., Gault R.A., Subbotin V.V., Pakhomovsky Y.A., Bogdanova A.N. Kukharenkoite-(Ce), Ba₂Ce(CO₃)₃F, a new mineral from Kola Peninsula, and Quebec, Canada // European Journal of Mineralogy. 1996. V. 8 (6). P. 1327– 1336.

Zemann J. Cordylite – history and survival as a mineral species // Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte. 2002. V. 2002. P. 255–264.

References

Mikhailova Yu.A., Krasnova N.I., Kretser Yu.L., Wall F., Pakhomovsky Ya.A. Vklyucheniya v mineralakh Kovdorskogo massiva ul'traosnovnykh, shchelochnykh porod i karbonatitov kak indikatory endogennykh evolyutsionnykh protsessov [Inclusion in minerals of the Kovdor massif of ultramafic, alkaline rocks and carbonatites as indicators of endogenic evolution processes] // Deep-seated magmatism, its sources and plumes magmatic sources and the problem of plumes. 2002. Irkutsk. pp. 312–338. In Russian

Pozharitskaya L.K., Samoilov V.S. Petrologiya, mineralogiya i geokhimiya karbonatitov Vostochnoy Sibiri [Petrology, Mineralogy and Geochemistry of Carbonatites in Eastern Siberia]. Moscow: Nauka. 1972. 270 p. In Russian

Popova V.I., Rassomakhin M.A., Popov V.A., Kuznetsov A.M., Lebedeva S.M. Kukharenkoite-(Ce) and its mineral assemblage in pegmatites of the Vishnevye Mountains (South Urals) // Mineralogy. V. 7(3). pp. 68–77. In Russian

Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Varchenko M.D., Semenova D.V., Izbrodin I.A., Kruk M.N. Mineralogy and zircon age of carbonatites of the Srednyaya Zima Complex (Eastern Sayan) // Geodynamics and Tectonophysics. 2024. V. 15(2). Article 0749. In Russian

Savel'eva V.B., Danilova Yu.V., Bazarova E.P., Danilov B.S. Kimberlite-like rocks of the Urik-Iya graben, Eastern Sayan region: mineral composition, geochemistry and formation conditions // Geodynamics and Tectonophysics. 2020. V. 11. No. 4. pp. 678–696. In Russian

Sokolov S.V., Yarmishko S.A., Chistyakova N.I. Inclusions in chrysolite from the Kovdor Massif: Genetic and gemological significance // Geokhimiya [Geochemistry International]. 2006. V. 44 (6). pp. 581–590. In Russian

Khomyakov A.P., Semenov E.I., Kazakova M.E., Shumyatskaya N.G. Sidorenkite Na₃MnPO₄CO₃, a new mineral // Zapiski VMO [WMO Notes]. 1979. Part 108(1). pp. 56–59. In Russian

Khomyakov A.P., Aleksandrov V.V., Krasnova N.I., Ermilov V.V., Smolyaninova N.N. Bonshtedtite, Na₃Fe(PO₄)(CO₃), a new mineral // Zapiski VMO [WMO Notes]. 1982. Part 111(4). pp. 486–490. In Russian

Sharygin V.V. Skandiyevyye fazy vo vklyucheniyakh v olivine karbonatitov Kovdorskogo massiva, Kol'skiy poluostrov [Scandian phases in olivine-hosted inclusions from carbonatite of the Kovdor massif] // 17th Russian Fluid Inclusion conference: Abstracts. GIN SD RAS. Ulan-Ude. pp. 174–176. In Russian

Sharygin V.V., Doroshkevich A.G. *Polifaznyye vklyucheniya v magneziokhromite iz karbonatitovykh lamprofirov Ziminskogo shchelochno-karbonatitovogo kompleksa, V. Sayan* [Polyphase inclusions in magnesiochromite from carbonatite lamprophyres of the Zima alkaline-carbonatite complex, E. Sayan] // 19th Russian Fluid Inclusion conference: Abstracts. IGM SD RAS. Novosibirsk. 2022. pp. 107–108. In Russian

Sharygin V.V., Doroshkevich A.G. Redkiye aktsessornyye mineraly v karbonatitakh i silikatno-karbonatnykh porodakh shchelochnogo massiva Srednyaya Zima, V. Sayan [Rare accessory minerals in carbonatites and silicate-carbonate rocks of the Srednia Zima alkaline massif] // Russian conference «Mineral-forming systems of strategic metal deposits: achievements and perspectives of studies»: Abstracts. Moscow: IGEM RAS. 2023. pp. 408–411. In Russian

Andreeva I.A. Carbonatitic melts in olivine and magnetite from rare-metal carbonatite of the Belaya Zima alkaline carbonatite complex (East Sayan, Russia) // Dokl. Earth Sci. 2014. V. 455, pp. 436–440.

Andreeva I.A., Kovalenko V.I., Kononkova N.N. Natrocarbonatitic melts of the Bol'shaya Tagna Massif, the eastern Sayan region // Dokl. Earth Sci. 2006. V. 408. pp. 542–546.

Chayka I.F., Kamenetsky V.S., Vladykin N.V., Kontonikas-Charos A., Prokopyev I.R., Stepanov S.Yu., Krasheninnikov S.P. Origin of alkali-rich volcanic and alkali-poor intrusive carbonatites from a common parental magma // Scientifc Reports. 2021. V. 11. Article 17627.

Chayka I.F., Kamenetsky V.S., Malitch K.N., Vasil'ev Y.R., Zelenski M.E., Abersteiner A.B., Kuzmin I.A. Behavior of critical metals in cumulates of alkaline ultramafic magmas in the Siberian large igneous province: Insights from melt inclusions in minerals // Ore Geology Reviews. 2023. V. 160. Article 105577.

Chebotarev D.A., Doroshkevich A.G., Sharygin V.V., Yudin D.S., Ponomarchuk A.V., Sergeev S.A. Geochronology of the Chuktukon carbonatite massif, Chadobets uplift (Krasnoyarsk Territory) // Russian Geology and Geophysics. 2017. V. 58. pp. 1222–1231.

Chen W., Kamenetsky V.S., Simonetti A. Evidence for the alkaline nature of parental carbonatite melts at Oka complex in Canada // Nat. Commun. 2013. V. 4. pp. 1–6.

Dalsin M.L., Groat L.A., Creighton S., Evans R.J. The mineralogy and geochemistry of the Wicheeda Carbonatite Complex, British Columbia, Canada // Ore Geology Reviews. 2015. V. 64. pp. 523–542.

Doroshkevich A.G., Chebotarev D.A., Sharygin V.V., Prokopyev I.R., Nikolenko A.M. Petrology of the alkaline silicate rocks and carbonatites of the Chuktukon massif, Chadobets upland, Russia: sources, evolution of the magmas and relation to the Triassic Siberian LIP // Lithos. 2019. V. 332–333. pp. 245–260.

Doroshkevich A.G., Sharygin V.V., Belousova E.A., Izbrodin I.A., Prokopyev I.R. Zircon from the Chuktukon alkaline ultramafic carbonatite complex (Chadobets uplift, Siberian craton) as evidence of source heterogeneity // Lithos. 2021. V. 382–383. Article 105957.

Fahey J.J., Tunell G. Bradleyite, a new mineral, sodium phosphate-magnesium carbonate // American Mineralogist. 1941. V. 26. pp. 646–650.

Giester G., Ni Yu., Jarosch D., Hughes J.M., Ronsbo J. G., Yang Zh., Zemann J. Cordylite-(Ce): a crystal chemical investigation of material from four localities, including type material // American Mineralogist. 1998. V. 83(1). pp. 178–184.

Horváth L., Gault R.A., Tarassoff P., Pfenninger-Horváth E. Mineralogy of the Saint-Amable Sill, Varennes and Saint-Amable, Québec // Mineralogical Record. 1998. V. 29(2). pp. 83–118.

Kamenetsky V.S., Doroshkevich A.G., Elliott H.A.L., Zaitsev A.N. Carbonatites: Contrasting, Complex, and Controversial // Elements. 2021. V. 17. pp. 307–314.

Kogarko L., Plant D., Henderson C., Kjarsgaard B. Na-rich carbonate inclusions in perovskite and calzirtite from the Guli intrusive Ca-carbonatite, polar Siberia // Contrib. Miner. Petrol. 1991. V. 109. pp. 124–129.

Koneva A.A., Konev A.A., Vladykin N.V. Vein complex of the Biraya carbonatite deposit // 27th International conference "Alkaline Magmatism of the Earth and related strategic metal deposits": Abstracts. 2010. Moscow-Koktebel'. pp. 75–76.

Kozlov E.N., Fomina E.N., Bocharov V.N., Sidorov M.Yu., Vlasenko N.S., Shilovskikh V.V. A Raman spectroscopic study of the natural carbonophosphates Na₃*M*CO₃PO₄ (*M* is Mn, Fe, and Mg) // Eur. J. Mineral. 2021. V. 33. pp. 283–297.

Krivovichev S.V., Chernyatieva A.P., Britvin S.N., Yakovenchuk V.N., Krivovichev V.G. Refinement of the crystal structure of bonshtedtite, Na₃Fe(PO₄)(CO₃) // Geology of Ore Deposits. 2013. V. 55. pp. 669-675.

Krivovichev S.V, Filatov S.K, Zaitsev A.N. The crystal structure of kukharenkoite-(Ce), Ba₂*REE*(CO₃)₃F, and an interpretation based on cation-coordinated F tetrahedral // Canadian Mineralogist. 1998. V. 36. pp. 809–815.

Mills S.J., Kartashov P.M., Kampf A.R., Konev A.A., Koneva A.A., Raudsepp M. Cordylite-(La), a new mineral species in fenite from the Biraya Fe-REE deposit, Irkutsk, Russia // Canadian Mineralogist. 2012. V. 50. pp. 1281–1290.

Nielsen T.F.D., Solovova I.P., Veksler I.V. Parental melts of melilitolite and origin of alkaline carbonatite: Evidence from crystallised melt inclusions, Gardiner complex // Contrib. Mineral. Petrol. 1997. V. 126. pp. 331–344.

Panina L.I. Multiphase carbonate-salt immiscibility in carbonatite melts: Data on melt inclusions from the Krestovskiy massif minerals (Polar Siberia) // Contrib. Mineral. Petrol. 2005. V. 150. pp. 19–36.

Potter N.J., Kamenetsky V.S., Chakhmouradian A.R., Kamenetsky M.B., Goemann K., Rodemann T. Polymineralic inclusions in oxide minerals of the Afrikanda alkaline-ultramafic complex: Implications for the evolution of perovskite mineralisation // Contrib. Mineral. Petrol. 2020. V.175. Article 18.

Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Zhumadilova D.V., Starikova A.E., Nugumanova Ya.N., Vladykin N.V. Petrogenesis of Zr–Nb (REE) carbonatites from the Arbarastakh complex (Aldan Shield, Russia): Mineralogy and inclusion data // Ore Geology Reviews. 2021. V. 131. Article 104042.

Sharygin V.V., Doroshkevich A.G. Mineralogy of secondary olivine-hosted inclusions in calcite carbonatites of the Belaya Zima alkaline massif, Eastern Sayan, Russia: Evidence for late-magmatic Na-Ca-rich carbonate composition // J. Geol. Soc. India. 2017. V. 90. No. 11. pp. 524–530.

Sharygin V.V., Doroshkevich A.G., Seryotkin Yu.V., Karmanov N.S., Belogub E.V., Moroz T.N., Nigmatulina E.N., Yelisseyev A.P., Vedenyapin V.N., Kupriyanov I.N. Rippite, K₂(Nb,Ti)₂(Si₄O₁₂)O(O,F), a new K-Nb-cyclosilicate from Chuktukon carbonatite massif, Chadobets upland, Krasnoyarsk Territory, Russia // Minerals. 2020. V. 10 (12). Article 1102.

Sharygin V.V., Zhitova L.M., Nigmatulina E.N. Fairchildite K₂Ca(CO₃)₂ in phoscorites from Phalaborwa, South Africa: first occurrence in alkaline carbonatite complexes // Russian Geology and Geophysics. 2011. V. 52 (2). pp. 208–219.

Stoppa F., Jones A.P., Sharygin V.V. Nyerereite from carbonatitic rocks at Vulture volcano: implications for mantle metasomatism and petrogenesis of alkali carbonate melts // Central European Journal of Geosciences. 2009. V. 1 (2). pp. 131–151.

Tjy C.T.L., Nadezhina T.N., Pobedimskaya E.A., Khomyakov A.P. The crystal-chemical characteristics of bradleyite, sidorenkite and bonshtedtite // Mineralogicheskii Zhurnal. 1984. N. 6. pp. 79–84. In Russian

Veksler I., Nielsen T., Sokolov S. Mineralogy of crystallized melt inclusions from Gardiner and Kovdor ultramafic alkaline complexes: Implications for carbonatite genesis // J. Petrol. 1998. V. 39. pp. 2015–2031.

Zaitsev A.N., Chakhmouradian A.R. Calcite – amphibole – clinopyroxene rock from the Afrikanda Complex, Kola Peninsula, Russia: mineralogy and a possible link to carbonatites. II. Oxysalt minerals // Can. Mineral. 2002. V. 40. pp. 103–120.

Zaitsev A.N., Kamenetsky V.S., Chakhmouradian A.R. Magnetite-hosted multiphase inclusions in phoscorites and carbonatites of the Kovdor complex, Kola alkaline province // 32nd International Conference "Alkaline Magmatism of the Earth and related strategic metal deposits": Abstracts. Apatity, Russia. 2015. pp. 144–145.

Zaitsev A.N., Sitnikova M.A., Subbotin V.V., Fernández-Suárez J., Jeffries T.E. Sallanlatvi Complex – a rare example of magnesite and siderite carbonatites // in: Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: the Key Example of the Kola Alkaline Province (eds. Wall F., Zaitsev A.N.). Mineral. Soc. Great Brit. Irel., London, UK. 2004. pp. 201–245.

Zaitsev A.N., Wall F., Le Bas M.J. REE-Sr-Ba minerals from the Khibina carbonatites, Kola peninsula, Russia: their mineralogy, paragenesis and evolution // Mineralogical Magazine. 1998. V. 62. pp. 225–250.

Zaitsev A.N., Yakovenchuk V.N., Chao G.J., Gault R.A., Subbotin V.V., Pakhomovsky Y.A., Bogdanova A.N. Kukharenkoite-(Ce), Ba₂Ce(CO₃)₃F, a new mineral from Kola Peninsula, and Quebec, Canada // European Journal of Mineralogy. 1996. V. 8(6). pp. 1327–1336.

Zemann J. Cordylite – history and survival as a mineral species. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte. 2002. V. 2002. pp. 255–264.

Информация об авторе:

Шарыгин В.В., старший научный сотрудник, доктор геолого-минералогических наук, лаборатория термобарогеохимии, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия. E-mail: sharygin@igm.nsc.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about the author:

Sharygin V.V., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Fluid Inclusion Laboratory, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: sharygin@igm.nsc.ru

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.06.2024; одобрена после рецензирования 03.08.2024; принята к публикации 27.09.2024

The article was submitted 10.06.2024; approved after reviewing 03.08.2024; accepted for publication 27.09.2024

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Научная статья УДК 553.26+552.33 doi: 10.17223/25421379/32/10

ЗОЛОТО И СЕРЕБРО В ВЫСОКОКАЛИЕВЫХ НЕФЕЛИНОВЫХ СИЕНИТАХ ТОМТОРСКОГО КОМПЛЕКСА (НА ПРИМЕРЕ МАССИВА БОГДО, АРКТИЧЕСКАЯ СИБИРЬ)



Сергей Михайлович Жмодик¹, Елена Владимировна Лазарева², Евгения Владимировна Айриянц³, Дмитрий Константинович Белянин⁴, Ольга Николаевна Киселева⁵, Клим Андреевич Мусияченко⁶, Александр Васильевич Толстов⁷, Багай-оол Юрьевич Сарыг-оол⁸

¹⁻⁸ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

¹zhmodik@igm.nsc.ru

² lazareva@igm.nsc.ru

³ jenny@igm.nsc.ru

⁴bel@igm.nsc.ru

⁵kiseleva_on@igm.nsc.ru

⁶ musiyachenkoka@igm.nsc.ru

⁷ tols61@mail.ru

⁸ sarygool@igm.nsc.ru

Аннотация. Изучен состав пород щелочного массива Богдо (Арктическая Сибирь) и выявлено распределение золота и серебра в них. По структурным особенностям (пойкилитовая структура, симплектиты), петрохимическим и минералогогеохимическим данным породы массива Богдо соответствуют высококалиевым нефелиновым сиенитам (ВКНС), либенеритовым сиенитам (ЛНС), псевдолейцитовым и карбонатизированным псевдолейцитовым сиенитам (ПЛС и КПЛС)). Максимальная дисперсия и наиболее высокие содержания Au (160 мг/т) установлены в ВКНС и ПЛС, а Ag в ЛНС (810 мг/т). Наиболее низкие содержания Au характерны для КПЛС и ЛНС. Установлено влияние количества и состава флюидной фазы (LOI) на распределение как породообразующих оксидов, так и ВаО, REE, Au, Ag, U, Th. В одном случае повышение LOI характеризует процесс карбонатизации ВКНС (иногда с флюоритизацией), а в другом – процесс либенеритизации. Из ВКНС выделены частицы самородного золота (C3) в виде изометричных (10–20 мкм) и удлиненных (до 100 мкм) тонких пластинок с составом Au_{0.91}Ag_{0.09} – Au_{0.78}Ag_{0.22}, что соответствует золоту «уджинского» типа. Находки C3 в ВКНС массива Богдо позволяют прогнозировать высокую вероятность выявления рудной Au минерализации в массивах томторского типа.

Ключевые слова: щелочной массив Богдо, золото, серебро, высококалиевые нефелиновые сиениты (рисчорриты)

Источник финансирования: исследования выполнены при финансовой поддержке РНФ (проект № 23-63-10017), частично каменный материал был собран в экспедиционный период 2013 г., при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание ИГМ СО РАН № 122041400193-7).

Для цитирования: Жмодик С.М., Лазарева Е.В., Айриянц Е.В., Белянин Д.К., Киселева О.Н., Мусияченко К.А., Толстов А.В., Сарыг-оол Б.Ю. Золото и серебро в высококалиевых нефелиновых сиенитах томторского комплекса (на примере массива Богдо, Арктическая Сибирь) // Геосферные исследования. 2024. № 3. С. 101–112. doi: 10.17223/25421379/32/10

Original article doi: 10.17223/25421379/32/10

GOLD AND SILVER IN HIGH-K NEPHELINE SYENITES OF THE TOMTOR COMPLEX (BY THE EXAMPLE OF THE BOGDO MASSIF, ARCTIC SIBERIA)

Sergey M. Zhmodik¹, Elena V. Lazareva², Evgenia V. Airiyants³, Dmitry K. Belyanin⁴, Olga N. Kiseleva⁵, Klim A. Musiyachenko⁶, Alexander V. Tolstov⁷, Bagai-ool Yu. Saryg-ool⁸

¹⁻⁸ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

¹zhmodik@igm.nsc.ru

² lazareva@igm.nsc.ru

³ jenny@igm.nsc.ru

⁴ bel@igm.nsc.ru ⁵ kiseleva_on@igm.nsc.ru ⁶ kam@igm.nsc.ru ⁷ tols61@mail.ru ⁸ sarygool@igm.nsc.ru

Abstract. The composition of the rocks of the alkaline Bogdo massif (Arctic Siberia) was studied and the distribution of gold and silver in them was revealed. According to structural features (poikilitic structure, symplectites), petrochemical and mineralogical-geochemical data, the rocks of the Bogdo massif correspond to high-K nepheline syenites (HKNS), libenerite syenites (LNS), pseudoleucite and carbonated pseudoleucite syenites (PLS and KPLS). The maximum dispersion and the highest contents of Au (160 pb Au) were established in the HKNS and PLS, and Ag in the LNS (810 ppb). The lowest Au contents are characteristic of KPLS and LNS. The influence of the amount and composition of the fluid phase (LOI) on the distribution of both rock-forming oxides and BaO, REE, Au, Ag, U, Th has been established. In one case, an increase in LOI characterizes the process of carbonatization of HKNS (sometimes with fluoridation), and in the other – the process of libeneritization. Particles of native gold (NG) were isolated from the HKNS, in the form of isometric (10–20 microns) and elongated (up to 100 microns) thin plates with a composition of Au_{0.91}Ag_{0.09} – Au_{0.78}Ag_{0.22}, which corresponds to the gold of the «udzhinsky» type. The findings of the NG in the HKNS of the Bogdo massif make it possible to predict a high probability of detecting Au mineralization in Tomtor-type massifs.

Keywords: alkaline Bogdo massif, gold, silver, high-potassium nepheline syenites (rischorrites)

Source of funding: The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project No. 23-63-10017), partly the stone material was collected during the expedition period in 2013, with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (state task of the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS No. 122041400193-7).

For citation: Zhmodik S.M., Lazareva E.V., Airiyants E.V., Belyanin D.K., Kiseleva O.N., Musiyachenko K.A., Tolstov A.V., Saryg-ool B.Yu. (2024) Gold and silver in high-K nepheline syenites of the Tomtor complex (on the example of the Bogdo massif, Arctic Siberia). *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 3. pp. 101–112. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/32/10

Введение

Возможность формирования золоторудной минерализации в комплексах щелочно-ультраосновных пород с карбонатитами активно исследуется в течение последних лет [Ryabchikov et al., 2016; Sazonov et al., 2021]. Выделены щелочные комплексы, в том числе с карбонатитами, различного возраста (от архея до мезозоя), с которыми связано золотое оруденение: Палабора, Шпитцкоп (Африка), Карджил (Канада), Валлаби (Wallaby Gold Deposit) (Австралия), Гулинская и Крестовская интрузии (Арктика, Россия), Баян-Обо, Чивейгоу (Китай) [Groves, Vielreicher, 2001; Кочетков, 2006; Когарко, Сенин, 2011; Wu et al., 2011; Гусев, Гусев, 2014; Wang et al., 2019; Sazonov et al., 2021]. В процессе гипогенно (гидротермально)гипергенного изменения карбонатитовой пирокластики в вулканическом комплексе Круидфонтейн (Kruidfontein) среднепротерозойского возраста (Южная Африка) установлено возрастание содержаний золота до 3,8 г/т [Pirajno et al., 1995]. Показано, что самородное золото (87,65-89,68 мас. % Au; 424-7,56 мас. % Ад) в дунитах позднепалеозойского возраста Гулинского массива могло кристаллизоваться на позднемагматической стадии [Когарко, Сенин, 2011].

На севере Сибирской платформы, восточнее Анабарского щита, широко распространены россыпи благородных металлов, для которых коренные источники не установлены [Никифорова и др., 2011; Округин и др., 2012; Airiyants et al., 2014]. В россыпях на территории Уджинского поднятия наиболее часто встречается Аи двух типов: 1 – мелкое (<1 мм) хорошо окатанное пластинчатое Аи косовых россыпей («вилюйский» или «уджинский» тип); 2 – крупное (1–8 мм) в различной степени окатанное комковидное золото, которое выделяется в «анабарский» тип [Никифорова и др., 2011].

Восточнее Анабарского щита на севере Сибирской платформы выявлены массивы щелочных пород с карбонатитами (МЩПК): Томторский, Богдо, Промежуточный, Буолкалах, Чюэмпэ, Уэле, которые образуют крупную магматическую провинцию. Массивы располагаются среди карбонатных и терригенных пород неопротерозойского (NP₁-NP₃) возраста и перекрываются пермскими континентальными, юрскими морскими и четвертичными отложениями. Положение МЩПК связано с «Уджинским сводом» – меридиональной рифтогенной структурой и секущими её трансформными разломами.

Массив Богдо расположен в 20–40 км севернее наиболее крупного Томторского МЩПК и является одним из слабо исследованных объектов. На основании детального изучения керна скважины колонкового бурения (скв. 3257,5, инт. 20–45 м), пробуренной в центральной части массива (рис. 1), получены данные о распределении золота, серебра, породообразующих компонентов, редких, в том числе REE, и радиоактивных элементов в породах массива Богдо, а также о составе самородного золота. На потенциальную рудоносность МЩК в отношении благородных металлов указывал Н.В. Владыкин [2016], обнаружив в рудах Томторского месторождения микрозерна самородных золота и платины. На МЩПК Томтор и Богдо распространены высококалиевые нефелиновые сиениты (ВКНС) (рисчорриты или рисчорритоподобные породы), подвергшиеся эндогенным изменениями и имеющие в своём составе разнообразную редкометалльную Nb, Zr, REEминерализацию, хорошо сопоставляемую с оруденением Кольской провинции. Результаты определения U-Pb- и ⁴⁰Ar/³⁹Ar-возраста титанитов и К-содержащих минералов, выделенных из в различной степени измененных ВКНС, также свидетельствуют о девонском времени формирования пород массива Богдо, как и Хибинского массива [Dobretsov et al., 2019]. В целом фиксируется сложная как минимум трехэтапная история становления массива Богдо: 394 ± 3 , 362 ± 2 , 334 ± 4 млн лет [Zhmodik, 2024].

Целью настоящей работы является исследование и получение первых данных о распределении и поведении золота и серебра в процессе эндогенного изменения ВКНС массива Богдо. Полученные результаты могут быть использованы в качестве примера при изучении ВКНС, распространенных в других массивах томторского типа, прежде всего в массиве Томтор.

Методы исследования

Керн диаметром 85 мм распиливался, спил сканировался с высоким разрешением и выбирались участки для изготовления петрографических шлифов и полированных препаратов для электронной микроскопии. Одна часть образца истиралась для анализа, а другая измельчалась в ступке ручным способом для выделения мономинеральных фракций и самородного золота гравитационным способом в воде в фарфоровых чашках. Петрографическое изучение шлифов проводилось на микроскопе AxioScop.A1 (Carl Zeiss). Химический состав пород определен РФА методом на спектрометре ARL-9900XP (ThermoFisher Scientific) с пределами обнаружения (ПО) – 0,001–0,1 % и относительным стандартным отклонением (ОСО) – ≤10 % (аналитик Н.Г. Карманова); микроэлементный – методом ИСП-MC на приборе Element I (Finnigan MAT) с $\Pi O = 10^{-9} \, \Gamma/\Gamma$ и ОСО = 2–5 % (для РЗЭ) и ≤ 10 % (для Zr, Nb, Hf, Ta) (аналитики И.В. Николаева, С.В. Палесский); состав и микроморфология минералов исследованы на СЭМ MIRA 3 LMU (TESCAN) с системой микроанализа INCA Energy 450+ XMax 80 (Oxford Instruments), с ПО = 0,5-0,8%, ОСО = 2-6% (аналитики Н.С. Карманов, М.В. Хлестов). Содержания Аи и Аg определяли методами пламенной и электротермической ААС после кислотного разложения проб и экстракции аналитов в органическую фазу, на AAC (SOLAAR M6) с $\Pi O = 5 \times 10^{-8}$ % (для Au), 1 × 10⁻⁶% (для Ag) и ОСО = 16 и 20,8 % (аналитик В.Н. Ильина). Аналитические работы проведены АЦКП ИГМ СО РАН (г. Новосибирск).

Результаты исследований и обсуждение

Положение интрузивов Томтор и Богдо контролируется меридиональной рифтогенной структурой -Уджинским поднятием, кольцевыми структурами и зонами сдвигов северо-восточного направления. Массив Богдо находится в центре более крупной кольцевой структуры. В плане массив Богдо имеет форму овала размерами около 7 × 8 км, характеризуется концентрически-зональным, слабо асимметричным строением и относится к формации ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (рис. 1). По данным геологического картирования, периферическая часть массива выполнена скарнированными, фенитизированными и мраморизованными известняками. В центральной части массива выделяется блок, сложенный кальцитовыми карбонатитами. Основная площадь массива представлена нефелиновыми сиенитами и ювитами, среди которых в виде полукольцевых тел распространены породы якупирангитийолитовой серии и «поздних» карбонатитов.

В результате детального изучения керна, среди пород массива Богдо выделены: 1 – крупнозернистые лейкократовые светло-серой или зеленовато-серой окраски ВКНС (рисчорриты), пойкилитовой структуры с нефелином, содалитом, К-Ва-полевым шпатом (КПШ), пироксеном, биотитом, титанитом; 2 средне- и мелкозернистые биотит-эгириновые либенеритовые и либенеритизированные сиениты (ЛНС), сложенные темно-серыми с красно-коричневыми зернами либенерита (псевдоморфозы микрозернистого серицит-нефелинового агрегата по нефелину), К-Ваполевым шпатом, меланитом; 3 – псевдолейцитовые нефелиновые сиениты (ПЛС) светло-серого цвета пятнистой пойкилитовой структуры и 4 – карбонатизированные (КПЛС) разности с симплектитами и нефелин-полевошпатовыми агрегатами, а также Na-К-сиениты (ЩС) (5) среднезернистые с распространением щелочного пироксена – эгирина (см. рис. 2-6; табл. 1). Породы относятся к группе фельдшпатоидных пород основного состава с высокими концентрациями Al₂O₃ (20,5-23,6 мас. %), Na₂O+K₂O (12,3-17,4 мас. %, с преобладанием К₂О), Ва, Sr, Rb, Nb, REE и низкими – CaO (1,08–3,5 мас. %), MgO (0,27– 0,78 мас. %) и FeOtot (2,52-4,2 мас. %) (табл. 1, рис. 4-6). Коэффициент агпаитности (Na₂O+K₂O / Al₂O₃) пород первого типа превышает 1 (от 1,0 до 1,13; среднее – 1,10); второго и третьего типа меняется от 0,83 до 1,01 (среднее – 0,9); четвертого – от 0,89 до 0,96 (среднее – 0,93). На диаграмме SiO₂ – Na₂O+K₂O точки составов соответствуют щелочным породам основного состава, нефелиновым сиенитам (основным фоидолитам по [Магматические..., 1983]) и нефелин-содалитовым кумулатам. На диаграмме Na-Al-К точки составов щелочных пород массива Богдо ложатся на линии трендов, выявленных для магматических серий массива Nechalacho Layered Suite, возникновение которых объясняется фракционированием расплава [Möller, Williams-Jones, 2016] (см. рис. 5). В то же время точки составов карбонатизированных пород находятся за пределами выделенных трендов. Нахождение в породах содалита вместе с нефелином в ВКНС массива Богдо подтверждается данными СЭМ [Zhmodik et al., 2024].

Петрографические и петрохимические данные свидетельствуют о последовательном проявлении изменений пород в процессах либенеритизации – псевдолейцитизации – карбонатизации, которые сопровождаются характерными изменениями содержаний, прежде всего породообразующих компонентов (см. рис. 4, 6).

На вариационных диаграммах Харкера (рис. 4, 6) наглядно фиксируются небольшие отклонения содержаний TiO₂, Al₂O₃, P₂O₅ при либенеритизации BKHC, повышение концентраций Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, BaO, LOI (потери при прокаливании) и снижение – Na₂O и K₂O. По интенсивности и полноте замещения нефелина дисперсным серицит-нефелиновым агрегатом можно условно выделить три уровня либенеритизации: слабо-, средне- и сильно-ЛНС.

Более контрастные вариации компонентов фиксируются для псевдолейцитовых и карбонатизированных пород. Формирование ПЛС сопровождается повышением концентраций SiO₂ до 52,43–54,80 мас. % при снижении Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, BaO и повышении TiO₂ и K₂O. При карбонатизации сокращается SiO₂ от 50,35 до 45,90 мас. % с возрастанием TiO₂, MnO, CaO, P₂O₅ и понижением BaO, Na₂O (рис. 4, 5, табл. 1).

Показательно изменение количества флюидной фазы (LOI – потери при прокаливании) при формировании ЛНС, ПЛС, КПЛС и зависимость от этого параметра суммы щелочей (Na₂O+K₂O), CaO, BaO, которые могут свидетельствовать о том, что карбонатизации подверглись не только ПЛС, но и ЛНС (рис. 5).



Рис. 1. Обобщенная геологическая карта массива Богдо (Анабарский район, Арктическая Сибирь) (с изменениями по [Охлопков и др., 1987])

Условные обозначения: 1 – неопротерозой, улахано-курунгская свита: доломиты с линзами и кремневыми конкрециями; 2 – зона скарнов, фенитизации и карбонатизации; 3 – ювиты, нефелиновые сиениты; 4 – метасоматизированные породы якупирангитийолитовой серии; 5 – якупирангиты, ийолиты, мельтигиты; 6 – ранние кальцитовые карбонатиты; 7 – кальцитовые, доломитовые и анкеритовые карбонатиты; 8 – пикриты, альнёиты; 9 – геологические границы: а – наблюдённые; б – предполагаемые; 10 – разломы: а – наблюдённые; б – предполагаемые; 11 – а) озера; б) реки; 12 – скважина 3257,5 – место отбора проб

Fig. 1. Generalized geological map of the Bogdo massif (Anabar region, Arctic Siberia) (modified from [Okhlopkov et al., 1987])

Legend: 1 - Neoproterozoic, Ulakhano-Kurung formation: dolomites with lenses and flint nodules; 2 - zone of skarns, fenitization and carbonatization; 3 - juvites, nepheline syenites; 4 - metasomatized rocks of the jacupirangite-ijolite series; 5 - yakupirangites, ijolites, meltigites; 6 - early calcite carbonatizes; 7 - calcite, dolomite and ankerite carbonatizes; 8 - picrites, alneuites; 9 - geological boundaries: a - observed; b - expected; 10 - faults: a - observed; b - expected; 11 - a) lakes; b) rivers; 12 - core 3,257.5 - sampling location



Рис. 2. Общий вид щелочных пород массива Богдо

а – крупнозернистые лейкократовые светлые зеленовато-серые высококалиевые нефелиновые сиениты (рисчорриты) пойкилитовой структуры с КПШ, пироксеном, биотитом, амфиболом, сфеном; b – мелкозернистые биотит-эгириновые либенеритизированные сиениты с красно-коричневыми идиоморфными зернами либенерита (псевдоморфозы серицита по нефелину, представленные микрозернистым серицит-нефелиновым агрегатом), К-Ва-полевым шпатом, меланитом; с – псевдолейцитовые светлосерые средне- и мелкозернистые нефелиновые сиениты с пойкилитовой структурой

Fig. 2. General view of alkaline rocks of the Bogdo massif

a - coarse-grained leucocratic greenish-gray HKNS (rischorrites) of poikilitic structure with feldspars, pyroxene, biotite, amphibole, sphene; b - fine-grained biotite-aegirine LNS with red-brown euhedral libenerite grains (sericite pseudomorphs nepheline, represented by micrograined sericite-nepheline aggregate), K-Ba-feldspar, melanite; c - pseudoleucite PLS, medium-fine-grained, spotted poikilitic structure with symplectites and nepheline-feldspathic aggregates



Рис. 3. Микрофотографии ВКНС (a, b), ЛНС (c, d), ПЛС (e), КПЛС (f)

а – типичная пойкилитовая структура ВКНС (рисчоррита) с включениями идиоморфных кристаллов нефелина в КПШ. Крупные светлые зерна представлены нефелином. Эгирин и биотит часто приурочены к контактам нефелина и КПШ. Титанит распространен в виде включений в биотите, полевых шпатах и эгирине; b – крупное зерно биотита с титанитом среди КПШ и нефелина; с – слаболибенеритизированный ВКНС с зональными идиоморфными кристаллами К-Ва-полевого шпата. Зерна нефелина частично замещены высокодисперсным серицит-нефелиновым агрегатом. Темные минералы – эгирин и биотит; d – сильнолибенеритизированный ВКНС с полным замещением кристаллов нефелина серицит-нефелиновым агрегатом. Темные минералы – эгирин и биотит; d – сильнолибенеритизированный ВКНС с полным замещением кристаллов нефелина серицит-нефелиновым агрегатом. Темные минералы – эгирин и биотит практически не изменён; е – типичные симплектитовые структуры ПЛС; f – мелкозернистая масса, представленная карбонатизированным ПЛС с измененными по трещинам кристаллами титанита

Fig. 3. Microphotographs of VKNS (a, b), LNS (c, d), PLS (e), KPLS (f)

a – typical poikilitic texture of HKNS (rischorrite) with inclusions of euhedral nepheline crystals in potassium feldspar. Large light grains are represented by nepheline. Aegirine and biotite are often confined to contacts between nepheline and K-feldspar. Titanite occurs as inclusions in biotite, feldspars, and aegirine; b – large grain of biotite with titanite among potassium feldspar and nepheline; c – weakly libeneritized HKNS with zoned euhedral crystals of K-Ba feldspar. Nepheline grains are partially replaced by highly dispersed sericite-nepheline aggregate. Dark minerals – aegirine and biotite.; d – highly libeneritized HKNS with complete replacement of nepheline crystals by sericite-nepheline aggregate. Biotite is practically unchanged; e – typical symplectite structures of the PLS; f – fine-grained mass represented by carbonated PLS with titanite crystals altered along cracks



Рис. 4. Диаграммы зависимости SiO₂ и породообразующих компонентов Здесь и на рис. 8: 1 – ВКНС; 2 – ПЛС; 3 – ЛНС; 4 – КПЛС; 5 – щелочные К-Na-сиениты

Fig. 4. Diagrams of SiO₂ and rock-forming components Here and in the Fig. 8: 1 – HKNS; 2 – PLS; 3 – LNS; 4 – KPLS; 5 –alkaline K-Na-syenites



Рис. 5. Диаграммы SiO2-Na2O+K2O и Na-Al-K с точками составов

Диаграмма SiO₂–Na₂O+K₂O с точками составов, которые соответствуют нефелиновым сиенитам (основным фоидолитам) и нефелинлин-содалитовым кумулатам (по [Möller, Williams-Jones, 2016]). На диаграмме Na-Al-K точки составов щелочных пород массива Богдо ложатся на продолжение линий трендов (кроме КПЛС), выявленных для магматических серий массива Nechalacho Layered Suite, возникновение которых объясняется фракционированием расплава [Möller, Williams-Jones, 2016]

Fig. 5. Diagrams of SiO₂-Na₂O+K₂O and Na-Al-K with composition points

Diagram of SiO₂–Na₂O+K₂O with composition points that correspond to nepheline syenites (basic foidolites) and nepheline-sodalite cumulates (after [Möller, Williams-Jones, 2016]). On the Na-Al-K diagram, the composition points of alkaline rocks of the Bogdo massif fall on the continuation of trend lines (except for CPLS) identified for the igneous series of the Nechalacho Layered Suite massif, the occurrence of which is explained by melt fractionation [Möller, Williams-Jones, 2016]



Рис. 6. Диаграммы SiO2-Na2O+K2O, -LOI, -BaO; LOI-Na2O+K2O, -CaO, BaO

1−5 - см. рис. 4; I – либенеритизация, II – псевдолейцитизация, III – карбонатизация. LOI – потери при прокаливании при температуре от 100 до 600 °C

Fig. 6. Diagrams SiO₂-Na₂O+K₂O, -LOI, -BaO; LOI-Na₂O+K₂O, -CaO, BaO

1-5 - see Fig. 4; I - libeneritization, II - pseudoleucitization, III - carbonatization. LOI - loss on ignition at temperatures from 100 to 600 °C

Таблица 1

Средние содержания породообразующих компонентов, Аи и Ад (ppb), U и Th (ppm) в породах массива Богдо, мас. %

Table 1

Порода (Rock), (n)	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO _{tot}	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Au	Ag	U	Th
BKHC (HKNS); (8)	50,09	0,50	23,18	2,96	0,35	1,88	7,10	9,44	43	31	3,6	6,9
ПЛНС (PLNS), (6)	53,43	0,66	21,72	2,44	0,34	2,76	2,43	10,79	19	42	1,2	3,2
КПЛС (CPLS), (8)	47,75	0,95	22,31	3,62	0,92	5,30	1,85	9,16	11	5	2,7	5,9
ЛНС (LNS), (21)	49,95	0,44	22,65	3,42	0,52	2,77	4,98	8,06	8	63	2,9	3,8
ЩС (CSHS), (2)	50,71	0,63	22,91	3,58	0,60	2,65	1,75	9,21	5	88	3,4	3,4

Average contents of rock-forming components, Au and Ag (ppb), U and Th (ppm) in rocks of the Bogdo massif, wt %

Примечание. п – число проанализированных проб.

Note. n is the number of analyzed samples.

В разрезе, построенном по керну скважины 3257.5, определенно устанавливается приуроченность ЛНС, ПЛС и КПЛС к верхней части, т.е. к краевой части массива Богдо. При неравномерном распределении, повышенные содержания К (до 9–11 мас. %), Au (до 90–160 мг/т), Th (до 11–15 г/т) фиксируются в слабо-изменённых ВКНС, ПЛС и КПЛС (рис. 7). Для либенеритовых сиенитов и либенеритизированных ВКНС характерны значения Th/U < 1, снижение К и Th и повышенные содержания Ag, с наиболее низкими средними содержания Au (8 мг/т). Отмечается снижение содержаний золота по мере повышения интенсивности либенеритизации нефелиновых сиенитов от $x_{cp} = 15$ мг/т Au (слабо-

ЛНС), $x_{cp} = 13$ мг/т Au (средне-ЛНС) до $x_{cp} = 4$ мг/т Au (сильно-ЛНС). Для серебра отмечается прямо противоположная зависимость – повышение содержаний от $x_{cp} = 11$ мг/т Ag (слабо-ЛНС), до $x_{cp} = 96$ мг/т Ag (сильно-ЛНС).

Корреляционные диаграммы Au–Ag, Au– K₂O/Na₂O, Au–REE_{tot}, Au–BaO, Ag–BaO, Ag–LOI, U–Th, Au–U для пород массива Богдо, наглядно свидетельствуют о важной роли флюида (LOI – потери при прокаливании) и о тенденции близкой к обратной зависимости Au и Ag, что в полной мере подтверждается обратной зависимостью средних содержаний золота и серебра в ряду пород: ВКНС–ЛНС– ПЛС–КПЛС (рис. 8).



Рис. 7. Колонка скв. 3257.5, пробуренной в центральной части щелочного массива Богдо, с графиками распределения Au, Ag, U, Th, K

Условные обозначения: 1 – ВКНС; 2 – слабо-ЛНС; 3 – средне- и сильно-ЛНС; 4 – К-Na-щелочные сиениты; 5 – ПЛС; 6 – КПЛС; 7 – юрские отложения. ЛНС, ПЛС и КПЛС приурочены к верхним уровням разреза, т.е. к краевым частям массива Богдо. Отмечается высокая неравномерность в распределении элементов с обогащением К, Au и Th BKHC, ПЛС и КПЛС. U доминирует над Th в ЛНС. Мах содержания Ag фиксируются в ЛНС

Fig. 7. Well column on hole N 3257.5, drilled in the central part of the Bogdo alkaline massif, with distribution graphs of Au, Ag, U, Th, K

Symbols: 1 – HKNS; 2 – weakly-LNS; 3 – medium and high-LNS; 4 – K-Na-alkaline syenites; 5 – PLC; 6 – KPLS; 7 – Jurassic deposits. LNS, PLC and KPLS are confined to the upper levels of the section, that is, to the marginal parts of the Bogdo massif. There is a high unevenness in the distribution of elements with enrichment of K, Au and Th of HKNS, PLC and KPLS. U dominates Th in the LNS. The max content of Ag is recorded in the LNS

Диаграмма Au–K₂O/Na₂O демонстрирует сложную, но высокую зависимость содержаний Au от соотношений щелочей, что связано с процессами либенеритизации и карбонатизации. Подобная зависимость выявлена для Au и REE_{tot}, что может быть важным при прогнозе Au минерализации в породах и рудах томторского типа. Намечается возрастание содержаний Au с увеличением количества SiO₂, Al₂O₃, Na₂O в породах. В целом Au и особенно Ag активно перераспределяются в процессах последовательного изменения BKHC: либенеритизации, псевдолейцитизации и карбонатизации.

Из ВКНС были выделены частицы самородного золота в виде изометричных (10–20 мкм) и удлиненных (до 100 мкм) тонких пластинок (рис. 9), состав которых соответствует соединениям Au_{0,91}Ag_{0,09} и Au_{0,78}Ag_{0,22}. В самородном золоте состава 94,77– 97,87 мас. % Au и 2,13–5,23 мас. % Ag содержатся минеральные включения K-Na-полевого шпата (микроклина и анортоклаза) и нефелина(?), а в самородном золоте состава 87,47–88,73 мас. % Аи и 11,27– 13,53 мас. % Ад обнаружены включения кальцита.

Заключение

По структурным особенностям (пойкилитовая структура, симплектиты), петрохимическим и минералого-геохимическим данным породы массива Богдо соответствуют высококалиевым нефелиновым сиенитам, либенеритовым сиенитам, псевдолейцитовым сиенитам. Полученные данные свидетельствуют в пользу представлений о формировании пород на магматической стадии, за исключением пород, связанных со стадией карбонатизации. Проявление карбонатизации щелочных пород, со возрастанием содержаний TiO₂ (2,88 мас. %) и REE, позволяет предполагать значительное распространение карбонатитов в массиве Богдо.


Рис. 8. Диаграммы Au–Ag, Au–K₂O/Na₂O, Au–REE, Au–LOI, Au–CaO, Ag–LOI, U–Th, Au–U Диаграммы демонстрируют зависимости соотношения содержаний элементов от изменений ВКНС. Условные обозначения см. на рис. 4

Fig. 8. Diagrams Au–Ag, Au–K₂O/Na₂O, Au–REE, Au–LOI, Au–CaO, Ag–LOI, U–Th, Au–U The diagrams show the dependence of the ratio of element contents on changes in the HCNS



Рис. 9. Морфология и состав тонких пластинок самородного золота из высококалиевого нефелинового сиенита а, b – удлиненное зерно (87,47–88,73 мас. % Au) с включениями кальцита; c, d – изометричное зерно (94,77–97,87 мас. % Au) с включениями К-Na-полевого шпата (микроклина и анортоклаза) и нефелина(?)

Fig. 9. Morphology and composition of thin plates of native gold from high-K nepheline syenite a, b – elongated grain (87.47–88.73 wt % Au) with calcite inclusions; c, d – isometric grain (94.77–97.87 wt % Au) with inclusions of K-Na-feldspar (microcline and anorthoclase) and nepheline(?)

На позднемагматической (автометасоматоз) стадии происходят последовательные или близко одновременные процессы либенеритизации высококалиевых нефелиновых сиенитов и формирование псевдолейцитовых сиенитов, которые в последующем подверглись карбонатизации. Вполне вероятно, что полихронность образования массива Богдо в интервалах 394±3, 362±4 334±4 млн лет связана с выявленной последовательностью формирования пород: ВКНС – ЛНС – ПЛС – карбонатизированные щелочные породы и карбонатиты, последние обнаружены в результате разведочных работ.

Важно отметить, что близкий возрастной интервал 380–360 млн лет [Кгатт, Kogarko, 1994] фиксируется для пород Кольской щелочной провинции. Минеральный состав ВКНС массива Богдо во многом сопоставляется с уникальной минералогией аналогичных пород Хибинского массива [Агеева, 2002; Yakovenchuk et al., 2005].

Максимальная дисперсия и наиболее высокие содержания Au (160 мг/т Au) и Ag (41 мг/т Ag) установлены в ВКНС и ПЛС (среднее – 42,5–44,0 мг/т Au; 28– 38 мг/т Ag). Наиболее низкие содержания Au характерны для КПЛС и сильно-ЛНС.

Самородное золото ВКНС соответствует соединениям Au_{0,91}Ag_{0,09} и Au_{0,78}Ag_{0,22}. Золотины содержат значительное количество включений полевых шпатов разного состава (микроклина и анортоклаза). Полученные результаты свидетельствуют о наличии золота в щелочных породах массива Богдо. Самородное золото имеет морфологию и состав, соответствующий золоту «уджинского» типа.

Установлено влияние количества и состава флюидной фазы (LOI) на распределение как породообразующих оксидов, так и BaO, REE, Au, Ag, U, Th и других элементов. В одном случае повышение LOI характеризует процесс карбонатизации ВКНС (иногда с флюоритизацией) и возрастание содержаний золота, а в другом – процесс либенеритизации. Таким образом, находки самородного золота в высококалиевых нефелиновых сиенитах массива Богдо, в сиенитах и породах Томторского массива [Баранов и др., 2020; Владыкин и др., 2016] позволяют прогнозировать высокую вероятность выявления золотой минерализации в рудах томторского типа.

Список источников

Агеева О.А. Типоморфизм акцессорных минералов и эволюция минералообразования в породах комплекса рисчорритов: Хибинский массив : дис. ... канд. геол.-минерал. наук. 2002. 187 с.

Баранов Л., Толстов А., Округин А. Благородные металлы в щелочных породах и карбонатитах // Материалы X Всероссийской научно-практической конференции «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России». Якутск : Издательский дом СВФУ, 2020. С. 182–186.

Владыкин Н.В. Геохимическая эволюция, рудоносность и глубиннные источники К-щелочных лампроит-карбонатитовых комплексов щитов и складчатых зон. Отчет НИР. Иркутск : ИГХ СО РАН, 2016. 25 с.

Гусев А.И., Гусев Н.И. Золотоносные карбонатиты // Успехи современного естествознания. 2014. № 11. С.25–28.

Когарко Л.Н., Сенин В.Г. Первая находка золота в коренных породах Гулинского массива (Полярная Сибирь) // Доклады РАН. 2011. Т. 441, № 1. С. 81–82.

Кочетков А.Я. Мезозойские золотоносные рудно-магматические системы Центрального Алдана // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 7. С. 850–864.

Магматические горные породы. Классификация, номенклатура, петрография. Ч. 2 / гл. ред. О.А. Богатиков. М. : Наука, 1983. 767 с.

Никифорова З.С., Герасимов Б.Б., Тулаева Е.Г. Генезис золотых россыпей и их возможные источники (восток Сибирской платформы) // Литология и полезные ископаемые. 2011. № 1. С. 21–35.

Округин А.В., Зайцев А.И., Борисенко А.С., Земнухов А.И., Иванов П.О. Золото-платиноносные россыпные месторождения в бассейне реки Анабар и их возможная связь со щелочно-ультраосновными магматическими породами севера Сибирской платформы // Отечественная геология. 2012. № 5. С. 11–20.

Охлопков В.И. Отчет о групповой геологической съёмке по работам Верхне-Уджинского объекта Анабарской партии. Амакинская ГРЭ, 1987.

Airiyants E.V., Zhmodik S.M., Ivanov P.O., Belyanin D.K., Agafonov L.V. Mineral inclusions in Fe–Pt solid solution from the alluvial ore occurrences of the Anabar basin (NE Siberian Platform) // Russian Geology Geophysics. 2014. V. 55. P. 945–958.

Dobretsov N.L., Zhmodik S.M., Lazareva E.V., Tolstov A.V., Belyanina D.K., Surkov O.N., Dobretsov N.N., Rodionov N.V., Sergeev S.A. U–Pb Age of Sphene and the Petrochemical, Mineralogical, and Geochemical Features of Alkaline Rocks of the Bogdo Complex (Arctic Siberia) // Doklady Earth Sciences. 2019. V. 489. Pt 1. P. 1352–1357.

Groves D.I., Vielreiher N.M. The Phalabowra (Palabora) carbonatite-hosted magnetite-copper sulphide deposit, South Africa: an end-member of the iron oxide-coppergold-rare earth element deposit group? // Mineral Deposita. 2001. V. 36, No. 2. P. 189–194.

Kramm U., Kogarko L.N. Nd and Sr isotope signatures of the Khibina and Lovozero agpaitic centres, Kola Alkaline Province, Russia // Lithos. 1994. V. 32. P. 225–242.

Möller W., Williams-Jones A. E. Petrogenesis of the Nechalacho Layered Suite, Canada: Magmatic Evolution of a REE–Nb-rich Nepheline Syenite Intrusion // J. Petrol. 2016. V. 57 (2). P. 229–276.

Pirajno F., Butt C.R.M., Winter E. Gold enrichment in weathered carbonatite pyroclastics of the Kruidfontein Volcanic Complex, South Africa // S. Afr. J. Geol. 1995. V. 98 (3). P. 319–325.

Ryabchikov I.D., Kogarko L.N., Sazonov A.M., Kononkova N.N. Formation of Gold Mineralization in Ultramafic Alkalic Magmatic Complexes // Doklady Earth Sciences. 2016. V. 468. Pt 2. P. 623–625.

Sazonov A.M., Romanovsky A.E., Gertner I.F., Zvyagina E.A., Krasnova T.S., Grinev O.M., Silyanov S.A., Kolmakov Y.V. Genesis of Precious Metal Mineralization in Intrusions of Ultramafic, Alkaline Rocks and Carbonatites in the North of the Siberian Platform // Minerals. 2021. V. 11. № 354.

Wang S., Zhang Y., Guoc H., Wang G., Wange C., Ding K. A new view on the genesis of the Chiweigou gold deposit, Jilin, China: A carbonatite-type deposit // Ore Geology Reviews. 2019. V. 1113. Article 103086.

Wu F.-Y., Yang Y.-H., Li Q.-L., Mitchell R.H., Dawson J.B., Brandl G., Yuhara M. In situ determination of U–Pb ages and Sr–Nd–Hf isotopic constraints on the petrogenesis of the Phalaborwa carbonatite Complex, South Africa // Lithos. 2011. V. 127. P. 309–322.

Yakovenchuk V.N., Ivanyuk G.Y., Pakhomovsky Ya.A., Men'shikov Y.P. Khibiny. Laplandia Minerals. Apatity. 2005. 462 p.

Zhmodik S.M., Travin A.V., Lazareva E.V., Yudin D.S., Belyanin D.K., Tolstov A.V., Dobretsov N.N. The Paleozoic Stage of the Bogdo Massif Alkaline Rocks Formation, Arctic Siberia: ⁴⁰Ar/³⁹Ar Dating Results // Doklady Earth Sciences. 2024. V. 514. Part 2. P. 234–243.

References

Ageeva O.A. *Tipomorfizm aktsessornykh mineralov i evolyutsiya mineraloobrazovaniya v porodakh kompleksa rischorritov: Khibinskiy massiv.* [Typomorphism of accessory minerals and the evolution of mineral formation in the rocks of the rischorrite complex: Khibiny massif]. Brief PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). 2002. 187 p. In Russian

Baranov L., Tolstov A., Okrugin A. *Blagorodnye metally v shchelochnykh porodakh i karbonatitakh* [Noble metals in alkaline rocks and carbonatites] // Materials of the X All-Russian scientific and practical conference "Geology and mineral resources of the North-East of Russia". Yakutsk: NEFU Publishing House. 2020. pp. 182–186. In Russian

Vladykin N.V. Geochemicheskaya evolutsiya, rudonosnost' i glubinnie istochniki K-shelochnykh lamproit-karbonatitovykh kompleksov schitov i skladchatykh zon [Geochemical evolution, ore content and deep sources of K-alkaline lamproite-carbonatite complexes of shields and folded zones]. Research report. Irkutsk: IGC SB RAS. 2016. 25 p. In Russian

Gusev A.I., Gusev N.I. Zolotonosnye karbonatitiy [Gold-rich carbonatites] // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya [Advances in modern science]. 2014. No. 11. pp. 25–28. In Russian

Kogarko L.N., Senin V.G. *Pervaya Nakhodka zolota v korennykh porodakh Gulinskogo massiva (Polyarnaya Sibir')* [The first discovery of gold in bedrock of the Gulinsky massif (Polar Siberia)] // *Doklady RAN* [Reports of the Russian Academy of Sciences]. 2011. V. 441. No. 1. pp. 81–82. In Russian

Kochetkov A.Ya. *Mezozoiskie zolotonosnye rudno-magmaticheskie sistemy Tsentral'nogo Aldana* [Mesozoic gold-bearing oremagmatic systems of Central Aldan] // *Geologiya i geofizika* [Russian geology and Geophysics]. 2006. V. 47. No. 7. pp. 850–864. In Russian

Magmaticheskie gornye porody. Klassifikatsiya nomenklatura, petrografiya [Igneous rocks. Classification, nomenclature, petrography]. Part 2 / Ch. ed. O.A. Bogatikov. Moscow: Nauka. 1983. 767 p. In Russian

Nikiforova Z.S., Gerasimov B.B., Tulaeva E.G. Genezis zolotykh rossypei' i ikh vozmognye istochniki (vostok Sibirskoy platform) [Genesis of gold placers and their possible sources (east of the Siberian platform)] // Litologiya i poleznyye iskopayemyye [Lithology and minerals]. 2011. No. 1. pp. 21–35. In Russian

Okrugin A.V., Zaitsev A.I., Borisenko A.S., Zemnukhov A.I., Ivanov P.O. Zoloto-platinonosnye rossypnye mestorogdeniya v basseine reki Anabar i ikh vozmognaya svyaz' so schelochno-ul'traosnovnymi magmaticheskimi porodami severa Sibirskoi' platformy [Gold-platinum alluvial deposits in the Anabar River basin and their possible connection with alkaline-ultrabasic igneous rocks of the north of the Siberian Platform] // Otechestvennaya Geology [Domestic geology]. 2012. No. 5. pp. 11–20. In Russian

Okhlopkov V.I. Otchet o gruppovoy geologicheskoy s'emke po rabotam Verkhne-Udginskogo ob'ekna Anabarskoy partii [Report on a group geological survey on the work of the Verkhne-Udzhinsky site of the Anabar Party]. Amakinskaya GRE. 1987. In Russian

Airiyants E.V., Zhmodik S.M., Ivanov P.O., Belyanin D.K., Agafonov L.V. Mineral inclusions in Fe–Pt solid solution from the alluvial ore occurrences of the Anabar basin (NE Siberian Platform) // Russian Geology Geophysics. 2014. V. 55. pp. 945–958.

Dobretsov N.L., Zhmodik S.M., Lazareva E.V., Tolstov A.V., Belyanina D.K., Surkov O.N., Dobretsov N.N., Rodionov N.V., Sergeev S.A. U-Pb Age of Sphene and the Petrochemical, Mineralogical, and Geochemical Features of Alkaline Rocks of the Bogdo

Complex (Arctic Siberia) // Doklady Earth Sciences. 2019. V. 489. Part 1. pp. 1352–1357. https://doi.org/10.1134/S1028334X19110205 Groves D.I., Vielreiher N.M. The Phalabowra (Palabora) carbonatite-hosted magnetite-copper sulphide deposit, South Africa: an endmember of the iron oxide-coppergold-rare earth element deposit group? // Mineral Deposita. 2001. V. 36. No. 2. pp. 189–194.

Kramm U., Kogarko L.N. Nd and Sr isotope signatures of the Khibina and Lovozero agpaitic centres, Kola Alkaline Province, Russia // Lithos. 1994. V. 32. pp. 225–242.

Möller W., Williams-Jones A. E. Petrogenesis of the Nechalacho Layered Suite, Canada: Magmatic Evolution of a REE–Nb-rich Nepheline Syenite Intrusion // J. Petrol.2016. V. 57 (2). pp. 229–276. https://doi.org/10.1093/petrology/egw003

Pirajno F., Butt C.R.M., Winter E. Gold enrichment in weathered carbonatite pyroclastics of the Kruidfontein Volcanic Complex, South Africa // S. Afr. J. Geol. 1995. V. 98 (3). pp. 319–325.

Ryabchikov I.D., Kogarko L.N., Sazonov A.M., Kononkova N.N. Formation of Gold Mineralization in Ultramafic Alkalic Magmatic Complexes // Doklady Earth Sciences. 2016. V. 468. Part 2. pp. 623–625. https://doi.org/10.1134/S1028334X16060222

Sazonov A.M., Romanovsky A.E., Gertner I.F., Zvyagina E.A., Krasnova T.S., Grinev O.M., Silyanov S.A., Kolmakov Y.V. Genesis of Precious Metal Mineralization in Intrusions of Ultramafic, Alkaline Rocks and Carbonatites in the North of the Siberian Platform // Minerals. 2021. V. 11. No. 354. https://doi.org/10.3390/min11040354

Wang S., Zhang Y., Guoc H., Wang G., Wange C., Ding K. A new view on the genesis of the Chiweigou gold deposit, Jilin, China: A carbonatite-type deposit // Ore Geology Reviews. 2019. V. 1113. Article 103086. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103086

Wu F.-Y., Yang Y.-H., Li Q.-L., Mitchell R.H., Dawson J.B., Brandl G., Yuhara M. In situ determination of U–Pb ages and Sr–Nd– Hf isotopic constraints on the petrogenesis of the Phalaborwa carbonatite Complex, South Africa // Lithos. 2011. V. 127. pp. 309–322. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.09.005

Yakovenchuk V.N., Ivanyuk G.Y., Pakhomovsky Ya.A., Men'shikov Y.P. Khibiny. Laplandia Minerals. Apatity. 2005. 462 p.

Zhmodik S.M., Travin A.V., Lazareva E.V., Yudin D.S., Belyanin D.K., Tolstov A.V., Dobretsov N.N. The Paleozoic Stage of the Bogdo Massif Alkaline Rocks Formation, Arctic Siberia: ⁴⁰Ar/³⁹Ar Dating Results // Doklady Earth Sciences. 2024. V. 514. Part 2. pp. 234–243. https://doi.org/10.1134/S1028334X23602705

Информация об авторах:

Жмодик С.М., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: zhmodik@igm.nsc.ru

Лазарева Е.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: lazareva@igm.nsc.ru

Айриянц Е.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: jenny@igm.nsc.ru

Белянин Д.К., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: bel@igm.nsc.ru

Киселева О.Н., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: kiseleva_on@igm.nsc.ru

Мусияченко К.А., лаборант, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: musiyachenkoka@igm.nsc.ru

Толстов А.В., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: tols61@mail.ru

Сарыг-оол Б.Ю., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: sarygool@igm.nsc.ru

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Zhmodik S.M., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: zhmodik@igm.nsc.ru

Lazareva E.V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: lazareva@igm.nsc.ru

Airiyants E.V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: jenny@igm.nsc.ru

Belyanin D.K., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: bel@igm.nsc.ru

Kiseleva O.N., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: kiseleva_on@igm.nsc.ru

Musiyachenko K.A., Laboratory Assistant, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: musiyachenkoka@igm.nsc.ru

Tolstov A.V., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: tols61@mail.ru

Saryg-ool B.Yu, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: sarygool@igm.nsc.ru

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 03.06.2024; одобрена после рецензирования 26.07.2024; принята к публикации 27.09.2024

The article was submitted 03.06.2024; approved after reviewing 26.07.2024; accepted for publication 27.09.2024

Научная статья УДК 553.041(571.56) doi: 10.17223/25421379/32/11

ПОВЕДЕНИЕ МАРГАНЦА В КАРБОНАТИТАХ И ИХ КОРАХ ВЫВЕТРИВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ МАССИВА ТОМТОР



Александр Васильевич Толстов¹, Александр Владимирович Лапин²

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

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

² Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ИМГРЭ), Москва, Россия

¹ tols61@mail.ru

² lapin@imgre.ru

Аннотация. Охарактеризовано поведение марганца в щелочно-ультраосновных породах и карбонатитах (УЩК), а также их корах выветривания. Установлено, что из всего разнообразия пород УЩК комплекса коренными источниками марганца являются анкеритовые карбонатиты и анкерит-шамозитовые породы. Показано, что в зоне гипергенеза анкеритовых разновидностей карбонатитового комплекса значительно возрастают концентрации железа и марганца. Установлено, что коры выветривания по анкеритовым разностям карбонатитов представляют собой комплексные природнолегированные железо-марганцевые руды. В корах выветривания карбонатитов массива Томтор оценены прогнозные ресурсы марганца, которые могут достигать 100 млн т.

Ключевые слова: карбонатиты, коры выветривания, геохимия, марганец, железо, Томтор

Источник финансирования: работа выполнена за счет гранта РНФ № 23-63-10017. Химические анализы щелочно-ультраосновных пород и карбонатитов выполнены в рамках государственного задания ИГАБМ СО РАН по архивному каменному материалу, частично собранному в 2014–2020 гг.

Для цитирования: Толстов А.В., Лапин А.В. Поведение марганца в карбонатитах и их корах выветривания на примере массива Томтор (Восточное Прианабарье, Якутия) // Геосферные исследования. 2024. № 3. С. 113–121. doi: 10.17223/25421379/32/11

Original article doi: 10.17223/25421379/32/11

THE BEHAVIOR OF MANGANESE IN CARBONATITES AND THEIR WEATHERING CRUSTS ON THE EXAMPLE OF THE TOMTOR MASSIF

Alexander V. Tolstov¹, Alexander V. Lapin²

¹ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

¹ Diamond and Precious Metal Geology Institute, Yakutsk, Russia

² Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements, Moscow, Russia

¹tols61@mail.ru

² lapin@imgre.ru

Abstract. The behavior of manganese in alkali-ultramafic rocks and carbonatites, as well as their weathering crusts, has been characterized. It has been established that of the entire variety of rocks of the ultrabasic alkaline complex, the root sources of manganese are ankerite carbonatites and ankerite-shamosite rocks. It is shown that concentrations of iron and manganese significantly increase in the hypergenesis zone of ankerite varieties of the carbonatite complex. It has been established that the weathering crusts according to the ankerite differences of carbonatites are complex naturally alloyed iron-manganese ores. In the weathering crusts of carbonatites of the Tomtor massif, the estimated manganese resources, which can reach 100 million tons, have been estimated.

Keywords: carbonatites, weathering crusts, geochemistry, manganese, iron, Tomtor

Source of funding: The research was carried out using the grant of the Russian Science Foundation No. 23-63-10017. The chemical analyses of alkaline-ultramafic rocks and carbonatites were carried out within the framework of the state assignment of the DPMGI SB RAS on archival stone material, partially collected in 2014–2020.

For citation: Tolstov A.V., Lapin A.V., (2024) The behavior of manganese in carbonatites and their weathering crusts on the example of the Tomtor massif. *Geosfernye issledovaniya* – *Geosphere Research*. 3. pp. 113–121. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/32/11

Введение

Минерагения массивов ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (УЩК) в большинстве случаев ограничивалась ниобий-редкоземельной составляющей [Лапин, Толстов, 2011; Похиленко и др., 2023]. Изредка к ним добавлялись железо, фосфор и цирконий (массивы Ессей, Красноярский край, Ковдор, Мурманская область, Россия) [Лапин, Толстов, 1991; Толстов и др., 2014, 2017]. Несмотря на это, эксплуатация Ковдорского апатит-франколитового месторождения, одного из первых открытых в мире месторождений этого типа, вследствие сложностей технологии обогащения карбонатапатита началась только в 2016 г. [Lapin et al., 2024]. За последние три десятилетия в мире были открыты и разведаны новые месторождения карбонатитов, и, в первую очередь, их кор выветривания. При этом некоторые из них не только значительно превосходят по своим параметрам известные разрабатываемые ниобийредкоземельные месторождения этой формации, но и расширяют существующие представления о характере рудоносности и комплексе их сырьевого потенциала [Lapin et al., 2024]. К настоящему времени по этим объектам появились принципиально новые результаты, которые обусловили необходимость пересмотра подхода к другим известным УЩК массивам [Слепцов, Толстов, 2023; Толстов и др., 2023].

К таким уникальным объектам, в первую очередь, относится массив Томтор в Восточном Прианабарье (Россия), к которому приурочено месторождение ультрабогатых комплексных ниобий-редкоземельных руд по уровню концентрации главных рудных компонентов (Nb, TR, Y, Sc) и широкому спектру попутных компонентов (Fe, Mn, Ti, V, P, Al и др.)

Томторское месторождение выходит за рамки существующих представлений о рудоносности кор выветривания карбонатитов и требует пересмотра отношения к карбонатитовым массивам как к поликомпонентной рудной формации [Lapin et al., 2024]. Прежде всего, необходимо выполнить анализ поведения попутных компонентов (Ti, V, Mn и др.), среди которых на первое место выдвигается марганец в силу его специфики и значения для экономики России.

Поведению марганца в массивах УЩК и их корах выветривания, его геохимии при гипергенезе карбонатитов различного состава и установлению причин возникновения промышленных концентраций в корах выветривания посвящена данная работа.

Геологические особенности карбонатитов массива Томтор и их кор выветривания

Томторский массив УЩК расположен на северо-востоке Сибирской платформы, в центральной части Уджинского сводового поднятия [Лапин, Толстов, 1991; Толстов, 1994; Владыкин и др., 2014]. Массив сложен силикатными образованиями щелочно-ультраосновного ряда (нефелин-пироксеновыми породами - фоидолитами, щелочными и нефелиновыми сиенитами, образующими мощное внешнее кольцо, и полиминеральными карбонатитами, слагающими массивное ядро диаметром 4-6 км), а также карбонатно-силикатными разновидностями (рис. 1) с широким проявлением пород карбонат-апатит-магнетит-флогопитового состава (камафориты, фоскориты) [Толстов, Гунин, 2001; Tolstov, 1994]. Комплексное оруденение в пределах массива выявлено НПО «Севморгео» в 1970-х гг. при проведении поисковых работ на алмазы, бокситы, фосфор и REE. С середины 1980-х гг. поисково-оценочные работы на Северном участке проводились ПГО «Якутскгеология», в результате которых выявлено Nb-REE, Fe и P оруденение в корах выветривания. В ходе этих работ выполнено изучение коренных карбонатных и силикатных пород, слагающих массив Томтор [Лапин, Толстов, 1991, 2011], при этом выделены разновидности карбонатитов и залегающих на них горизонтах гипергенного комплекса [Толстов, Гунин, 2001].

В 1986 г. в кровле коры выветривания были выявлены уникальные Nb-REE руды – переотложенные эпигенетически измененные коры выветривания карбонатитов [Лапин, Толстов, 1991; Коноплев и др., 1995], образующие Буранный, Северный и Южный участки, на которых выполнены поисковые и разведочные работы, подтвердившие ресурсы Nb и REE при высоких концентрациях (рис. 1). Оценочные работы, проведенные в 1985–1990 гг. в пределах центральной части массива выявили повышенные концентрации Mn. Так, скважина D1 НПО «Севморгео», продублированная позже геологами ПГО Якутскгеология под № 3665, показала содержания MnO на 30-метровый интервал свыше 20 %.

Последующими работами на Северном и Южном участках в пробах из керна скважин регулярно отмечались концентрации MnO 20–25 % на интервалы 10–110 м, однако специализированных (геолого-минералогических, минералого-геохимических, лабораторно-аналитических и минералого-технологических) исследований на Mn не было проведено, как не установлены и факторы локализации выявленного оруденения [Толстов и др., 1995; Lapin et al., 2007; Слепцов, Толстов, 2023].

Оценка этого уникального объекта на марганец, включенный в Перечень основных видов стратегического минерального сырья в Российской Федерации, утвержденный распоряжением Правительства РФ № 50-Р от 16.01.1996 имеет весьма важное значение. При мировых запасах Mn руд около 250 млн т в России отсутствует собственная подготовленная минеральносырьевая база, а все выявленные Mn-содержащие объекты представлены труднообогатимыми рудами весьма низкого качества. Это обусловило ежегодный импорт Mn руд в Росии в объеме 1 млн т, Mn-Fe-сплавов – 200 тыс. т и металлического Mn – 60 тыс. т [Толстов и др., 2023].

Источником Mn в корах выветривания являются коренные породы УЩК.

При этом из всего разнообразия пород УЩК максимальные концентрации MnO, достигающие 3,0– 3,2 %, наблюдаются в породах редкометалльной подгруппы – анкеритовых карбонатитах и анкерит-шмамозитовых породах (табл. 1), что позволяет рассматривать их как коренные источники Mn оруденения в пределах всего Томторского рудного поля [Толстов, Гунин, 2001].



Рис. 1. Геологическая карта центральной части массива Томтор со снятым чехлом мезо-кайнозойских отложений по [Tolstov et al., 2023]

Условные обозначения: 1 – пермские терригенные отложения; 2 – породы редкометальной подгруппы (анкерит-шамозитовые породы и анкеритовые карбонатиты); 3 – фосфорно-редкометальные карбонатиты; 4 – карбонатиты безрудные и карбонатносиликатные породы; 5 – апатит-магнетитовые породы (фоскориты); 6 – фоидолиты и щелочные сиениты; 7 – контакты комплексов пород: а – четкие, b – нечеткие или постепенные; 8 – тектонические нарушения: а – четкие, b – предполагаемые; 9 – буровые скважины; 10 – контуры уникально богатых Nb-TR руд: участки I – Северный, II – Буранный, III – Южный

Fig. 2. Structure of the central part of the Tomtor massif and the position of areas of development of the Tomtor strata (with the cover of Jurassic and Quaternary rocks removed) according to [Tolstov and at., 2023]

1 – Permian system, Buolkalakh formation (P_{2-3} bl). Sandstones, siltstones, conglomerates, brown coal layers. Carbonatite complex of the final phases of intrusion; 2 – rare-metal carbonatites and ankerite-chamosite rocks (PZ_2); 3 – phosphorus-rare-metal carbonatites and apatite-microcline-mica rocks (PZ_2); 4 – barren calcite and dolomite-calcite carbonatites, calcite-microcline-mica rocks; 5 – kamaphorites (PZ_2). Silicate rocks of early intrusion phases; 6 – alkaline ultramafic rocks of the alneuite-tingguaite series, alkaline and nepheline syenites, foidolites (PZ_2); 7 – geological boundaries: a – established; b – proposed. 8 – discontinuity faults: a – established; b – proposed. (9) boreholes. (10) Boundaries of areas of development: I –Northern, II – Buranny, III – Southern

Средние составы пород массива Томтор, мас. %

Таблица 1 Table 1

Average compositions of rocks of the Tomtor massif, wt %

Породы, n = к-во анализов	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	H ₂ O	Σ	Nb ₂ O ₅
Комплекс силикатных пород															
Фоидолиты, n = 20	35,81	2,37	17,93	5,61	2,15	0,16	4,66	13,06	3,38	7,65	0,84	н/о	5,44	99,06	0,03
Сиениты, n = 14	51,90	0,79	21,75	3,12	3,06	0,17	1,45	1,11	11,45	1,06	0,34	"	3,82	100,02	0,03
Альнеиты, n = 20	30,97	2,96	8,12	6,85	5,24	0,27	14,01	14,33	3,19	0,87	1,38		н/о	94,13	0,04
Пикриты, n = 10	26,80	2,67	5,31	8,45	4,77	0,33	15,48	14,64	2,77	0,66	1,17	"	"	83,05	0,04
				-	Карб	онатип	ювый к	омплек	с	-	-	-			-
Карбонатиты, n = 335	7,06	0,69	1,54	3,62	4,15	1,49	5,28	36,28	1,07	0,17	2,87	32,26	н/о	96,48	0,18
Камафориты (валовая проба)	4,00	4,15	1,36	47,35	26,48	1,05	1,14	1,75	0,32	0,40	0,80	н/о	0,22	89,02	0,06
Безрудная группа															
Кальцит-микро- клин-слюдистые породы, n = 87	29,39	3,04	8,20	5,88	6,80	0,76	6,24	13,28	6,46	0,28	2,59	13,95	н/о	96,87	0,05
Карбонатиты без- рудные, n = 103	7,89	0,77	2,08	3,34	4,23	1,32	6,17	35,08	1,06	0,16	1,62	33,62	"	97,34	0,09
				$\Phi o c$	сфорно	Рудная - <i>редком</i>	я групп <i>іеталы</i>	а: 1 <i>ая под</i> а	epynna						
Апатит-микро- клин-слюдистые породы, n = 143	28,24	3,43	9,58	8,89	10,54	1,41	5,44	9,30	5,08	0,21	5,58	5,71	н/о	93,41	0,18
Карбонатиты фос- форно-редкоме- тальные, n = 194	6,10	0,47	1,17	3,64	3,36	1,26	4,17	39,22	0,90	0,17	3,87	32,43	"	96,76	0,21
					Редка	эметал	ьная по	дгрупп	а						
Анкерит-шамози- товые породы, n = 29	14,40	2,20	4,07	17,23	9,72	3,22	3,98	16,14	0,86	0,14	3,81	13,98	"	89,75	0,33
Карбонатиты редкометальные, n = 37	9,90	1,54	2,00	3,87	8,07	3,20	8,75	24,22	2,08	0,17	1,13	27,71	"	92,64	0,19
	_		_		Эк	сплозив	ные бр	екчии							
Эксплозивные брекчии, n = 20	14,83	3,90	14,01	5,44	16,82	1,41	0,53	7,43	1,28	0,15	11,28	8,22	"	85,30	1,15
77			TTAT		a				-						

Примечание. Анализы выполнены в ЦАЛ ПГО «Якутскгеология», химик-аналитик Т.Р. Забуга.

Note. The analyses were carried out in the Central Analytical Laboratory of the PGO Yakutskgeologiya, chemical analyst T.R. Zabuga.

Характерной особенностью Томторского рудного поля является широкое развитие площадных и линейных кор выветривания, мощности которых весьма различны и напрямую зависят от состава субстрата. Минимальные мощности (5–30 м) имеют плащевые гипергенные образования гидрослюдистого состава, развитые по породам силикатного и карбонатно-силикатного комплексов, максимальные железо-фосфатные образования мощностью свыше 300 м – по карбонатитам [Лапин, Толстов, 1991; Коноплев и др., 1995; Толстов и др., 1995; Толстов, Гунин, 2001].

Гипергенез по породам карбонатитового и силикатного комплексов массива Томтор вследствие неодно-

родности их строения и гетерогенности состава развивался неодинаково. Интенсивнее подвергались гипергенным изменениям наиболее гетерогенные полиминеральные карбонатиты, обогащенные фосфатами и сульфидами (см. табл. 1).

Как видно из табл. 1, из всех коренных пород УЩК массива Томтор наиболее рудоносными на комплекс полезных компонентов являются карбонатиты, содержащие минералы Mn. Максимальные концентрации MnO характерны для поздних доломит-анкеритовых, анкеритовых карбонатитов и анкерит-шамозитовых пород рудной группы редкометальной подгруппы.

Минеральные формы марганца в них разнообразные, но преимущественно это карбонаты: марганцовистый сидерит (олигонит) и родохрозит. Наиболее рудоносными являются латеритные коры выветривания по рудным разновидностям карбонатитов. На первой стадии гипергенеза в коре выветривания образовались два горизонта – нижний (фосфатный) и верхний (оксидный) [Лапин, Толстов, 1991; Lapin et al., 2016]. Характерными продуктами нижнего горизонта являются фосфаты (карбонат-апатит – франколит), верхнего – оксиды Fe и Mn. Близость химических свойств Mn и Fe определяет сходство их поведения при выветривании карбонатитов; при окислении Mn, так же, как и Fe, легко гидролизуется и накапливается, занимая доминирующее положение в остаточных охристых Fe-Mn продуктах (рис. 2).

ыги- 19 Ка	cTb,	неза	HS HC33		B HIMA FOB	Концентрация химических элементов, %											
TOJIC CCK3	N	Fran	eprei	3011	OCTA PTCH	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P2 O5	Co ₂	Nb ₂ O ₅
ли ко Мо	Mo	ГИПО	L'III		Сипе	10 20 30	246	10 20 30	10 20 30	10 20 30	246	1 2 3	10 20 30	246	5 10 15	10 2030	1 2 3
~~~ ~~~	10	нсти- ий	нови- ные	Выно- са	Каолинг кранда- лиговые пореды	-	$\langle \rangle \rangle$								[]		$\square$
င္ငင	22.5	Эпиге	Восста тель	Цемен- тации	Сидери- товые породы	///			111						111		111
# # # # # #	64	ветривания	ные	Выноса	Лимонитовые охры	1 1 1 1 1	11111			11111		11111	11111		11111	11111	111111
Φ # Φ	57.5	эверхностного вын	Окислителы	Ісментации Вторичного фосфатного обогащения	Лимонит- франколитовые породы		11111			11111						11111	11111
Φ # 0 0	20	Ш		1 Оквар- цевания	Лимонит кварцев. породы											111	
Ka Ka Ka	> 100			Рудные карбонатиты		11111			11111					/////	11111		

Рис. 2. Поведение главных породообразующих элементов при выветривании рудных карбонатитов массива Томтор

## Fig. 2. The behavior of the main rock-forming elements during the weathering of ore carbonatites of the Tomtor massif

При прогнозировании залежей Mn в корах выветривания весьма важное значение имеет понимание механизма их генезиса при выветривании. Близость химических свойств Fe с Mn определяет сходство их поведения в процессе гипергенеза, в том числе при выветривании карбонатитов. В окислительных условиях поверхностного выветривания марганец, так же, как и железо, легко гидролизуется и накапливается, занимая доминирующее положение в остаточных охристых Fe-Mn продуктах наравне с фосфатами, с которыми они разделены по горизонтам [Лапин, Толстов, 1991].

При этом Fe и Mn в продуктах гипергенеза карбонатитов образуют самостоятельные минеральные формы (Fe – гётит, гидрогётит и гематит, Mn – псиломелан, пиролюзит, гроутит, голландит, рамсделлит и др.). Средние концентрации MnO в породах гетитового горизонта составляют 5–8 % [Толстов, Гунин, 2001]. Следует отметить, что распределение Mn в остаточных охристых продуктах выветривания карбонатитов массива Томтор во многих случаях прямо коррелируется с распределением не только Fe, но и Ba, что указывает на преобладающую роль в породах единой минеральной формы этих компонентов. Вероятно, их общим минералом является соединение из группы голландита.

Взаимоотношение Fe и Mn в зоне гипергенеза карбонатитов достигает максимума и преобразуется в антагонистические отношения компонентов при включении механизма их разделения и пространственного обособления. При этом на локальных участках латеритного профиля выветривания по карбонатитам обнаруживается обратная тенденция их распределения, что приводит к преобладанию марганца над железом и его накоплению. Этот механизм был впервые установлен в поверхностных фациях кор выветривания анкерит-кальцитовых карбонатитов Чуктуконского месторождения (юг Сибири, Россия), где обнаружено явление жидкостного фракционирования коллоидного раствора на марганцовистую и железистую фазы, которое может лежать в основе процесса разделения и селективного концентрирования Fe и Mn в корах выветривания карбонатитов [Lapin at al., 2016; Lapin et al., 2024].

Доминирующая гётит-гидрогетитовая фаза Fe обособляется в форме шаровидных капель, промежутки между которыми заполняются пленочной интерстициальной марганцовистой фазой голландитового состава. По мере увеличения Mn фазы появляются ее мелкие шаровидные обособления, которые затем сливаются в агрегаты и неправильные скопления. Иногда жидкостное расслоение коллоидного раствора проявляется также в виде тонкой эмульсионной вкрапленности Mn фазы в матрице гётитового состава, укрупнении эмульсии и стягивания ее в сплошные прослои Mn фазы.

Выявленный механизм разделения Fe и Mn в коллоидных растворах кор выветривания карбонатитов позволяет прогнозировать возможность появления практически значимых концентраций марганца, обусловленных этим механизмом [Lapin et al., 2024].

Таким образом, поведение Mn в зоне гипергенеза карбонатитов имеет следующие характерные особенности:

1. Содержание Mn в корах выветривания зависит от концентраций в породах субстрата, которая возрастает в эволюционном ряду карбонатитов от кальцитовых (0,2–0,5 % MnO) до анкеритовых (1,5–2,0 % MnO) и сидеритовых (6,0–8,0 % MnO) разновидностей пород [Толстов, Гунин, 2001].

2. Концентрации Mn зависят от условий выветривания, что, в конечном итоге, обусловливает различия в степени накопления Mn в остаточных продуктах латеритной коры [Lapin and al., 2016].

3. Наиболее благоприятные условия для накопления Мп возникают при разделения Мп–Fe коллоидных растворов и пространственном обособлении Мп фракции в условиях аэрации и интенсивного обводнения, характерных для приповерхностных фаций кор выветривания [Лапин, Толстов, 2011].

Таким образом, именно в латеритных корах выветривания массива Толмтор, развитых на анкеритовых карбонатитах и анкерит-шамозитовых породах, отмечены максимальные концентрации MnO. Изучение вещественного состава руд по поисково-оценочным скважинам проводилось на Nb и TR комплексом современных минералого-аналитических лабораторных методов исследования, применяемых в практике геологоразведочных работ при изучении обогатимости руд. Однако по минерагении марганца при выполнении поисковооценочных работ получены весьма скудные сведения.

Минеральные формы оксидов Mn – пиролюзит, псиломелан и гроутит. В сидеритовом горизонте латеритной коры выветривания широко развиты также карбонаты Мп – олигонит и родохрозит [Толстов, Гунин, 2001]. Интервалы пластового Мп оруденения, залегающего линзообразно в составе лимонитового горизонта гипергенного комплекса по карбонатитам, достигают 30–50 м, при протяженности залежей, локально превышающей 500 м. Формы окисных пиролюзит-псиломелан-гроутит-лимонитовых рудных тел – пластовые и пластово-линзовые, залегающие в мощных горизонтах лимонитовых руд.

Анализируя полученные результаты, можно сделать главный вывод, что выявленное оруденение Mn в латеритных корах выветривания карбонатитов Томторского рудного поля имеет промышленный интерес [Толстов и др., 2023]. Несмотря на то, что специальных исследований по обогатимости руд на Mn выполнено не было [Делицын и др., 2015], как не были оценены и параметры прогнозируемого оруденения, высокие концентрации марганца и широкий размах оруденения свидетельствуют о высокой значимости этого объекта и его потенциальной инвестиционной привлекательности [Толстов и др., 2014, 2017, 2023; Толстов, Самсонов, 2014].

### Прогнозные параметры марганцевого оруденения в пределах массива Томтор

Для прогнозирования потенциально промышленного марганцевого оруденения в пределах Томторского рудного поля наиболее перспективна верхняя часть латеритных кор выветривания, развитая по марганецсодержащим анкеритовым карбонатитам и анкерит-шамозитовым породам, залегающая непосредственно под пластом уникальных Nb-TR пирохлор-монацит-крандаллитовых руд в пределах центральной части массива Томтор.

Анализ полученных результатов показывает наличие неопровержимых данных о широком размахе Mn оруденения на изученных и сопредельных участках, поскольку большая часть мелких скважин, пройденных при поисковой оценке и разведке богатых Nb-TR руд, лишь вскрыли пласты Mn, однако, поскольку их целью был пласт богатых Nb-TR руд, они были остановлены в богатых Fe-Mn рудах, о чем свидетельствуют высокие концентрации MnO на уровне 20–40 % в призабойных пробах мелких скважин (рис. 3).

Это, безусловно, многократно повышает ценность и инвестиционную привлекательность всего Томторского рудного поля [Толстов и др., 2014; Толстов, Самсонов, 2014; Рылов и др., 2017; Слепцов, Толстов, 2023; Толстов и др., 2023]. Судя по результатам поисковых и разведочных скважин, залегание Mn руд в охристых Fe образованиях субгоризонтальное, формы рудных тел пластовые или линзовидные. Мощность обогащенных Mn пластов по скважинам, вскрывшим рудные марганцевые интервалы, составляет около 50 м с вариациями от 13 до 110 м [Толстов и др., 2023]. Прогнозная оценка ресурсов Mn руд, выполненная по результатам анализов поисковых проб, полученных в ГУП «Центргеоланалитик» ПГО «Якутскгеология», показала, что в пределах только одного Северного участка расположена залежь Mn руд в горизонте латеритных кор выветривания, сложенном окисленными железными рудами гетитового состава, образующая пласт средней мощностью 23 м при развитии на общей площади свыше 1,5 км². Таким образом, только на одном этом участке прогнозные ресурсы MnO при среднем содержании его около 13 % превышают 17 млн т (табл. 2).



Рис. 3. Диаграмма Мп–Fe пород в кровле гетитового горизонта (уч. Буранный, скв. 540145, инт. 36,7–45,0 м)

Анализы выполнены в АСИЦ ВИМС

Fig. 3. Diagram of Mn–Fe rocks in the roof of the goethite horizon
(Buranny site, well 540145, depth 36.7–45.0 m)
1 A GIG UP (G

The analyses were performed at ASIC VIMS

Таблица 2

Оценка прогнозных ресурсов MnO (участок Северный, массив Томтор)

Table 2

Площадь оруденения	Средняя мощ- ность руд, м	Объём руд, млн м ³	Удельный вес руд, т/м ³	Объем руд, млн т	Среднее содержание MnO в руде, %	Ресурсы MnO, млн т
1550,6	23	35,7	3,8	135,5	12,83	17,4

Нами отмечено, что зачастую Fe–Mn руды, залегающие непосредственно под уникально богатыми Nb–REE рудами, вскрытые при разведке уникально богатых ниобий-редкоземельных руд участка Буранный, показывают также уникальные концентрации MnO на уровне 20–40 % (см. рис. 3), что позволяет оценивать среднее ожидаемое содержание MnO в прогнозируемом блоке не ниже 20 %.

Приведенные материалы настойчиво диктуют необходимость постановки в пределах Томторского рудного поля на выделенном участке развития анкеритовых карбонатитов и анкерит-шамозитовых пород поисково-оценочных и разведочных работ, специализированных на марганец с углубленным изучением геологии, вещественного состава и технологии обогащения руд [Похиленко и др., 2023].

Предварительные расчеты, учитывающие наличие Fe–Mn руд в центральной части массива на общей площади распространения пород редкометалльной подгруппы 5,5 км² (см. рис. 1, в том числе анкеритовые карбонатиты – 2,5 км² и анкерит-шамозитовые породы – 3,0 км²), а также мощности обогащенных марганцем рудных интервалов в 25 м, при объемном весе руды 3,8 т/м³ и содержании MnO 20 %, дают оценку ресурсов MnO в гетитовом горизонте гипергенного комплекса карбонатитов массива Томтор на уровне 100 млн т [Толстов и др., 2023].

#### Заключение

Помимо уникального Nb–REE оруденения, к карбонатитовому массиву Томтор приурочено нехарактерное для УЩК и их кор выветривания комплексное Fe–Mn оруденение. Коренными породами железа и марганца выступают анкеритовые карбонатиты и анкерит-шамозитовые породы рудной группы. Основное Fe–Mn оруденение сосредоточено в корах выветривания пород редкометальной подгруппы.

Поведение Mn при гипергенезе анкерировых карбонатитов и анкерит-шамозитовых пород аналогично поведению Fe, но при повышении их концентраций свыше 20–30 % корреляция нарушается, в результате чего марганец может преобладать над железом, что обусловливает образование внутри мощного гетитового горизонта обособленных линз и пластов Mn.

Состав Fe–Mn руд – пиролюзит-псиломелан-гроутит-гетитовый; охристые руды слагают залежи оксидного типа с наложенной участками карбонатизаций (сидеритом, олигонитом и родохрозитом). В пределах Северного участка массива Томтор на площади в 1,5 км² в латеритных корах выветривания оценены ресурсы MnO на уровне 17 млн т при среднем содержании MnO около 13 %.

Общие ресурсы MnO оксидного и карбонатизированного типов руд в пределах Томторского рудного поля в прогнозируемом блоке в контуре анкеритовых карбонатитов и анкерит-шамозитовых пород оцениваются нами в объеме 100 млн т при среднем содержании MnO на уровне 20 %.

#### Список источников

Владыкин Н.В., Котов А.Б., Борисенко А.С., Ярмолюк В.В., Похиленко Н.П., Сальникова Е.Б., Травин А.В., Яковлева С.З. Возрастные рубежи формирования щелочно-ультраосновного массива Томтор: результаты геохронологических U-Pb и ⁴⁰Ar-³⁹Ar-исследований // ДАН. 2014. Т. 454, № 2. С. 195–199.

Делицын Л.М., Мелентьев Г.Б., Толстов А.В., Магазина Л.А., Самонов А.Е., Сударева С.В. Технологические проблемы Томтора и их решение // Редкие земли. 2015. № 2 (5). С. 164–179.

Коноплев А.Д., Толстов А.В., Васильев А.Т., Нечелюстов Г.Н., Кузьмин В.И., Скляднева В.М., Дубинчук В.Т., Коноплева Е.В., Сидоренко Г.А. Особенности локализации редкометального оруденения на месторождении Томтор // Редкометально-урановое рудообразование в осадочных породах. М. : Наука, 1995. С. 223–241.

Лапин А.В., Толстов А.В. Окислительный и восстановительный этапы формирования зоны гипергенеза карбонатитов и их рудоносность // Геология рудных месторождений. 1991. Т. 33, № 4. С. 81–91.

Лапин А.В., Толстов А.В. Минерагения кор выветривания карбонатитов. М. : ГЕОКАРТ ГЕОС, 2011. 308 с.

Похиленко Н.П., Афанасьев В.П., Толстов А.В., Крук Н.Н., Похиленко Л.Н., Иванова О.А. Перспективы развития и проблемы освоения сырьевой базы дефицитных стратегических видов твердых полезных ископаемых Сибири // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65, № 5. С. 476–492.

Рылов Д.А., Слепцов А.П., Толстов А.В. Перспективы Томторского рудного поля на новые виды полезных ископаемых // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. Якутск, 2017. С. 423–427.

Слепцов А.П., Толстов А.В. Перспективы Томторского рудного поля на выявление месторождений марганца // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России : материалы XIII ВНПК с междунар. участием. Якутск, 2023. С. 261–266.

Толстов А.В., Гунин А.П. Комплексная оценка Томторского месторождения // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2001. № 11. С. 144–160.

Толстов А.В., Похиленко Н.П., Лапин А.В., Крюков В.А., Самсонов Н.Ю. Инвестиционная привлекательность Томторского месторождения и перспективы ее повышения // Разведка и охрана недр. 2014. № 9. С. 25–30.

Толстов А.В., Похиленко Н.П., Самсонов Н.Ю. Новые возможности получения редкоземельных элементов из единого арктического источника // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. 2017. Т. 10, № 1. С. 125–138.

**Толстов А.В., Похиленко Н.П., Слепцов А.П.** Перспективы Томторского рудного поля на месторождения марганца // Щелочной и кимберлитовый магматизм Земли и связанные с ним месторождения стратегических металлов и алмазов : материалы междунар. конф. Апатиты, 2023. С. 406–410.

Толстов А.В., Самсонов Н.Ю. Томтор: геология, технологии, экономика // ЭКО. 2014. № 2 (476). С. 36–44.

Толстов А.В., Энтин А.Р., Тян О.А., Орлов А.Н. Промышленные типы месторождений в карбонатитовых комплексах Якутии. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1995. 168 с.

Lapin A.V., Kulikova I.M., Tolstov A.V. Distribution of REE, Y, Sc, and Th in the unique complex rare-metal ores of the Tomtor deposit // Geochemistry International. 2016. V. 54, № 12. P. 1061–1078.

Lapin A.V., Tolstov A.V., Nabelkin O.A., Kulikova I.M. Unique multicomponent Fe, Mn, Ti, V mineralization in laterite profiles of weathered carbonatites: new prospects // Russian Geology and Geophysics. 2024. V. 65 (8). P. 927–935.

Tolstov A.V. Mineralogy and Geochemistry o apatite-magnetite ores of the Tomtor massif (Northwestern Yakutia) // Russian Geology and Geophysics. 1994. V. 35, No. 9. P. 76–84.

Tolstov A.V., Cherenkov V.G., Baranov L.N. Genesis and age of the thickness of the Tomtor deposit of niobium and rare earth elements (Northeast Siberian platform) // Geology of Ore Deposits. 2023. V. 65, No. S2. P. S276–S286.

#### References

Vladykin N.V., Kotov A.B., Borisenko A.S., Yarmolyuk V.V., Pokhilenko N.P., Salnikova E.B., Travin A.V., Yakovleva S.Z. Age limits of formation of the alkaline ultrabasic Tomtor massif: results of geochronological U-Pb and ⁴⁰Ar-³⁹Ar studies // *DAN* [Doklady Earth Science]. 2014. V. 454. No. 2. pp. 195–199. In Russian

Delitsyn L.M., Melentyev G.B., Tolstov A.V., Shop L.A., Samonov A.E., Sudareva S.V. Technological problems of Tomtor and their solution // Redkiye zemli [Rare Earths]. 2015. No. 2 (5). pp. 164–179. In Russian

Konoplev A.D., Tolstov A.V., Vasiliev A.T., Nechelyustov G.N., Kuzmin V.I., Sklyadneva V.M., Dubinchuk V.T., Konopleva E.V., Sidorenko G.A. *Osobennosti lokalizatsii redkometal 'nogo orudeneniya na mestorozhdenii Tomtor*. [Features of localization of rare metal mineralization at the Tomtor deposit]. In the collection: Rare-metal uranium ore formation in sedimentary rocks. Moscow: Nauka. 1995. pp. 223–241. In Russian

Lapin A.V., Tolstov A.V. Oxidative and reductive stages of formation of the carbonatite hypergenesis zone and their ore content // *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology of ore deposits]. 1991. V. 33. No. 4. pp. 81–91. In Russian

Lapin A.V., Tolstov A.V. *Minerageniya kor vyvetrivaniya karbonatitov* [Minerageny of carbonatite weathering crust]. Moscow: GEOKART: GEOS. 2011. 308 p. In Russian

Pokhilenko N.P., Afanasyev V.P., Tolstov A.V., Kruk N.N., Pokhilenko L.N., Ivanova O.A. Prospects of development and problems of development of the raw material base of scarce strategic types of solid minerals of Siberia // *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology of ore deposits]. 2023. V. 65. No. 5. pp. 476–492. In Russian

Rylov D.A., Sleptsov A.P., Tolstov A.V. *Perspektivy Tomtorskogo rudnogo polya na novyye vidy poleznykh iskopayemykh* [Prospects of the Tomtorsky ore field for new types of minerals]. In the collection: Geology and mineral resources of the North-East of Russia. Yakutsk. 2017. pp. 423–427. In Russian

Sleptsov A.P., Tolstov A.V. *Perspektivy Tomtorskogo rudnogo polya na vyyavleniye mestorozhdeniy margantsa* [Prospects of the Tomtorsky ore field for the identification of manganese deposits]. In: Geology and mineral resources of the North-East of Russia. XIII VNPK with international participation. Yakutsk, 2023. pp. 261–266. In Russian

Tolstov A.V., Gunin A.P. Comprehensive assessment of the Tomtorskoye field // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya [Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geology]. 2001. No. 11. pp. 144–160. In Russian

Tolstov A.V., Pokhilenko N.P., Lapin A.V., Kryukov V.A., Samsonov N.Yu. Investment attractiveness of the Tomtorskoye field and prospects for its improvement // *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and protection of the subsoil]. 2014. No. 9. pp. 25–30. In Russian Tolstov A.V., Pokhilenko N.P., Samsonov N.Yu. New possibilities for obtaining rare earth elements from a single Arctic source //

Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Khimiya [Journal of the Siberian Federal University. Series: Chemistry]. 2017. V. 10. No. 1. pp. 125–138. In Russian

Tolstov A.V., Pokhilenko N.P., Sleptsov A.P. *Perspektivy Tomtorskogo rudnogo polya na mestorozhdeniya margantsa*. [Prospects of the Tomtorsky ore field for manganese deposits]. Collection of articles: Alkaline and kimberlite magnatism of the Earth and related deposits of strategic metals and diamonds, Proceedings of the international conference, Apatity, 2023. pp. 406–410. In Russian

Tolstov A.V., Samsonov N.Y. Tomtor: geology, technology, economics // ECO. 2014. No. 2 (476). pp. 36-44. In Russian

Tolstov A.V., Entin A.R., Tyan O.A., Orlov A.N. Promyshlennyye tipy mestorozhdeniy v karbonatitovykh kompleksakh Yakutii [Industrial types of deposits in the carbonatite complexes of Yakutia]. Yakutsk: YANTS SB RAS. 1995. 168 p. In Russian

Lapin A.V., Kulikova I.M., Tolstov A.V. Distribution of REE, Y, Sc, and Th in the unique complex rare-metal ores of the Tomtor deposit // Geochemistry International. 2016. V. 54. No. 12. pp. 1061–1078.

Lapin A.V., Tolstov A.V., Nabelkin O.A., Kulikova I.M. Unique multicomponent Fe, Mn, Ti, V mineralization in laterite profiles of weathered carbonatites: new prospects // Russian Geology and Geophysics. 2024. V. 65 (8). pp. 927–935

Tolstov A.V. Mineralogy and Geochemistry o apatite-magnetite Ores of the Tomtor massif (Northwestern Yakutia) // Russian Geology and Geophysics. 1994. V. 35. No. 9. pp. 76–84.

Tolstov A.V., Cherenkov V.G., Baranov L.N. Genesis and age of the thickness of the Tomtor Deposit of niobium and rare-earth elements (Northeast Siberian platform) // Geology of Ore Deposits. 2023. V. 65. No. S2. pp. S276–S286.

#### Информация об авторах:

**Толстов А.В.,** доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия; ведущий научный сотрудник, лаборатория благородных металлов, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия.

E-mail: tols61@mail.ru

**Лапин А.В.**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт минералогии геохимии и кристаллохимии редких элементов, Москва, Россия.

E-mail: lapin@imgre.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Information about the authors:

**Tolstov A.V.,** Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia; Leading Researcher, Laboratory of Precious Metals, Diamond and Precious Metal Geology Institute, Yakutsk, Russia. E-mail: tols61@mail.ru

Lapin A.V., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements, Moscow, Russia.

E-mail: lapin@imgre.ru

### Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 31.05.2024; одобрена после рецензирования 08.07.2024; принята к публикации 27.09.2024

The article was submitted 31.05.2024; approved after reviewing 08.07.2024; accepted for publication 27.09.2024

Научный журнал

### ГЕОСФЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### **GEOSPHERE RESEARCH**

### 2024. № 3

Редактор Ю.П. Готфрид Оригинал-макет А.И. Лелоюр Редактор-переводчик С.И. Гертнер Дизайн обложки Л.Д. Кривцовой

Для оформления обложки использована проекция Земного шара из работы: Stampfli G.M., Borel G.D. / Earth and Planetary Science Letters 196 (2002) 17-33. http://dx.doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00588-X

> Подписано к печати 30.09.2024 г. Формат 60×84¹/₈. Гарнитура Times. Печ. л. 15,2; усл. печ. л. 14,1. Тираж 50 экз. Заказ № 6045. Цена свободная.

> > Дата выхода в свет 28.10.2024 г.

Журнал отпечатан на полиграфическом оборудовании Издательства Томского государственного университета 634050, г. Томск, Ленина, 36 Тел. 8(382-2)–52-98-49; 8(382-2)–52-96-75 Сайт: http://publish.tsu.ru; E-mail: rio.tsu@mail.ru