

Российская Академия Наук

ВЕСТНИК

Кольского научного центра РАН

3/2017



- НАУКИ О ЗЕМЛЕ
- БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ
- ХРОНИКА
- КНИГОИЗДАНИЕ
- ЮБИЛЯРЫ
- AD MEMORIAM

3/2017(9)

издается с декабря 2009 года
ISSN 2307-5228

Российская Академия Наук

ВЕЕСТНИК

Кольского научного центра РАН

Учредитель — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Кольский научный центр РАН

Главный редактор — чл.-корр. РАН, проф.
С. В. Кривовичев

Заместители главного редактора:
д. г.-м. н., проф. В. П. Петров,
д. т. н., проф. А. Я. Фридман
(руководитель редакции)

Ответственность за суждения и оценки, выраженные в публикуемых статьях, как и за точность и надежность приводимых сведений, лежит исключительно на авторах; публикация статей не является свидетельством того, что издатель — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Кольский научный центр РАН — разделяет мнение их авторов.

Редакционный совет:

академик РАН, проф. Г. Г. Матишов,
академик РАН, проф. Н. Н. Мельников,
чл.-корр. РАН, проф. В. К. Жиров,
чл.-корр. РАН, проф. А. И. Николаев,
д. т. н., проф. Б. В. Ефимов,
д. э. н., проф. Ф. Д. Ларичкин,
д. т. н. В. А. Маслобоев,
д. т. н., проф. В. А. Путилов,
д. ф.-м. н. Е. Д. Терещенко,
к. г.-м. н. А. Н. Виноградов (отв. секретарь)

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) с 2009 г.

Подписной индекс в каталоге «Почта России» — П3898

Научное издание

Редакторы: А. С. Менделева, С. А. Шарам, Е. Н. Еремеева
Технический редактор: В. Ю. Жиганов

Подписано к печати 04.10.2017. Формат бумаги 60×84 1/8
Усл. печ. л. 12,2. Заказ № 43. Тираж 500 экз.

ФГБУН КНЦ РАН

184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14

СОДЕРЖАНИЕ

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Балаганский В. В., Рауд М. Ю., Сидоров М. Ю.

Архейские габбро-амфиболиты эколгитового участка Куру-Ваара, Беломорская провинция: геология, петрография, геохимия и происхождение 5

Ветрин В. Р.

Этапы формирования нижней коры Беломорского подвижного пояса по данным изучения U-Pb и Lu-Hf изотопных систем циркона из гранатовых гранулитов 24

Казаченко В. Т., Перевозникова Е. В.

Минералогия благородных металлов в марганцево-силикатных породах триасовой кремневой формации Сихотэ-Алиня 32

Каулина Т. В., Ляпина Л. М., Нерович Л. И., Аведисян А. А., Ильченко В. Л., Бочаров В. Н., Ниткина Е. А.

Процессы гидротермального изменения в цирконе как отражение геохимии урана в породах (на примере уранового рудопоявления Скальное Лицевского района Кольского полуострова) 54

Козлов Н. Е., Мартынов Е. В., Сорохтин Н. О., Марчук Т. С.

Связь особенностей палеозойского магматизма Кольского региона со спецификой магматизма докембрия 64

Нерадовский Ю. Н., Грошев Н. Ю., Войтеховский Ю. Л., Бороздина С. В., Савченко Е. Э.

О минералах платины, палладия, серебра и золота в Порьереченском титаноносном комплексе (Кольский полуостров) 71

Яковлев Ю. Н., Яковлева А. К., Серов П. А.

Новые данные о строении и составе архейского комплекса разреза СГ-3 88

Асадов Х. Г., Аскерова С. А.

Качественный анализ экстремальных свойств пространственного распределения степени подкисления океанических вод из-за роста процентного содержания CO₂ в атмосфере 99

Терещенко Е. Д., Сидоренко А. Е., Григорьев В. Ф., Терещенко П. Е.

Немонотонная амплитудно-частотная зависимость магнитного поля контролируемого наземного КНЧ-источника в дневное время 104

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Денисов В. В., Жичкин А. П.

Эколого-географическое обоснование предкадастровых исследований прибрежно-морской зоны Западного Мурмана в Баренцевом море (на примере аквакультуры в губах Печенга и Ура) 111

Королёва Н. Е., Исаева Л. Г., Боровичёв Е. А.

Состав, структура и состояние лесов в среднем течении реки Умба (Мурманская область) 119

ХРОНИКА 130

КНИГОИЗДАНИЕ 131

ЮБИЛЯРЫ 133

AD MEMORIAM 146

Требования к оформлению статей см.:

<http://www.kolasc.net.ru/russian/news/vestnik/trebovaniya.pdf>

Редколлегия:

д. т. н. З. С. Абишева, д. и. н. И. Ю. Винокурова, д. б. н. Н. К. Белишева, к. т. н. П. Б. Громов, д. б. н. Ф. Зользер, д. ф.-м. н. В. Е. Иванов, д. б. н. Н. А. Кашулин, д. э. н. А. И. Кибиткин, д. т. н. А. А. Козырев, д. т. н. Н. В. Коровкин, член-корр. РАН В. Н. Лаженцев, д. б. н. П. Р. Макаревич, д. т. н. А. Г. Олейник, д. и. н. И. А. Разумова, к. г.-м. н. Т. В. Рундквист, д. э. н. В. С. Селин, к. т. н. А. Ф. Усов (отв. секретарь), PhD Я. М. Федорчук, д. т. н. А. Я. Фридман (руководитель редакции), PhD М. Хи, PhD Ф. Ши

3/2017 (9)

Published since December 2009

ISSN 2307-5228

Russian Academy of Sciences

HERALD

of the Kola Science Centre of the RAS

Publisher — Federal State Budgetary Institution
of Science Kola Science Centre of the RAS

Editor-in-Chief — S. V. Krivovichev,

Corr. Member of the RAS, Prof.;

Vice Editors-in-Chief:

V. P. Petrov, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Prof.

A. Ya. Fridman, Dr. Sci. (Eng.), Prof.

(Head of Editorial Staff)

Editorial Board:

G. G. Matishov, Academician of the RAS, Prof.;

N. N. Mel'nikov, Academician of the RAS, Prof.;

V. K. Zhironov, Corr. Member of the RAS, Prof.;

A. I. Nikolaev, Corr. Member of the RAS, Prof.;

B. V. Efimov, Dr. Sci. (Eng.), Prof.;

F. D. Larichkin, Dr. Sci. (Econ.), Prof.;

V. A. Masloboev, Dr. Sci. (Eng.);

V. A. Putilov, Dr. Sci. (Eng.), Prof.;

E. D. Tereshchenko, Dr. Sci. (Phys. & Math.);

A. N. Vinogradov, PhD (Geol. & Mineral.) —

Responsible Secretary

The responsibility for opinions, expressed in the signed articles, studies and other contributions rests solely with the authors, and publication does not constitute any endorsement of the Federal State Institution of Science Kola Science Centre of the RAS for the opinions, expressed in them.

The journal has been included in the Russian Science Citation Index (RISC) since 2009

CONTENTS

EARTH SCIENCES

- Victor V. Balagansky, Margarita Yu. Raud, Mikhail Yu. Sidorov*
Archaean Gabbro-Amphibolites of the Kuru-Vaara Eclogite Study Area, Belomorian Province:
Geology, Petrography, Geochemistry and Origin 5
- Valeriy R. Vetrin*
Stages of the Belomorian Mobile Belt Lower Crust Formation According to Studying of U-Pb
and Lu-Hf Isotope Systems of Zircon from Garnet Granulites 24
- Valentin T. Kazachenko, Elena V. Perevoznikova*
Mineralogy of Precious Metals in Manganese Silicate Rocks of the Triassic Silicon Formation
of the Sikhote-Alin 32
- Tatiana V. Kaulina, Lyudmila M. Lyalina, Lyudmila I. Nerovich, Anaida A. Avedisyan, Vadim L. Il'chenko,
Vladimir N. Bocharov, Elena A. Nitkina*
Processes of Hydrothermal Change in Zircon as Manifestation of Uranium Geochemistry in Rocks
(A Case Study of Skalnoye Uranium Ore Occurrence in Litsa Region, Kola Peninsula) 54
- Nikolay E. Kozlov, Evgeny V. Martynov, Nikolay O. Sorokhtin, Tatyana S. Marchuk*
The Connection of the Peculiarities of Paleozoic Magmatism in the Kola Region with the Specifics
of Precambrian Magmatism 64
- Yury N. Neradovsky, Nikolay Yu Groshev., Yury L. Voytekhovskiy,
Svetlana V. Borozdina, Eugene E. Savchenko*
Minerals of Platinum, Palladium, Argentinum and Gold of the Por'yerechensky Titan-Bearing
Complex (Kola Peninsula) 71
- Yury N. Yakovlev, Antonina K. Yakovleva, Paul A. Serov*
New Data on the Structure and Composition of the Sd-3 Section Archaean Complex 88
- Hikmet G. Asadov, Sima A. Askerova*
Qualitative Analysis of Extreme Features of Spatial Distribution of Level of Ocean Water Acidification
Due to Increase of Percentage of CO₂ in Atmosphere 99
- Eugene D. Tereshchenko, Anton E. Sidorenko, Valery F. Grigoriev, Paul E. Tereshchenko*
Non-Monotonic Amplitude-Frequency Dependence of ELF Magnetic Field Excited by Ground-Based
Controlled Source in Daylight Conditions 104

BIOLOGICAL SCIENCE

- Vladimir V. Denisov, Alexander P. Zhichkin*
Ecological and Geographical Substantiation of Pre-Cadastral Researches
of the Coastal-Marine Zone of West Murman in the Barents Sea (Using the Aquaculture
in Pechenga and Ura Lips as an Example) 111
- Natalia E. Koroleva, Lyudmila G. Isaeva, Eugene A. Borovichev*
Composition, Structure and State of the Forests in the Middle Flow of Umba River
(Murmansk Province) 119
- NEWS** 130
- NEW BOOKS** 131
- ANNIVERSARIES** 133
- AD MEMORIAM** 146

Information for authors:

<http://www.kolasc.net.ru/russian/news/vestnik/trebovaniya.pdf>

Editorial Board:

Z. S. Abisheva, Dr. Sci. (Eng.); I. Yu. Vinokurova, Dr. Sci. (History); N. K. Belisheva, Dr. Sci. (Bio);
P. B. Gromov, PhD (Eng.); F. Zoelzer, Dr. Sci. (Bio); V. E. Ivanov, Dr. Sci. (Phys. & Math.);
N. A. Kashulin, Dr. Sci. (Bio); A. I. Kibitkin, Dr. Sci. (Econ.); A. A. Kozyrev, Dr. Sci. (Eng.); N. V. Korovkin,
Dr. Sci. (Eng.); V. N. Lazhentsev, Corr. Member of the RAS; P. R. Makarevich, Dr. Sci. (Bio); A. G. Olejnik,
Dr. Sci. (Eng.); I. A. Razumova, Dr. Sci. (History); T. V. Rundkvist, PhD (Geol. & Mineral.); V. S. Selin, Dr.
Sci. (Econ.); A. F. Usov, PhD (Eng.) — Executive Secretary; Ya. M. Fedortchouk, PhD; A. Ya. Fridman,
Dr. Sci. (Eng.) — Head of Editorial Staff; M. Hi, PhD; F. Shi, PhD

УДК 551.24

**АРХЕЙСКИЕ ГАББРО-АМФИБОЛИТЫ ЭКЛОГИТОВОГО УЧАСТКА
КУРУ-ВААРА, БЕЛОМОРСКАЯ ПРОВИНЦИЯ: ГЕОЛОГИЯ, ПЕТРОГРАФИЯ,
ГЕОХИМИЯ И ПРОИСХОЖДЕНИЕ***

В. В. Балаганский^{1,2}, М. Ю. Рауд¹, М. Ю. Сидоров¹

¹ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

²ФГБОУ Мурманский государственный технический университет

Аннотация

Габбро-амфиболиты Куру-Ваары являются метаморфизованными габброноритами толеитовой серии, внедрившимися на последних этапах архейской истории Беломорской провинции. По ряду геохимических черт они схожи с другими неоархейскими интрузиями базитов этой провинции и, скорее всего, внедрились вместе с ними 2,69–2,73 млрд лет назад. Данные по редким землям и ряду рассеянных элементов противоречат корреляции всех этих пород с базальтами срединно-океанических хребтов и указывают на то, что наиболее вероятно их образование в условиях, связанных с дугами. Вместе с архейскими эклогитами и офиолитами они маркируют архейскую зону субдукции.

Ключевые слова:

габбро-амфиболиты, эклогиты, архей, Беломорская провинция, Балтийский щит.

**ARCHAEAN GABBRO-AMPHIBOLITES OF THE KURU-VAARA ECLOGITE STUDY AREA,
BELOMORIAN PROVINCE: GEOLOGY, PETROGRAPHY, GEOCHEMISTRY AND ORIGIN**

Victor V. Balagansky^{1,2}, Margarita Yu. Raud¹, Mikhail Yu. Sidorov¹

¹Geological Institute of the KSC of the RAS

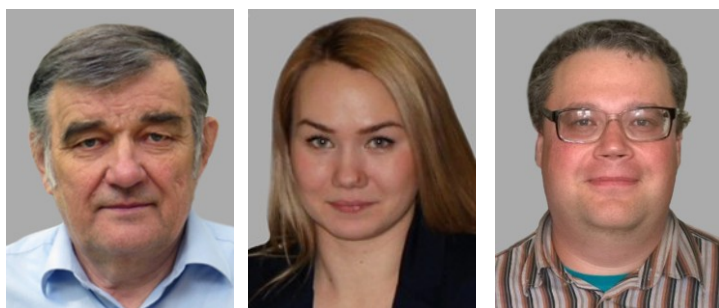
²Murmansk State Technical University

Abstract

The Kuru-Vaara gabbro-amphibolites represent metamorphosed gabbro-norites of the tholeiitic magma series which formed at the final stages of Archaean history of the Belomorian Province. According to some geochemical features, these rocks are similar to other Neoarchaeal basic intrusions of the Province and, more likely, intruded along with them 2,69–2,73 Ga ago. Data on rare earth and some trace elements contradict correlation of these rocks with mid-oceanic ridge basalts and suggest that the arc-related setting of their formation is most probable. These together with Archaean eclogites and ophiolites can trace an Archaean subduction zone.

Keywords:

gabbro-amphibolite, eclogite, Archaean, Belomorian Province, Baltic Shield.



Введение

Беломорская провинция является одной из главнейших тектонических структур Балтийского щита, которая почти полностью сложена архейскими породами, деформированными и глубоко метаморфизованными в результате неоархейской коллизионной орогении [1, 2]. В палеопротерозое она была юго-

* Каменный материал был собран в рамках проекта РФФИ 16-05-01031А (полевые работы в 2016 г.) и подготовлен для исследований согласно плану НИР Ги КНЦ РАН (тема № 0231-2015-0004), аналитические данные были получены и обобщены при финансовой поддержке РФФИ проектов 16-05-00479А (геохимические исследования) и 16-05-01031А (петрографические исследования и обсуждение результатов).

западным флангом Лапландско-Кольского коллизионного орогена и претерпела неоднородную деформационную и метаморфическую переработку [1, 3]. Одной из особенностей геологической истории Беломорской провинции являются разные масштабы plutонического базитового магматизма в палеопротерозое и неогархее. Если начало палеопротерозоя в Беломорье ознаменовалось внедрением в архейские тоналит-грандьемит-гранодиоритовые гнейсы и амфиболиты (далее — амфиболитосерогнейсовая матрица) многочисленных основных интрузий с коронитовыми структурами, широко известными как друзиты [1, 4], то в неогархее проявления plutонического основного магматизма были единичными. В настоящее время архейские базитовые интрузии известны в районах губы Тупой оз. Ковдозеро [5], оз. Нотозеро [6] и с. Гридино [7], а также на участке Куру-Ваара [8, 9] (рис. 1, а).

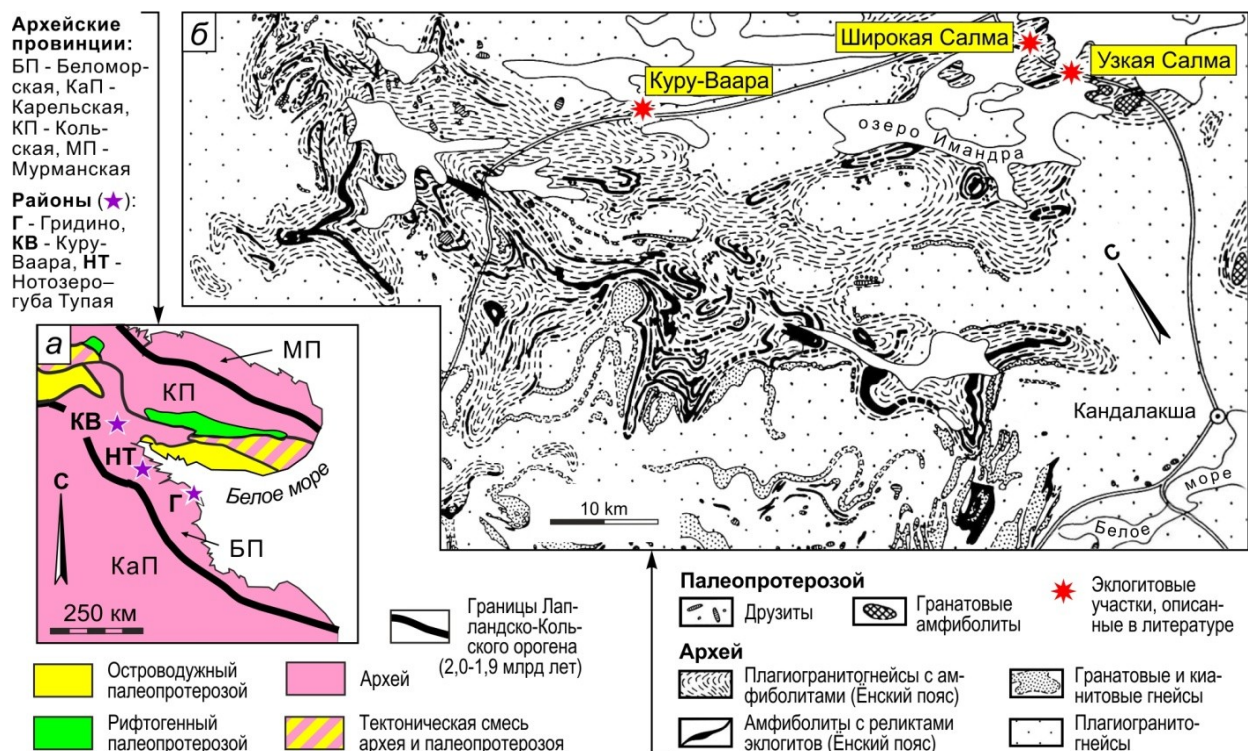


Рис. 1. Схема геологического строения северо-восточной части Балтийского щита (а) (по работе [10], с упрощениями) и геологическая карта Ёнско-Риколатвинской зоны Ёнского сектора Беломорского провинции, изобилующей пластовыми телами архейских амфиболитов (б) (по работе [11], с упрощениями)

Возраст тупогубских габбро и гридинских габброидов, определенный по циркону, составляет $2692 \pm 1,4$ и 2711 ± 25 млн лет соответственно [7, 12], то есть внедрение этих пород, учитывая аналитические погрешности, произошло практически одновременно. Аналогичная датировка (2694 ± 11 млн лет) была получена для нотозерских габбро, но она интерпретируется как возраст метаморфизма, а кристаллизация габбро отнесена к периоду 2,71–2,73 млрд лет [6]. Эти интрузии являются индикаторами тектонической обстановки в Беломорской провинции 2,7 млрд лет назад, которая пока остается не до конца ясной. В предлагаемой статье приводятся новые данные о геологии, петрографии, геохимии и происхождении архейских основных интрузий Куру-Ваары, информация о которых была очень краткой. Повышенное внимание к куру-ваарским интрузиям также связано с тем, что они располагаются в амфиболитосерогнейсовой матрице, содержащей реликты эклогитов, и их возраст оценивается как пост-эклогитовый [8, 9]. Эклогиты являются важным индикатором тектонического режима и крайне редки в раннем докембрии, поэтому новая информация о породах, пространственно тесно связанных с беломорскими эклогитами, представляет интерес.

Общая геологическая характеристика

Участок Куру-Ваара находится в северной части Беломорской провинции (рис. 1, *a*), которая заметно отличается от других ее частей и выделяется как Ёнский сектор провинции [1]. Главные отличия Ёнского сектора состоят в изобилии в Ёнско-Риколатвинской зоне его северо-восточной части пластов амфиболитов при очень незначительном количестве (кианит)-гранат-биотитовых и небольшом количестве палеопротерозойских друзитов [1, 13] (рис. 1, *б*). Эти особенности Ёнско-Риколатвинской зоны вместе с наличием в амфиболитах гипербазитов привели к ее выделению в качестве архейского Ёнского зеленокаменного пояса [11, 14]. Считается, что для Ёнского сектора, как и для всего Беломорья, характерны тектонические покровы, при этом весь Ёнский пояс интерпретируется как покров палеопротерозойского возраста, надвинутый на архейские покровы [1]. Очень важным отличием Ёнского пояса является обилие реликтов пород эцлогитовой фации метаморфизма в пластах архейских амфиболитов [8, 9, 15–18] (рис. 1, *б*). Находки в гранате и клинопироксене в этих породах микровключений алмаза, в т. ч. и в реликтах эцлогитов на участке Куру-Ваара, свидетельствуют об уникальных для раннего докембрия ультравысокобарических условиях эцлогитового метаморфизма [19, 20]. Возраст эцлогитового метаморфизма, реликты минеральных парагенезисов которого сохранились в пластах амфиболитов, дискуссионен. Одни исследователи приводят данные в пользу архейского возраста этого метаморфизма [9, 15, 16, 21, 22], а другие — палеопротерозойского [23–27].

Структурное положение

Габбро-амфиболиты слагают пластообразные тела с хорошо сохранившейся габбровой текстурой [8]. Наши исследования выявили 26 тел этих пород, в 2 из которых были найдены реликты исходных пород с магматическими минералами. Все они расположены к северу от Центральной сдвиговой зоны, разделяющей две архейские тектонические пластины [15], каждая из которых содержит реликты эцлогитов, принадлежащих присущему только ей типу [8, 9]. Крупные тела имеют ярко выраженную пластообразную форму, тогда как мелкие тела уплощены или их форма близка к изометричной (рис. 2, *a*). Как сильно, так и слабо уплощенные тела габбро-амфиболитов залегают согласно мигматитовой полосчатости и сланцеватости в амфиболито-серогнейсовой матрице, при этом только краевые части этих тел сильно рассланцованы параллельно их контактам и слабо проявленной сланцеватости по амфиболу в центральных частях. В одном случае наблюдался секущий контакт габбро-амфиболитов с сильно рассланцованными серыми гнейсами (рис. 2, *б, в*). Очень редко на контактах габбро-амфиболиты слабо мигматизированы. Архейские пластовые тела амфиболитов и вмещающие их серые гнейсы, а также их деформационные плоскостные текстуры секутся оливиновыми габброноритами с возрастом 2,44 млрд лет [25], имеющими друзитовые структуры (рис. 2, *a*). Внутри самого крупного тела габбро-амфиболитов выделяются два тела средних пород, по химическому составу отвечающие санукитоидам; предполагается, что они генетически связаны с габбро-амфиболитами [8, 9].

Петрография

Габбро-амфиболиты имеют черный цвет, обычно массивны и только вдоль их контактов полностью преобразованы в сланцеватые амфиболиты. Последние изредка наблюдаются в мелких сдвиговых зонах и в центральных частях габбро-амфиболитовых тел. Реликты исходных габбро имеют отчетливый красный оттенок, вызванный большим содержанием кайма и отдельных скоплений граната, практически полностью уничтоженных при преобразовании этих пород в габбро-амфиболиты. Реликтовые магматические минералы представлены орто- и клинопироксеном, а также плагиоклазом (рис. 3, *a-e*), химический состав которых приведен в табл. 1.

Таблица 1
Химический состав минералов из реликтов метагаббро в габбро-амфиболите карьера Куру-Ваара (шифт Р-14-7-8-1)

Минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO* ²	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	NiO	Сумма	Минералы граната		
													Alm+Sps ⁴	Prp	Grs
Орх ¹ (1)	54,59	0	1,71	0,41	14,78	0,21	27,70	0,72	0	0	0,06	100,18	-	-	-
Орх (2)	54,89	0	1,48	0,32	14,68	0,19	27,75	0,26	0	0	0,07	99,64	-	-	-
Срх (1)	55,44	0	1,53	0,53	12,56	0,13	28,23	1,69	0,12	0	0,09	100,32	-	-	-
Срх (2)	55,48	0	1,55	0,34	13,27	0,17	28,80	1,36	0	0	0,09	101,06	-	-	-
Pl (1)	54,04	0	28,05	0	0,09	0	0	11,03	4,90	0,02	-	98,13	-	-	-
Pl (2)	54,27	0	28,44	-	0,03	-	-	11,07	4,88	-	-	98,69	-	-	-
Grt-1 (1) край	39,97	0	22,35	0	20,48	0,59	10,76	5,87	0	0	-	100,02	44	40	16
Grt-2 (1) центр	40,10	0	22,37	0	18,40	0,48	9,11	9,60	0	-	-	100,06	40	34	26
Grt-3 (1) край	39,91	0	22,63	0,03	19,75	0,53	11,11	5,61	0	-	-	99,57	43	42	15
Grt-4 (2) край	39,39	0	21,93	0	22,03	0,81	8,37	7,74	0	-	-	100,27	47	32	21
Grt-5 (2) центр	39,52	0,06	22,03	0	20,84	0,70	8,77	8,22	0	-	-	100,14	45	33	22
Grt-6 (2) край	39,34	0	21,66	0	22,68	0,80	8,97	5,91	0	-	-	99,36	49	34	16
Am (1) центр	47,84	1,39	10,63	0,59	6,20	0,07	16,51	12,27	0,84	0,66	0,06	97,09³	-	-	-
Am (1) край	48,28	0,83	10,46	0,09	6,03	0,06	17,02	12,54	0,95	0,84	0,10	97,20	-	-	-
Bt (1)	38,41	2,09	16,65	0	8,18	0	19,71	0,06	0,43	8,94	0,19	94,94	-	-	-
Rt (1)	0,18	98,96	0,11	0,38	0,07	0	0	0,04	-	-	-	100,03	-	-	-

Окончание таблицы 1

Минерал ¹	Формульные единицы (ф. е.)											Минералы граната ⁴			
	Si	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Ti	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	Alm+Sps	Prt	Grs
Орх (1)	1,97	0,03	0,03	—	0,01	—	0,44	0,01	1,49	0,01	—	—	—	—	—
Орх (2)	1,93	0,03	0,03	—	0,01	—	0,37	—	1,49	—	—	—	—	—	—
Срх (1)	1,96	0,04	0,02	—	0,01	—	0,39	0,01	1,52	0,05	—	—	—	—	—
Срх (2)	2,48	0,52	1,00	—	—	—	—	—	—	0,54	—	—	—	—	—
Pl (1)	2,47	0,53	1,00	—	—	—	—	—	—	0,54	—	—	—	—	—
Pl (2)	3,01	—	1,98	—	—	0,02	1,27	0,04	1,21	0,47	—	44	40	16	—
Grt-1 (1) край	3,02	—	1,98	—	—	0,02	1,14	0,03	1,02	0,77	—	40	34	26	—
Grt-2 (1) центр	3,00	—	2,01	—	—	0,01	1,23	0,03	1,25	0,45	—	43	42	15	—
Grt-3 (1) край	3,00	—	1,97	—	—	0,03	1,37	0,05	0,95	0,63	—	47	32	21	—
Grt-4 (2) край	3,00	—	1,97	—	—	0,03	1,29	0,05	0,99	0,67	—	45	33	22	—
Grt-5 (2) центр	3,02	—	1,96	—	—	0,04	1,42	0,05	1,03	0,49	—	49	34	16	—
Grt-6 (2) край	6,81	1,04	0,74	0,15	0,07	0,03	0,71	0,01	3,50	1,87	0,16	—	—	—	—
Am (1) центр	6,86	1,05	0,70	0,09	0,01	0,05	0,72	0,01	3,60	1,91	0,26	—	—	—	—
Am (1) край	2,74	1,26	0,14	0,11	—	—	0,89	—	2,10	0,01	0,06	—	—	—	—
Bt (1)	—	—	—	0,99	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Rt (1)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечания. 1. Аббревиатуры минералов: Rt — рутил, остальные те же, что и на рис. 3 (цифры в скобках — номера зерен). 2. FeO* — здесь и далее в таблицах и тексте суммарное железо. 3. В сумме, написанной жирным курсивом, учтено содержание: V₂O₃ — в Alm (0,03 %), BaO — в Bt-1 (0,28 %), Nb₂O₅ и SrO — в Rt (0,17 и 0,12 % соответственно). 4. Alm — альмандин, Sps — спессартин, Prt — пиррот, Grs — гроссуляр. 5. Препараты были изучены под сканирующим электронным микроскопом LEO-1450, затем на изображениях в обратно-отраженных электронах были выбраны участки для электронно-зондового анализа минералов. Анализы были выполнены на микроанализаторе MS-46 САМЕСА при ускоряющем напряжении 22 кВ и токе зонда 30–40 нА в лаборатории физических методов исследования пород, руд и минералов ГИ КНЦ РАН.

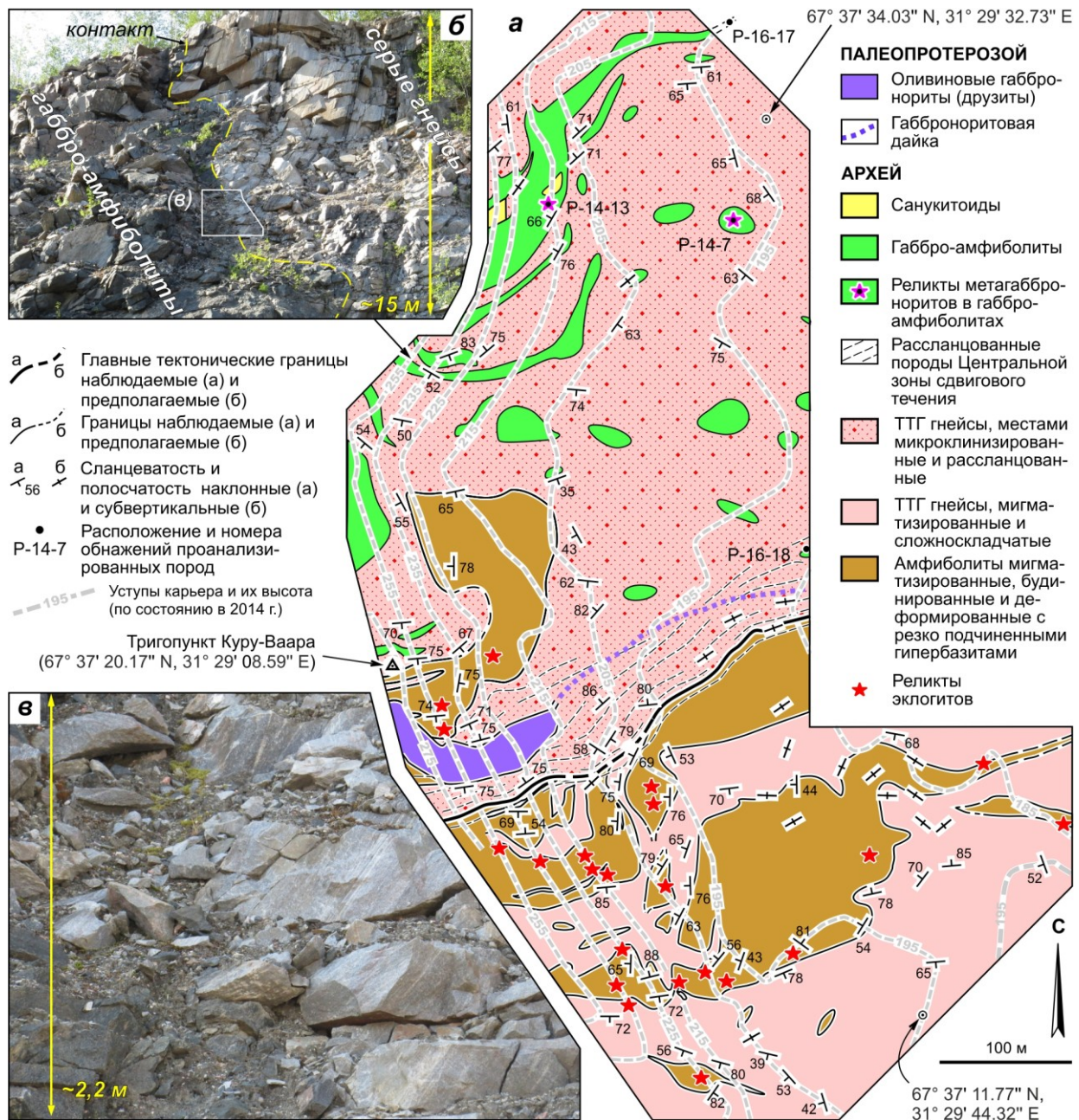


Рис. 2. Геологическая карта карьера Куру-Ваара (а) (пегматиты не показаны; по работе [15], с упрощениями) и несогласные взаимоотношения габбро-амфиболитов с сильно рассланцованными серыми гнейсами (б, в)

Исходные габбро

Ортопироксен образует слабо удлиненные идиоморфные зерна размером до 1 мм (рис. 3, а, б), для которых характерны обилие различных минеральных микровключений, вызывающих его замутненность (рис. 3, а), и нескольких систем цепочек включений амфибола, замещающего ортопироксен по определенным кристаллографическим плоскостям (рис. 3, б). Кроме этого, очень характерны амфиболовые каймы. Согласно номенклатуре пироксенов [28], по химическому составу он отвечает энстатиту и отличается присутствием NiO (0,06–0,07 %), что обычно для ортопироксенов из магматических пород и не отмечается в метаморфических [29].

Клинопироксен представлен клиноэнстатитом с содержанием жадеитового минала всего 0,85 % (номенклатура по работе [28]), слагающим короткопризматические идиоморфные зерна длиной до 1,2 мм. В них наблюдаются ориентированные по определенным кристаллографическим направлениям цепочки вторичного амфибола, а также хорошо развитые амфиболовые каймы

(рис. 3, в, з). Зерна клиноэнстатита при значительном их замещении амфиболом сохраняют субидiomорфный облик, но приобретают мозаичное строение, в котором субзерна сохраняют единую для них ориентировку кристаллооптических элементов (рис. 3, д, субзерна имеют одинаковые зеленые цвета интерференции, тогда как зерна амфибола имеют разную ориентировку и не образуют симплектитов с клинопироксеном). Как и ортопироксен, клиноэнстатит содержит характерную для магматических пироксенов примесь NiO (0,09 %) [29].

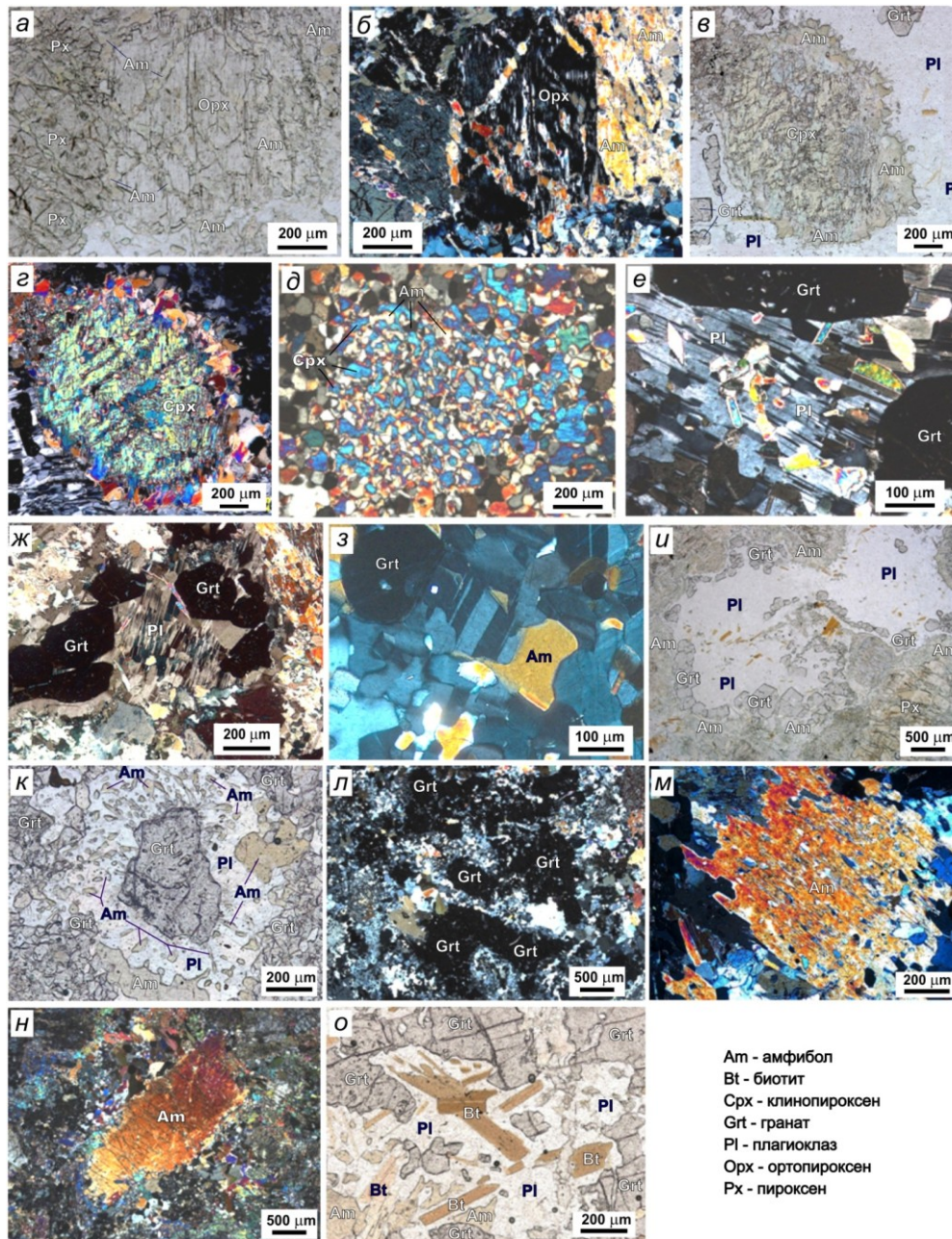


Рис. 3. Микрофото магматических (а-е) и метаморфических (ж-о) минералов в габбро, наблюдаемых в виде реликтов в габбро-амфиболитах (а-б — ортопироксен, в-д — клинопироксен, е-ж — плагиоклаз, и-л — гранат, м-н — амфибол, о — биотит; б, з-з, л-н — фото с анализатором; а, в, ж, и, к, о — без анализатора)

В отличие от пироксенов, магматический **плагиоклаз** сохранился только в виде отдельных слабо удлинённых зерен, которые обнаруживают меньшую степень идиоморфизма. Они состоят из субзерен с почти единым удлинением и погасением тонких полисинтетических двойников (рис. 3, е, ж). По химическому составу плагиоклаз отвечает лабрадору (An 54 %), который

типичен для габбро [29]. Его метаморфические преобразования выражены не только в распаде первичных зерен на субзерна, но и в появлении в них включений амфибола и биотита (рис. 3, *е*). Реликты плагиоклаза частично или почти целиком окружены цепочками кристаллов граната (рис. 3, *е, ж*). Многие кристаллы полностью преобразованы в агрегаты мелких и обычно несдвойникованных зерен метаморфического плагиоклаза. Эти агрегаты содержат вкрапления амфибола и биотита и в целом сохраняют контуры исходных кристаллов плагиоклаза (рис. 3, *з*).

Метаморфические минералы в исходных габбро, сохранивших их первичную габбровую структуру и массивную текстуру, представлены гранатом, амфиболом, биотитом и плагиоклазом (рис. 3, *е-о*). Они принадлежат к главным минералам, за исключением биотита, который является второстепенным. Их химический состав дан в табл. 1.

Гранат является доминирующим по его содержанию в породе (до 30 %). Он обычно слагает близкие к изометричным кристаллы, некоторые из которых имеют контуры почти правильных шестигранников (рис. 3, *ж, з*). Как правило, они образуют цепочки вокруг магматического плагиоклаза (рис. 3, *ж*) и агрегатов метаморфического плагиоклаза, причем в последнем случае цепочки зерен местами образуют сплошные каймы шириной от 0,1 до 0,5 мм (рис. 3, *и*). Отсюда следует, что метаморфический гранат развивался на границах между плагиоклазом и темноцветными минералами. В единичных случаях в центре агрегатов плагиоклазовых зерен, окруженных гранатовой каймой, располагаются зерна граната до 0,5 мм в поперечнике. Эти агрегаты насыщены мелкими червеобразными и удлинёнными зернами амфибола и представляют собой плагиоклаз-амфиболовые симплектиты, замещавшие гранат (рис. 3, *к*). Симплектиты такого состава развиваются по гранату альмандинового состава [30]. Нередко наблюдаются многочисленные крупные скопления граната, которые имеют неправильную форму и местами образуют каймы шириной до 1 мм (рис. 3, *л*).

По химическому составу гранат принадлежит к пиральспитам (Alm + Sps — от 40 до 49 %, Prp — от 32 до 42 %) и содержит от 15 до 26 % гроссулярового минала. Этот состав граната и отсутствие метаморфогенного клинопироксена позволяет исключить его связь с эклогитовым метаморфизмом. Гранат обнаруживает слабую зональность: центры его зерен, по сравнению с краями, незначительно обеднены пироповым миналом и слабо обогащены гроссуляровым и альмандин-спессартиновым миналами (табл. 1).

Амфибол также принадлежит к количественно преобладающим минералам: его содержание варьирует от 10 до 30 %. Он представлен несколькими морфологическими типами, которые, скорее всего, отвечают разным его генерациям. Прежде всего, это мелкие (первые сотые доли миллиметра) слабо окрашенные в зеленоватые тона зерна с желтыми и красными цветами интерференции, которые замещают пироксены по некоторым кристаллографическим направлениям. Такие же, но более крупные зерна (до 0,1 мм) слагают каймы вокруг пироксенов (рис. 3, *а-г*). По-видимому, к этому же типу принадлежат кристаллы размером до 0,05 мм с аналогичными характеристиками, которые наблюдаются внутри реликтов магматического плагиоклаза (рис. 3, *е, ж*). Множество сходных (в том числе и по размерам) кристаллов амфибола в крупных реликтах клинопироксена разделяют этот минерал на субзерна и определяют его мозаичное строение (рис. 3, *д*). В отдельный тип выделяются червеобразные и удлинённые выделения амфибола бледно-зеленого цвета в симплектитовых сростках с плагиоклазом, окаймляющих крупные зерна граната (рис. 3, *к*).

Основная масса амфибола представлена магнезиальной роговой обманкой (номенклатура по работе [31]), содержание которой резко преобладает над суммарным количеством описанных выше типов амфибола. Наблюдаются две разновидности этого амфибола: относительно мелкие зерна, достаточно равномерно рассеянные в основной ткани породы, и короткопризматические порфиробласты с изрезанными границами и длиной до 3 мм (рис. 3, *м, н*). Эти порфиробласты отличаются изрезанными границами и нередко большим содержанием минеральных включений (рис. 3, *м*). Они по краям местами неравномерно замещены сине-зеленой роговой обманкой.

Биотит обычно встречается внутри агрегатов плагиоклаза в виде чешуек длиной до 0,7 мм, и почти не соприкасается с зернами амфибола внутри этих агрегатов и зернами граната, окаймляющего агрегаты (рис. 3, *o*). Он относится к ряду аннит-флогопит (классификация по работе [32]) при преобладании Mg над Fe²⁺ (X_{Pbl} 0,70–0,72). В нем отмечается повышенное содержание Ti в октаэдрической позиции (0,11–0,14 ф. е.).

Акцессорные минералы — титанит, рутил и рудный минерал. Рутил отвечает его идеальной формуле TiO₂ и содержит примесь Cr₂O₃ (0,38 мас. %) и Nb₂O₅ (0,17 мас. %), а также примеси Al, Fe, V, и Sr (табл. 1). Отдельные зерна рутила частично замещены ильменитом.

Габбро-амфиболиты и амфиболиты

Габбро-амфиболиты связаны с массивными метагаббро постепенными переходами, при этом ширина зон перехода не превышает 30 см. В целом габбро-амфиболиты массивны и обнаруживают слабо выраженную сланцеватость по амфиболу. В краевых частях тел габбро-амфиболитов и в редких зонах рассланцевания внутри тел эти породы постепенно переходят в сланцеватые амфиболиты. Главные минералы в них представлены амфиболом, плагиоклазом и биотитом; их химический состав дан в табл. 2. Содержание амфибола составляет 60–70 %, плагиоклаза — 25–30 % и биотита — 5–10 %. Кварц является второстепенным минералом, а среди аксессуаров отмечены титанит, рутил, пентландит и халькопирит. В переходной зоне от метагаббро к габбро-амфиболитам наблюдаются реликты пироксенов и граната. По степени сохранности магматических минералов среди габбро-амфиболитов можно выделить разности с реликтами магматических минералов и без таковых, причем первые из них были встречены только в ореолах вокруг реликтов массивного исходного метагаббро. Амфиболиты, в свою очередь, подразделяются на биотито- и гранатосодержащие разности, в которых биотит и гранат могут быть как главными, так и второстепенными минералами при максимальном их содержании не более 10 %. Их отличительной чертой является сланцеватый облик, и по внешнему виду они не отличаются от аналогичных петрографических разностей архейских амфиболитов пластовых тел.

Таблица 2

Химический состав минералов из амфиболитов по габбро-амфиболитам
карьера Куру-Ваара (шл. P-14-7-1-1)

Оксид	Am		Bt	Pl		Элемент	Am		Bt	Pl	
	край	центр		край	центр		край	центр		край	центр
SiO ₂	44,77	43,98	36,45	60,07	58,91	Na ₂ O	1,21	1,23	0,52	7,41	7,93
TiO ₂	0,63	0,86	2,52	0	0	K ₂ O	0,24	0,46	8,94	0,06	0,06
Al ₂ O ₃	10,74	11,34	16,70	24,83	25,15	NiO	0,06	0,04	0,07	0	0
Cr ₂ O ₃	0,05	0,33	0,18	0	0	V ₂ O ₃	0,05	0,03	0	0	0
FeO*	10,90	11,30	12,04	0,06	0,04	CeO ₂	0	0	0,05	0	0
MnO	0,15	0,16	0,03	0	0	Cl	0,21	0,23	0,32	0	0
MgO	14,97	14,41	17,76	0	0	Сумма	96,07	96,24	95,58	99,26	98,96
CaO	12,09	11,87	0	6,83	6,87						
Элемент	Формульные единицы										
Si	6,60	6,51	2,69	2,69	2,66	Mg	3,29	3,29	1,95	–	–
Al ^{VI}	0,50	0,49	0,14	1,00	1,00	Ca	1,91	1,91	–	0,33	0,33
Al ^{IV}	1,37	1,39	1,31	0,31	0,34	Na	0,35	0,35	0,08	0,64	0,69
Ti	0,07	0,10	0,14	–	–	K	0,04	0,04	0,84	–	–
Cr	0,01	0,04	–	–	–	Ni	0,01	0,01	–	–	–
Fe ³⁺	0,16	0,16	–	–	–	V	0,01	0,01	–	–	–
Fe ²⁺	1,18	1,18	0,74	–	–	Cl	0,04	0,04	0,32	–	–
Mn	0,02	0,02	–	–	–						

Примечания те же, что и в табл. 1.

Геохимия

Содержания главных, рассеянных и редкоземельных элементов в габбро-амфиболитах приведены в табл. 3 и 4, в которых для сравнительного анализа также приводятся концентрации этих элементов в других архейских интрузиях Беломорья. Согласно диаграмме TAS, эти габбро-амфиболиты являются породами основного состава нормального ряда щелочности (рис. 4, а). На диаграмме А-Ф-М данные породы, включая образец реликтового метагаббро, образуют компактный кластер в магнезиальной части поля пород толеитовой серии, только один образец попадает в поле известково-щелочной серии (рис. 4, б). Этот образец отличается низким содержанием MgO — 5,47 мас. %, тогда как во всех остальных образцах оно варьирует от 11,72 до 15,78 мас. % и снижается с увеличением количества SiO₂ (рис. 4, в). Концентрация Al₂O₃ незначительно возрастает с увеличением SiO₂ (рис. 4, з) и уменьшается с возрастанием количества MgO (рис. 4, д). Количество же MgO снижается при увеличении суммы щелочей (рис. 4, е). Содержания FeO* и TiO₂ во всех образцах составляют 7,85–9,24 и 0,41–0,86 мас. % соответственно и не зависят от количества SiO₂ (рис. 4, ж, з). Концентрация CaO также не зависит от количества SiO₂ и лежит в интервале 8,02–10,20 мас. %.

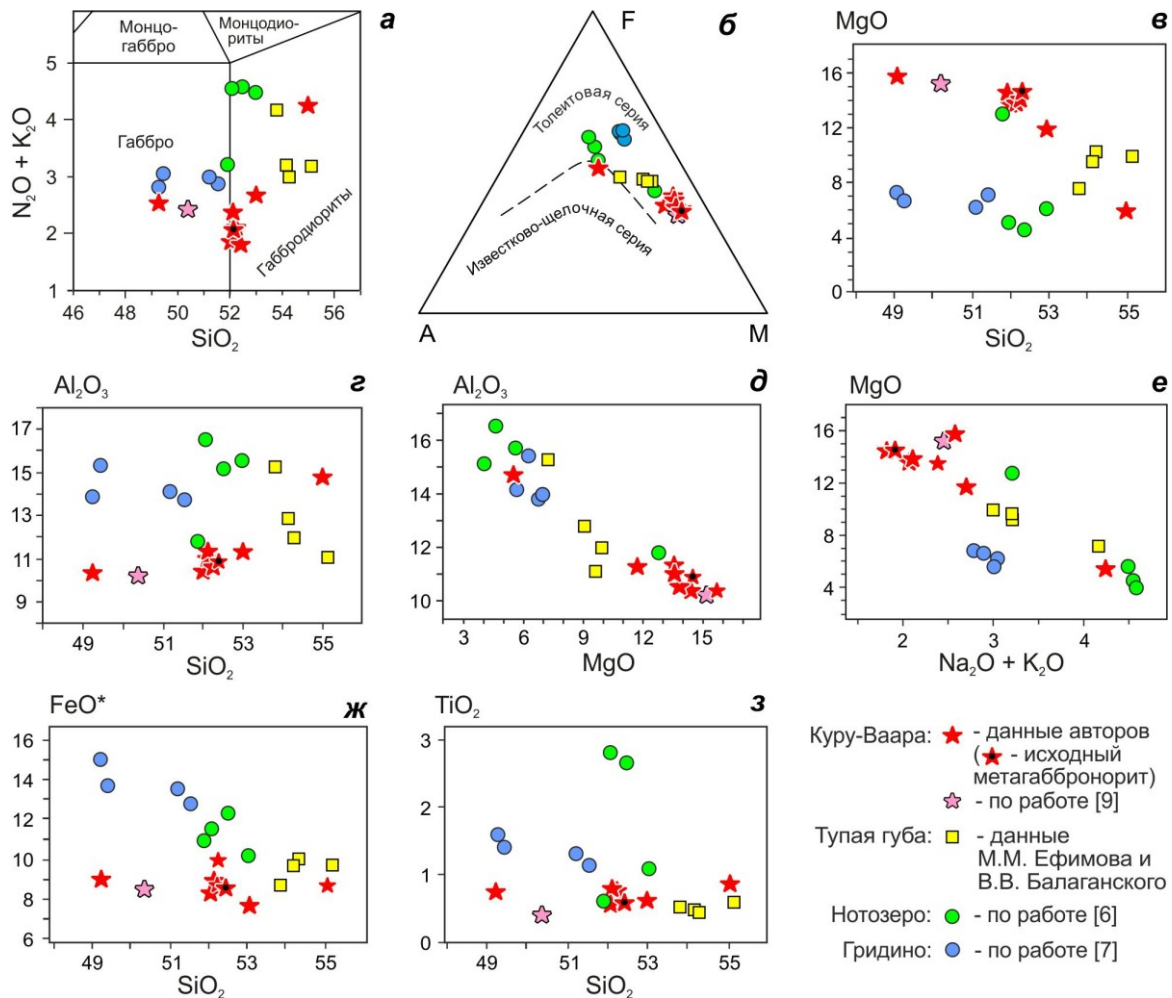


Рис. 4. Петрохимические дискриминационные (а–б) и вариационные (в–з) диаграммы для архейских интрузивных пород Беломорья (мас. %): а — TAS (по работе [33]); б — А-Ф-М (по работе)

Таблица 3

Содержание главных элементов (мас. %) в архейских плутонических основных породах Беломорской провинции

Номер образца	анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁻	H ₂ O	п.п.л.	Сумма
		P-14-7-1	1	52,13	0,81	11,00	0,14	8,84	—	0,21	13,59	8,15	1,77	0,61	0,04	0,41	—
P-14-7-3	2	52,25	0,77	10,54	0,33	9,74	—	0,19	13,83	8,31	1,48	0,63	0,05	0,24	—	1,02	99,38
P-14-7-7	3	52,05	0,57	10,44	0,86	7,65	—	0,20	14,49	8,93	1,54	0,32	0,04	0,16	—	2,34	99,59
P-14-7-10	4	52,43	0,60	10,86	0,86	7,92	—	0,18	14,54	8,79	1,40	0,41	0,02	0,28	—	1,00	99,20
P-14-13-1	5	53,02	0,61	11,30	1,64	6,37	—	0,17	11,72	9,43	2,18	0,50	0,01	0,23	—	2,34	99,59
P-14-13-7	6	52,15	0,56	11,34	1,55	7,57	—	0,21	13,56	9,42	1,64	0,43	0,02	0,16	—	0,92	99,53
P-16-17-2	7	49,28	0,75	10,37	1,53	7,86	—	0,18	15,78	8,08	1,58	0,96	0,07	0,17	—	2,64	99,25
P-16-18-1	8	55,01	0,86	14,76	2,15	6,82	—	0,13	5,47	8,02	3,40	0,86	0,15	0,12	—	1,48	99,23
KV-711/1	9	50,40	0,41	10,20	—	—	8,63	0,18	15,20	10,20	1,58	0,85	0,04	—	—	1,00	98,69
T-252	10	54,18	0,48	12,77	1,46	8,59	—	0,22	9,17	7,46	2,54	0,66	0,10	0,28	—	1,63	99,54
T-264	11	55,14	0,59	11,06	2,46	7,68	—	0,15	9,67	7,85	2,47	0,71	0,10	0,35	—	1,52	99,75
T-266	12	54,29	0,44	11,94	2,41	7,83	—	0,17	9,92	8,13	2,31	0,68	0,09	0,22	—	1,54	99,97
T-277	13	53,81	0,53	15,27	1,19	7,74	—	0,15	7,23	8,22	3,33	0,84	0,09	0,17	—	0,87	99,44
3B	14	52,09	2,79	16,49	—	11,60	—	0,16	4,61	7,67	3,66	0,89	0,14	—	—	—	100,10
2	15	52,49	2,64	15,13	—	—	12,47	0,11	4,01	7,13	3,71	0,87	—	—	—	—	98,56
3	16	53,00	1,09	15,71	—	—	10,23	0,18	5,62	8,03	3,80	0,68	—	—	—	—	98,34
4	17	51,92	0,61	11,79	—	—	11,02	0,17	12,77	6,85	2,43	0,78	—	—	—	—	98,34
SUP-3-12	18	51,22	1,27	14,12	3,42	10,48	—	0,22	5,63	8,94	2,42	0,57	0,16	—	0,05	1,02	99,52
SUP-6-1	19	51,56	1,14	13,84	1,22	11,73	—	0,23	6,68	9,43	2,37	0,50	0,03	—	0,04	1,10	99,87
Gr-70/04-1	20	49,28	1,59	13,91	2,50	12,78	—	0,24	6,85	8,15	2,25	0,56	0,21	—	0,15	1,13	99,60
Gr-69/04-5	21	49,46	1,41	15,32	4,10	10,05	—	0,24	6,24	8,44	2,63	0,42	0,22	—	0,19	1,09	99,81

Примечания. Районы отбора образцов: 1–9 — карьер Куру-Ваара; 1, 2, 4–6 — габбро-амфиболит, 3 — реликтовый метагаббронорит в габбро-амфиболите (1–8 — авторские данные), 9 — габбро-амфиболит (данные из работы [9]); 10–13 — район губы Тулой; 10 — гранатовый амфиболит по габбро, 11–13 — метагаббро (данные М. М. Ефимова и В. В. Балаганского); 14–17 — район оз. Нотозеро; 14 — метагаббро, 15, 16 — кварцевое габбро, 17 — высокомагнезитовое габбро (15–17 — средние значения для 3, 8 и 4 анализов соответственно, данные из работы [6]); 18–21 — район с. Гридино, габброиды и амфиболиты по ним (данные из работы [7]).

Анализы 1–8 и 10–13 выполнены в химико-аналитической лаборатории ГИ КНЦ РАН соответственно в 2014–2016 и 1983 гг. атомно-абсорбционным (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, CaO, MnO), эмиссионным (K₂O, Na₂O), колориметрическим (TiO₂, P₂O₅), объемным (CO₂, FeO) и весовым (H₂O, п.п.л.) методами по одной навеске породы после разложения путем ее сплавления с бурой и содой. Аналитическая погрешность для Fe₂O₃ при содержании в породе 0,10–1,00 мас. % составляла ~17 %, при содержании 1,00–10,0 мас. % — 7 %, аналитическая погрешность для FeO равнялась ~6,5 %, у всех остальных элементов: для концентрации 1–10 % — 3,5 %, для концентрации >10 % — 1,5 %.

Содержание рассеянных и редкоземельных элементов (ppm)
в архейских плутонических основных породах Беломорской провинции

Элемент	P-14-7-7	P-14-7-10	KV-711/1	Зв	2	3	4	SUP-3-12	SUP-6-1	Gr-70/04-1	Gr-69/04-5
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Cr	–	–	1570	134	109	211	983	111	111	293	198
Ni	–	–	391	49	31	72	282	161	182	198	139
Co	–	–	–	43	45	43	58	62	64	56	41
Sc	29	25,3	30,2	–	–	–	–	45	43	39	33
V	–	–	161	304	340	189	164	419	436	347	279
Cu	–	–	–	–	–	–	–	128	143	167	37
Pb	7,08	4,71	–	15	10	10	12	5	16	6	4
Zn	–	–	–	–	–	–	–	115	109	107	272
Mo	–	–	–	–	–	–	–	2,89	3,52	3,67	1,02
As	–	–	–	–	–	–	–	0,6	0,97	0,85	0,88
Ag	–	–	–	–	–	–	–	0,3	1,2	0,5	0,4
Rb	8,82	11,1	21	14	8	10	31	18	14	14	10
Cs	4,26	0,54	–	–	–	–	–	0,49	0,21	0,32	0,23
Ba	100	134	223	141	<147	<171	262	238	203	196	154
Sr	125	125	143	388	396	361	217	203	184	169	172
Ga	12,7	13,2	–	–	–	–	–	23	21	19	17
Ta	0,19	0,31	0,14	–	–	–	–	0,41	0,34	0,56	0,33
Nb	0,31	0,56	2,27	7	10	7	6	6,5	5,5	8,3	5,8
Hf	1,07	0,93	1,00	–	–	–	–	2,46	2,11	2,93	1,93
Zr	28,7	24,4	34,2	97	106	76	74	82	72	112	76
Y	8,84	9,12	9,00	16	23	17	14	35	29	35	28
Th	1,74	1,57	1,05	5	–	–	–	3,15	2,67	2,12	2
U	0,33	0,35	0,29	–	–	–	–	0,20	0,78	–	–
La	6,74	6,33	3,79	–	–	–	–	13,38	11,15	13,99	10,46
Ce	14,3	14,2	8,38	–	–	–	–	30,81	26,57	32,4	27,37
Pr	1,77	1,74	1,13	–	–	–	–	4,04	3,31	4,21	3,72
Nd	7,79	7,24	4,91	–	–	–	–	17,68	14,62	18,35	16,38
Sm	1,79	1,75	1,23	–	–	–	–	4,64	3,91	4,27	3,61
Eu	0,55	0,56	0,42	–	–	–	–	1,49	1,27	1,23	1,03
Gd	2,04	2,00	1,45	–	–	–	–	5,17	4,37	4,77	3,91
Tb	0,35	0,34	0,22	–	–	–	–	0,90	0,75	0,80	0,68
Dy	2,13	2,09	1,53	–	–	–	–	5,66	4,85	5,35	4,30
Ho	0,46	0,46	0,33	–	–	–	–	1,27	1,05	1,11	0,9
Er	1,36	1,38	0,92	–	–	–	–	3,34	2,78	3,19	2,63
Tm	0,20	0,20	0,13	–	–	–	–	0,48	0,39	0,47	0,39
Yb	1,29	1,30	0,86	–	–	–	–	3,09	2,60	3,08	2,46
Lu	1,19	0,20	0,14	–	–	–	–	0,46	0,40	0,49	0,39

Примечания. 1–3 — карьер Куру-Ваара: 1 — габбро-амфиболит, 2 — реликтовый метагаббронорит в габбро-амфиболите (авторские данные, анализ выполнен методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе ELAN 9000 DRC-е в ИХТРЭМС КНЦ РАН), 3 — габбро-амфиболит (данные из работы [9]); 4–7 — район оз. Нотозеро: 4 — метагаббро, 5, 6 — кварцевое габбро, 7 — высокомагнезиальное габбро (5–7 — средние значения для 6, 13 и 7 анализов соответственно (данные из работы [6])); 8–11 — район с. Гридино, габброиды и амфиболиты по ним (данные из работы [7]).

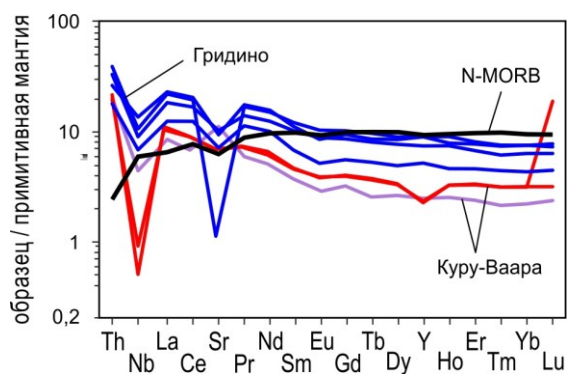


Рис. 5. Распределение редких земель и некоторых рассеянных элементов в архейских плутонических породах Беломорья и базальтах срединно-океанических хребтов (N-MORB; базальты и нормирование по работе [39])

Распределения редкоземельных и некоторых рассеянных элементов в метагаббро и габбро-амфиболите в целом одинаковы (рис. 5), за исключением Lu (0,20 и 1,19 мас. % соответственно, табл. 4). Учитывая, что содержания Lu во всех других анализах архейских плутонических пород Беломорья, включая габбро-амфиболит Куру-Ваары из работы [9], лежат в интервале 0,14–0,49 мас. %, мы склонны считать количество 1,19 мас. % завышенным в результате аналитической ошибки. График распределения в целом слабонаклонный и ровный при отношении La_N/Yb_N , равном 5,2 в габбро-амфиболите и 4,9 в метагаббро. Он нарушен только сильной отрицательной ниобиевой аномалией и слабой отрицательной иттриевой. В габбро-амфиболите (из работы [9]) при таком же характере распределения ($La_N/Yb_N = 4,41$)

наблюдается слабая отрицательная ниобиевая и слабая положительная стронциевая аномалии, а иттриевая аномалия отсутствует. Габбро-амфиболиты обогащены редкими землями относительно примитивной мантии примерно в 10 раз по La и в три раза по Lu (рис. 5).

Обсуждение

Петрографическая классификация. Реликты магматического парагенезиса клиноэнстатит + энстатит + лабрадор в породах, исходных для габбро-амфиболитов, позволяют определить их, согласно работе [35], как габбронориты. Магматический генезис пироксенов подтверждается тем, что они содержат примесь NiO (до 0,09 мас. %), характерную для магматических разностей и отсутствующую в метаморфических [29, 30]. Кристаллы этих пироксенов, и особенно ортопироксена, отличаются большой степенью идиоморфизма и большим содержанием в их отдельных внутренних частях мельчайших включений, которые делают эти части замутненными. По нашим многолетним наблюдениям, эти черты принципиально отличают магматические пироксены от метаморфических: последние образуют незамутненные прозрачные зерна при отсутствии или слабом их идиоморфизме.

Возраст. Уплотненные тела габбро-амфиболитов и наблюдаемая в них слабо развитая сланцеватость залегают согласно с плоскостными текстурами серых гнейсах и конформных им пластовых телах амфиболитов. Эти рассланцованные гнейсы и амфиболиты прорваны оливиновыми габброноритами (рис. 2, а) с возрастом 2,44 млрд лет [25], что определяет возраст их рассланцевания как архейский. В архейской истории амфиболито-серогнейсовой матрицы выделяется два периода деформации, сопряженной с метаморфизмом, причем второй из них характеризуется сильным рассланцеванием и милонитизацией [15]. Нами было установлено текущее положение габбро-амфиболитов относительно именно сильно рассланцованных и милонитизированных серых гнейсов (рис. 2б, в), поэтому внедрение габбро-амфиболитов отнесено к заключительным этапам второго архейского периода деформации и метаморфизма.

Таким образом, габбро-амфиболиты должны быть моложе вмещающих их серых гнейсов с возрастом 2,80 млрд лет [9]. В последних установлено термальное событие с возрастом 2,69 млрд лет [9], который в пределах аналитических погрешностей идентичен возрасту метаморфизма габбро Нотозера [6]. Определения времени внедрения архейских габброидов Тупой губы, Нотозера и Гридино укладываются в интервал 2,69–2,73 млрд лет [6, 7, 12], который

отвечает завершающей стадии архейского развития парагнейсов и серых гнейсов Беломорья, образовавшихся и испытавших первый метаморфизм 2,76–2,88 млрд лет назад [1, 12, 16, 36–38]. Поэтому мы предполагаем, что габбро-амфиболиты внедрились в то же время, что и остальные архейские базитовые интрузии Беломорья, то есть 2,69–2,73 млрд лет назад.

Метаморфизм. Одни из первых метаморфических преобразований габброноритов выразились в развитии гранатовых кайм вокруг пироксенов на их границах с плагиоклазом первичного магматического минерального парагенезиса. Второй этап метаморфизма привел к преобразованию архейских коронитовых метагабброноритов в габбро-амфиболиты при полном замещении коронитового граната амфиболом и биотитом, но при сохранении в целом габбровой структуры породы. Последнее указывает на протекание этого метаморфизма в условиях, близких к статическим. Учитывая согласованность уплощенных габбро-амфиболитовых тел с архейской структурой амфиболитосерогнейсовой матрицы, первый и второй этапы метаморфизма следует отнести к архею. Самые поздние преобразования, сопряженные с деформацией, были связаны с развитием рассланцевания вдоль контактов тел габбро-амфиболитов и в редких зонах внутри тел. Эта деформационно-метаморфическая переработка привела к последующему преобразованию габбро-амфиболитов в обычные по внешнему виду амфиболиты без каких-либо следов габбровой структуры. Важно подчеркнуть, что в хорошо рассланцованных разностях амфиболитов отсутствует гранат. Мы предполагаем, что этот третий этап метаморфизма следует связывать с палеопротерозойскими событиями (скорее всего, самыми поздними).

Химический состав. Наши данные по рассматриваемым породам Куру-Ваары и их сравнение с архейскими плутоническими базитами Беломорья подтверждают вывод о том, что они являются магнезиальными разностями базитов [8, 9]. По содержанию кремнезема и щелочей они определяются как основные породы нормального ряда щелочности. На диаграмме TAS (рис. 4, а) почти все они, а также габброиды Нотозера лежат в переходной зоне между габбро и габброидоритами. При этом к габброидоритам относятся все габброиды Тупой губы, которые по содержанию главных элементов наиболее близки габбро-амфиболитам Куру-Ваары (рис. 4, а–з). Архейские базиты каждого участка в целом группируются в отдельные кластеры.

Все архейские базиты Беломорья принадлежат толеитовой серии, и на диаграмме А-Ф-М габбро-амфиболиты являются крайними, наиболее магнезиальными разностями (рис. 4, б). Количество MgO в 8 из 9 образцов габбро-амфиболитов лежат в интервале 11,72–15,78 мас. % (табл. 3) при среднем 14,09 мас. % ($n = 8$). Габброиды же Тупой губы содержат 7,23–9,92 мас. % ($n = 4$, среднее 9,00 мас. %), Гридино — 5,63–6,85 мас. % ($n = 4$, среднее 6,35 мас. %) и Нотозера — 4,01–5,62 мас. % (интервал средних значений). Единственным исключением является кумулятивное габбро Нотозера с концентрацией MgO, равной 12,77 мас. % (табл. 3).

Габбро-амфиболиты отличает низкое содержание в них Al_2O_3 — в среднем 11,20 мас. % ($n = 9$) при колебаниях от 10,20 до 14,76 мас. % — в других архейских базитах оно варьирует от 11,06 до 16,49 мас. % (рис. 4, в). Количество суммарного железа также более низкое — в среднем 8,94 мас. % при вариациях 8,01–10,07 мас. %, тогда как в других породах оно меняется от 8,81 до 15,03 мас. %. Концентрации Al_2O_3 , FeO^* и TiO_2 в габбро-амфиболитах практически не меняются при увеличении SiO_2 . Общим для всех рассматриваемых пород является уменьшение количества алюминия с возрастанием магния (рис. 4, г). В то же время для них отмечается уменьшение количества магния с увеличением суммы щелочей, при этом габброиды Гридино лежат в стороне от тренда, образованного породами Куру-Ваары, Тупой губы и Нотозера (рис. 4, з).

По распределению редких земель и рассеянных элементов габбро-амфиболиты принципиально отличаются от базальтов срединно-океанических хребтов (согласно работе [39], последние имеют $La_N/Yb_N = 0,67$ при 4,4–5,2 в габбро-амфиболитах). По сравнению с этими

базальтами они обогащены Th и очень незначительно La, на порядок обеднены Nb и в меньшей степени редкими землями, начиная с Nd (рис. 5). Схожее распределение имеют и архейские габброиды Гридино [7], отличающиеся более слабыми отрицательными аномалиями по Nb и Sr при большей степени обогащения всеми другими элементами (рис. 5), а также меньшей степенью дифференциации редких земель ($La_N/Yb_N = 2,9-3,1$). Данные по другим интрузиям отсутствуют.

Тектоническая обстановка

Для раннедокембрийских структур при отсутствии надежных геологических реперов данные по редким землям и рассеянным элементам изверженных пород часто являются единственными индикаторами возможных тектонических условий их образования. Для архейских габбро-амфиболитов важным указанием на условия образования материнского расплава является их связь с санукитоидами, слагающими два тела внутри самой крупной габбро-амфиболитовой интрузии (рис. 2, а) и, согласно работе [8], внедрившимися одновременно с габбро-амфиболитами. Относительно слабое расщепление и почти полное отсутствие мигматизации этих пород согласуется с их внедрением на одном и том же заключительном этапе архейской истории региона. Формирование санукитоидов обычно связывается с субдукцией [40], что позволяет предполагать эту тектоническую обстановку и для габбро-амфиболитов. Формирование санукитоидов на Балтийском щите относится к интервалу $\sim 2,72-2,74$ млрд лет [2], которому отвечают наиболее ранние проявления плутонического базитового магматизма Беломорья и, скорее всего, внедрение габбро-амфиболитов Куру-Ваары.

С этим предположением согласуются данные по редким землям и рассеянным элементам в габбро-амфиболитах и других архейских плутонических базитах Беломорья. Изученные нами габбро-амфиболиты на диаграмме Nb/Y–Zr/Y попадают в область неплюмовых источников, а внутри нее в поле нормальных базальтов срединно-океанических хребтов (рис. 6, а). Точка габбро-амфиболита из работы [9] располагается на этой же диаграмме на границе между областями плюмовых и неплюмовых источников в сочленении полей нормальных базальтов срединно-океанических хребтов, платобазальтов и базальтов островных и магматических дуг. При этом она находится на середине тренда, образованного базитами Гридино и Нотозера, причем основная часть тренда проходит по полю платобазальтов, а меньшая — по полю дуговых базальтов (рис. 6, а). Однако данные по редким землям и некоторым рассеянным элементам для этих пород (табл. 4, рис. 5) противоречат их происхождению из расплава, кристаллизация которого дает базальты срединно-океанических хребтов.

На диаграмме Ti-Zr габбро-амфиболиты Куру-Ваары лежат в поле низкокальциевых базальтов, а базиты Гридино и Нотозера — в поле известково-щелочных (рис. 6, б). Все эти базиты образуют три группы, лежащие на одной линии, и, согласно работе [36], для них наиболее вероятно происхождение в обстановках, связанных с магматическими и островными дугами. На дискриминационной диаграмме Th-Hf-Ta из работы [37] они ложатся в поле дуговых известково-щелочных базальтов (рис. 6, в). Если указанные выше диаграммы построены по данным для современных тектонических обстановок, то три из используемых ниже диаграмм (рис. 6, г–е) базируются на данных для палео- и мезопротерозоя и более подходят для анализа неархейских базитов. На диаграммах отношений U/Nb, Th/Nb и Nb/Yb против La/Nb неархейские базиты Куру-Ваары и Гридино образуют тренды, совпадающие с трендом и наращивающие его для палеопротерозойских базитов, происхождение которых связывается с субдукцией (рис. 6, г–е). Мезопротерозойские базиты рифтогенной же природы образуют на этих диаграммах отдельные изолированные поля. Наконец, на диаграмме Th/La-Sm/La базиты Куру-Ваары и Гридино образуют группу, лежащую в полях базитов острова Ява и Алеутских островов, связанных с субдукцией (рис. 6, ж). При этом куру-ваарские базиты располагаются далеко в стороне от базитов, которые являются производными плавления мантии при отсутствии

связи плавления с субдукцией. Интересно, что габбро-амфиболиты Куру-Ваары образуют на этой диаграмме компактную группу рядом с точкой для осадков зон субдукции.

Наконец, наиболее подходящей является диаграмма Th/Yb-Nb/Yb (рис. 6, з), предназначенная для интерпретации именно архейских основных пород. На ней все базиты Куру-Ваары и Гридино располагаются выше тренда основных пород, являющихся результатом плавления мантии вне связи с зонами субдукции. Устанавливаемое на этой диаграмме обогащение базитов Th и обеднение Nb относительно океанических базальтов также фиксируется на диаграмме распределения редких земель и рассеянных элементов (рис. 5) и является, согласно работе [45], свидетельством контаминации мантийных расплавов материалом континентальной коры. В свою очередь, это прямо указывает на рециклинг континентальной коры — возвращение ее обратно в мантию и смешивание с мантийным веществом, единственным удовлетворительным механизмом которого является субдукция.

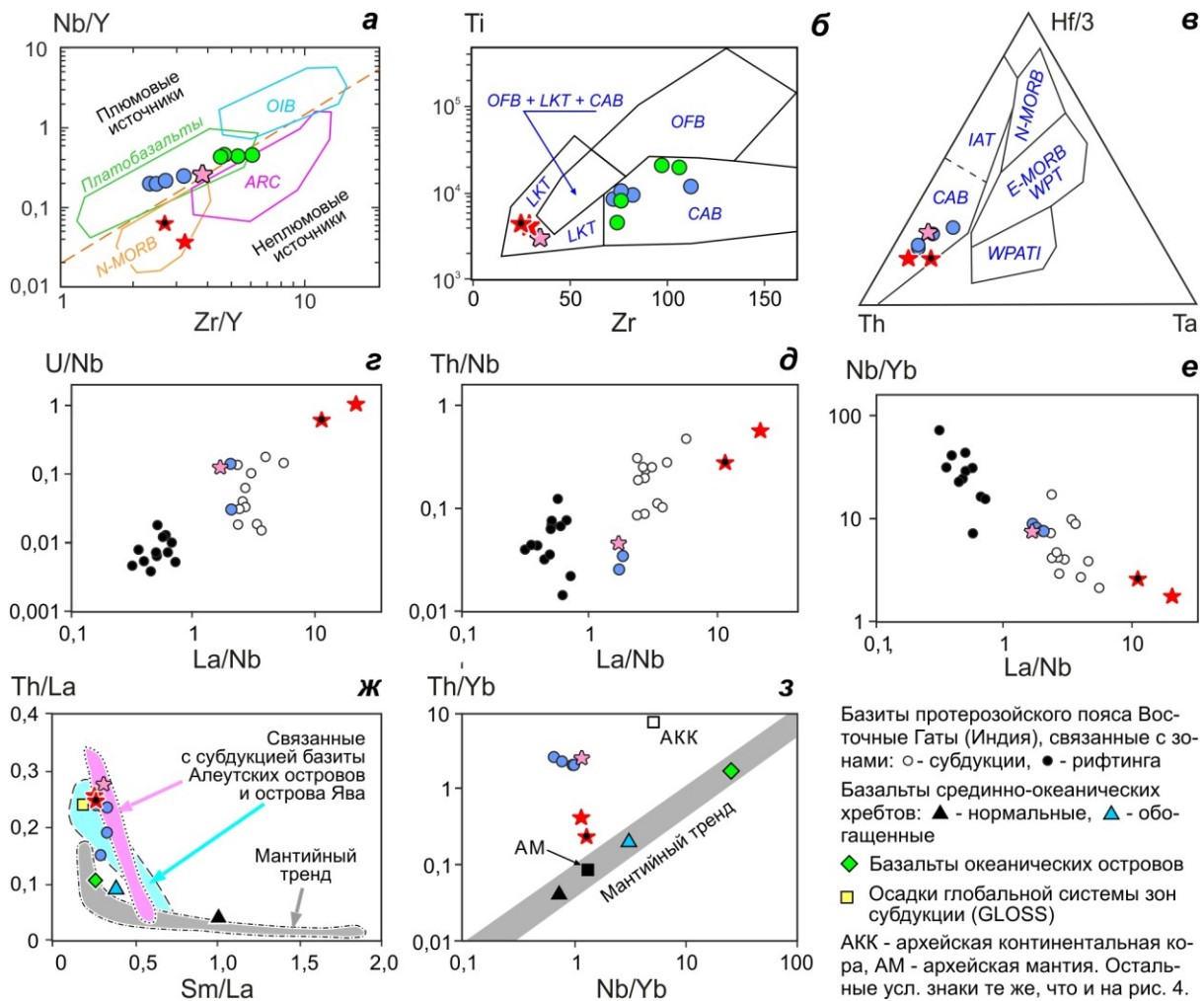


Рис. 6. Геохимические дискриминационные диаграммы (ppm):

- (а) — Nb/Y-Zr/Y (по работе [41]); (б) Ti-Zr (по работе [42]); (в) — Th-Hf/3-Ta (по работе [43]);
 (г) — U/Nb-La/Nb; (д) Th/Nb-La/Nb; (е) — Nb/Yb-La/Nb; (ж) Th/La-Sm/La; (з-ж) — по работе [44];
 (з) — Th/Yb-Nb/Yb (по работе [45]). АКК — архейская континентальная кора, АМ — архейская мантия,
 ARC — базальты, связанные с магматическими и островными дугами, CAB — известково-щелочные базальты,
 E-MORB и N-MORB — соответственно, обогащенные и нормальные базальты срединно-океанических хребтов,
 LKT — низкокальциевые толеиты, OFB — базальты океанического дна, OIB — базальты океанических островов;
 WPT и WPATI — толеитовые и щелочные внутриплитные базальты и их дифференциаты соответственно

Таким образом, наиболее вероятной обстановкой образования архейских базитов Куру-Ваары и Гридино является обстановка магматической или островной дуги, которая существовала на заключительных стадиях субдукционно-аккреционного становления континентальной коры Беломорской провинции [2]. Базиты Нотозера и Тупой губы, скорее всего, также образовались в дуговой обстановке и в таком случае все эти интрузии маркируют зону субдукции. Эта зона расположена параллельно северо-западному простираанию Беломорской провинции (рис. 1, *a*) и слагающих ее архейских толщ. Ее существование уже обосновывалось в литературе, причем не только на основе геохимических данных, но и на находках архейских офиолитов и эклогитов [2, 8, 9, 16, 17, 19, 21, 22].

Выводы

1. Структурное положение интрузий габбро-амфиболитов принципиально отличается от такового интрузии оливиновых габброноритов (друзитов) Куру-Ваары с возрастом 2,44 млрд лет и говорит об их становлении на последних этапах архейской истории Беломорской провинции.

2. Породами, исходными для габбро-амфиболитов Куру-Ваары, являются габбронориты. Одно из первых метаморфических преобразований габброноритов выразилось в формировании гранатовых кайм вокруг темноцветных минералов в статических условиях, которые сохранялись в центральных частях интрузий при последующем преобразовании габброноритов в габбро-амфиболиты. Рассланцевание краевых частей интрузий, а также в редких узких зонах внутри интрузий отвечает заключительным этапам их деформации и метаморфизма.

3. Сопоставление габбро-амфиболитов с другими архейскими плутоническими базитами Беломорья позволяет ограничить их возраст рамками 2,69 и 2,73 млрд лет, при этом они являются наиболее магнезиальными и наименее глиноземистыми разновидностями этих пород.

4. По главным элементам габбро-амфиболиты и другие архейские плутонические базиты принадлежат толеитовой серии. Данные по редкоземельным и рассеянным элементам противоречат происхождению габбро-амфиболитов и базитов Гридино из основных расплавов срединно-океанических хребтов. Скорее всего, они возникли в обстановке магматической или островной дуги, существовавшей на заключительных стадиях субдукционно-аккреционного становления континентальной коры Беломорской провинции. Такая же обстановка наиболее вероятна и для других архейских плутонических базитов Беломорья. Все эти породы, а также архейские эклогиты и офиолиты Беломорской провинции маркируют архейскую зону субдукции.

Благодарности

Полевые работы в карьере Куру-Ваара проводились с любезного разрешения С. Н. Халлиуловой в 2014 году и А. Ю. Орлова и И. В. Калинко в 2016 году. И. А. Горбунов, Т. В. Картушинская и С. В. Мудрук оказали большую помощь во время полевых работ и при подготовке рукописи. Л. Г. Балашова, Л. И. Константинова, А. В. Саргасова и М. Г. Тимофеева выполнили силикатный химический анализ пород (обр. 1–8 в табл. 2), а Е. Э. Савченко и Е. А. Селиванова — микронзондовый и рентгеноструктурный анализ минералов. А. В. Степанова высказала конструктивные замечания к материалам, положенным в основу работы. В. И. Пожиленко и О. С. Сибелев внимательно прочитали рукопись и сделали предложения по уточнению отдельных ее положений и терминологии. Всем им авторы глубоко благодарны. Авторы особо признательны А. А. Щипанскому за постоянное плодотворное обсуждение вопросов геологии как участка Куру-Ваара, так и всей Беломорской провинции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ранний докембрий Балтийского щита. СПб.: Наука, 2005. 711 с. 2. Архей Балтийского щита: геология, геохронология, геодинамические обстановки / А. И. Слабунов [и др.] // Геотектоника. 2006. № 6. С. 1–29. 3. The Lapland-Kola Orogen: Palaeoproterozoic collision and accretion of the northern Fennoscandian lithosphere / J. S. Daly [et al.] // European Lithosphere Dynamics. Geol. Soc. London, Memoirs, 2006. Vol. 32. P. 579–598. 4. Степанов В. С. Основной магматизм докембрия Западного Беломорья. Л.: Наука. 1981. 216 с. 5. U-Pb геохронология беломорид

района Тупой губы оз. Ковдозеро (северная Карелия) / В. В. Балаганский [и др.] // Известия АН СССР. Сер. геол. 1990. № 6. С. 40–51. **6.** Архейский магматизм района оз. Нотозера северо-западного Беломорья: изотопная геохронология и петрология / С. Б. Лобач-Жученко [и др.] // Петрология. 1995. Т. 3, № 6. С. 593–621. **7.** Неоархейские габброиды Беломорской провинции Фенноскандинавского щита: геология, состав, геохронология / А. И. Слабунов [и др.] // ДАН. 2008. Т. 422, № 6. С. 793–797. **8.** Эклогиты Беломорского пояса (Кольский полуостров): геология и петрология / А. А. Щипанский [и др.] // Геология и геофизика. 2012а. Т. 53, № 1. С. 3–29. **9.** Щипанский А. А., Ходоревская Л. И., Слабунов А. И. Геохимия и изотопный возраст эклогитов Беломорского пояса (Кольский полуостров): свидетельства о субдуцировавшей архейской океанической коре // Геология и геофизика. 2012б. Т. 53, № 3. С. 341–364. **10.** Балаганский В. В., Горбунов И. А., Мудрук С. В. Палеопротерозойские Лапландско-Кольский и Свекофеннский орогены (Балтийский щит) // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016. № 3. С. 5–11. **11.** Пожиленко В. И. Метагипербазиты Енско-Риколатвинской зоны северо-западного Беломорья // Базит-гипербазитовый магматизм главных структурно-формационных зон Кольского полуострова. Апатиты: КФАН СССР, 1987. С. 83–87. **12.** Геохронология беломорид: интерпретация многостадийной геологической истории / Е. В. Библикова [и др.] // Геохимия. 1993. № 10. С. 1393–1411. **13.** Беломорский комплекс северной Карелии и юго-запада Кольского полуострова / К. А. Шуркин [и др.]. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1962. 308 с. **14.** Geology of the Kola Peninsula (Baltic Shield) / F. P. Mitrofanov [et al.]. Apatity: GI KSC RAS, 1995. 144 p. **15.** Archaean Kuru-Vaara eclogites in the northern Belomorian Province, Fennoscandian Shield: Crustal architecture, timing, and tectonic implications / V. Balagansky [et al.] // Inter. Geol. Rev. 2015. Vol. 57, no. 11–12. P. 1543–1565. **16.** Mesoarchean subduction processes: 2.87 Ga eclogites from the Kola Peninsula, Russia / M. V. Mints [et al.] // Geology. 2010. Vol. 38. P. 739–742. **17.** The Salma Eclogites of the Belomorian Province, Russia: HP/UHP Metamorphism Through the Subduction of Mesoarchean Oceanic Crust / A. N. Konilov [et al.] // Ultrahigh-Pressure Metamorphism. 25 Years after the Discovery of Coesite and Diamond. Amsterdam, etc.: Elsevier, 2011. P. 623–670. **18.** Пожиленко В. И., Кониллов А. Н., Ван К. В. Эклогиты северо-восточной части Ёнского сегмента Беломорья: новые данные // Региональная геология, минералогия и полезные ископаемые Кольского полуострова: тр. XIII Всерос. Ферсмановской науч. сессии Апатиты: ГИ КНЦ РАН, 2016. С. 118–122. **19.** Сидоров М. Ю., Щипанский А. А. Фазы углерода в УНР эклогитах и эклогитовых породах Беломорской провинции: результаты исследований методом рамановской спектроскопии // Геодинамика раннего докембрия: сходства и различия с фанерозоем: материалы науч. конф. и путеводитель науч. экскурсий. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН. 2017. С. 224–228. **20.** Щипанский А. А., Сидоров А. А., Балаганский В. В. УНР эклогитовые породы Беломорского пояса Балтийского щита: доказательства глубокой субдукции в архее // Геодинамика раннего докембрия: сходства и различия с фанерозоем: материалы науч. конф. и путеводитель науч. экскурсий. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН. 2017. С. 283–286. **21.** Архейские эклогиты Беломорского подвижного пояса, Балтийский щит / О. И. Володичев [и др.] // Петрология. 2004. Т. 12, № 6. С. 609–631. **22.** Metamorphic PT path and zircon U-Pb dating of Archean eclogite association in Gridino complex, Belomorian province, Russia / X. Li [et al.] // Precam. Res. 2015. Vol. 268. P. 74–96. **23.** U-Pb-возраст и геохимия цирконов из салминских эклогитов (месторождение Куру-Ваара, Беломорский пояс) / С. Г. Скублов [и др.] // ДАН. 2010. Т. 432, № 5. С. 668–675. **24.** Первые определения Lu-Hf-возраста гранатов из эклогитов Беломорского подвижного пояса (Балтийский щит, Россия) / Д. Хервартиц [и др.] // ДАН. 2012. Т. 443, № 2. С. 221–224. **25.** Мельник А. Е. Эклогиты северо-западной части Беломорского подвижного пояса: геохимическая характеристика и время метаморфизма: дис. ... к. г.-м. н. СПб., 2015. 196 с. **26.** Neoproterozoic granulite-facies metamorphism in Uzkaia Salma eclogite-bearing mélange, Belomorian Province (Russia) / X. Li [et al.] // Precam. Res. 2017. Vol. 294. P. 257–283. **27.** The metamorphic evolution of Paleoproterozoic eclogites in Kuru-Vaara, northern Belomorian Province, Russia: Constraints from P–T pseudosections and zircon dating / F. L. Liu [et al.] // Precam. Res. 2017. Vol. 289. P. 31–47. **28.** Nomenclature of pyroxenes / N. Morimoto [et al.] // Am. Mineralogist. 1988. Vol. 73. P. 1123–1133. **29.** Дур У. А., Хауи Р. А., Зусман Дж. Породообразующие минералы. Т. 2. М.: Мир, 1965. 406 с. **30.** Deer W. A., Howie R. A., Zussman J. Rock-forming Minerals: Double-Chain Silicates // The Geological Society. London. 1997. Vol. 2B. 764 p. **31.** Nomenclature of Amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names / E. Leake [et al.] // Mineral. Mag. Vol. 61. 1997. P. 295–321. **32.** True and brittle micas: composition and solid-solution series / G. Tischendorf [et al.] // Mineral. Mag. 2007. Vol. 713. P. 285–320. **33.** Middlemost E. A. K. Naming materials in the magma/igneous rock system // Earth Science Reviews. 1994. Vol. 37. P. 215–224. **34.** Irvine T. N., Baragar W. R. A. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks // Can. J. Earth Sci. 1971. P. 523–548. **35.** Магматические горные породы / Е. Д. Андреева [и др.] // Классификация, номенклатура, петрография. Ч. 1. М.: Наука, 1985. 368 с. **36.** Balashov Yu. A., Mitrofanov F. P., Balagansky V. V. New geochronological data on Archaean rocks of the Kola Peninsula // Correlation of Precambrian Formations in the Kola-Karelian Region and Finland. Apatity: KSC RAS, 1992. P. 3–34. **37.** Ранний магматизм Беломорского подвижного пояса, Балтийский щит: латеральная зональность и изотопный возраст / Е. В. Библикова [и др.] // Петрология. 1999. Т. 7, № 2. С. 115–140. **38.** Морозова Л. Н., Баянова Т. Б., Серов П. А. Основные этапы гранитообразования в архее северо-востока Балтийского щита (на примере полигона Воче-Ламбина) // Литосфера. 2011. № 6. С. 14–26. **39.** Hofmann A. W. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust // Earth Planet. Sci. Lett. 1988. Vol. 90. P. 297–314. **40.** Archaean granitoids: an overview and significance from a tectonic perspective / J. Halla [et al.] // Crust–Mantle Interactions and Granitoid Diversification: Insights from Archaean Cratons.

Geol. Soc., London, Spec. Publ. 2017. Vol. 449. P. 1–18. **41.** *Condie K. C.* High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // *Lithos*. 2005. Vol. 79. P. 491–504. **42.** *Pearce J. A., Cann J. R.* Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1973. Vol. 19. P. 290–300. **43.** *Wood D. A.* The application of a Th–Hf–Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1980. Vol. 50. P. 11–30. **44.** *Kumar K. V., Rathna K., Leelanandam C.* Proterozoic subduction-related and continental rift-zone mafic magmas from the Eastern Ghats Belt, SE India: geochemical characteristics and mantle sources // *Current Science*. 2015. Vol. 108, no. 2. P. 184–197. **45.** *Pearce J. A.* Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust // *Lithos*. 2008. Vol. 100. P. 14–48.

Сведения об авторах

Балаганский Виктор Валентинович — доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией Геологического института КНЦ РАН; профессор Мурманского государственного технического университета

E-mail: balagan@geoksc.apatity.ru

Рауд Маргарита Юрьевна — инженер Геологического института КНЦ РАН

E-mail: mar-raud@yandex.ru

Сидоров Михаил Юрьевич — младший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: sidorov@geoksc.apatity.ru

Author Affiliation

Victor V. Balagansky — Dr. Sci. (Geology & Mineralogy), Head of Laboratory of the Geological Institute of the KSC of the RAS, Professor at the Murmansk State Technical University

E-mail: balagan@geoksc.apatity.ru

Margarita Yu. Raud — Engineer of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: mar-raud@yandex.ru

Mikhail Yu. Sidorov — Junior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: sidorov@geoksc.apatity.ru

Библиографическое описание статьи

Балаганский, В. В. Архейские габбро-амфиболиты эколгитового участка Куру-Ваара, Беломорская провинция: геология, петрография, геохимия и происхождение / *В. В. Балаганский, М. Ю. Рауд, М. Ю. Сидоров* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 3 (9). — С. 5–23.

Reference

Balagansky Victor V., Raud Margarita Yu., Sidorov Mikhail Yu. Archaean Gabbro-Amphibolites of the Kuru-Vaara Eclogite Study Area, Belomorian Province: Geology, Petrography, Geochemistry and Origin. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 3 (9), pp. 5–23. (In Russ.).

УДК 551.2.08(470.21)

**ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ НИЖНЕЙ КОРЫ
БЕЛОМОРСКОГО ПОДВИЖНОГО ПОЯСА ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ
U-Pb и Lu-Hf ИЗОТОПНЫХ СИСТЕМ ЦИРКОНА
ИЗ ГРАНАТОВЫХ ГРАНУЛИТОВ***

В. Р. Ветрин

ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

ФГУП Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, Москва

Аннотация

Приведены результаты изучения строения кристаллов, их геохимии, U-Pb-возраста и изотопного состава Hf в цирконе из ксенолитов гранатовых гранулитов нижней коры Беломорского подвижного пояса. Установлен первично-магматический протолитовый генезис циркона раннего палеопротерозойского возраста (2,47 млрд лет), образованного в процессе кристаллизации базитовых пород нижней коры. Циркон мезо- и неоархейского возраста представлен ксеногенными кристаллами, захваченными расплавами основного состава при их контаминации более древним сиалическим веществом коры. Поздний палеопротерозойский возраст (1,75 млрд лет) имеют метаморфогенные зерна циркона, и палеозойское время образования установлено для магматического кристалла, образованного при инъекции ксенолитов расплавами щелочноультраосновного состава, доставлявших ксенолиты к поверхности. На основании U-Pb-датировок и Lu-Hf-систематики кристаллов намечены этапы образования и преобразования нижней коры региона.

Ключевые слова:

ксенолиты, нижняя кора, циркон, Lu-Hf, U-Pb изотопные системы.

**STAGES OF THE BELOMORIAN MOBILE BELT LOWER CRUST FORMATION ACCORDING
TO STUDYING OF U-Pb AND Lu-Hf ISOTOPE SYSTEMS OF ZIRCON FROM GARNET GRANULITES**

Valeriy R. Vetrin

Geological Institute of the KSC of the RAS

Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements, Moscow

Abstract

The structure, geochemistry, U-Pb age and Lu-Hf isotopic composition of zircon crystals from xenoliths of garnet granulites of the lower crust of the Belomorian mobile belt have been studied. Primary magmatic protolithic origin of Early Palaeoproterozoic zircon (2,47 billion years), formed during crystallization of mafic rocks of the lower crust, has been established. Zircon of Meso- and Neoarchaeon is represented by xenogenic crystals trapped by basic melts during their contamination by more ancient sialic crust material. Metamorphogenic zircon grains yielded Late Palaeoproterozoic age (1,75 billion years). Palaeozoic time of formation has been established for magmatic crystal, formed during xenolith injection by alkaline ultrabasic melts which delivered xenoliths to the surface. On the basis of U-Pb dating and Lu-Hf systematics of crystals, stages of formation and transformation of the lower crust in the region were defined.

Keywords:

xenoliths, lower crust, zircon, Lu-Hf, U-Pb isotope systems.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 17-35-50002).



Циркон — минерал-геохронометр, устойчивый к внешним воздействиям, часто сохраняющий изотопную память при участии в последующих процессах магматизма, метаморфизма и осадконакопления. Часто применяемые в настоящее время методы локального изотопного исследования циркона на вторично-ионных масс-спектрометрах (SIMS) позволяют определять возраст отдельных зон кристаллов (ядра, оболочки, каймы) на участках менее 20 мкм. В то же время при SIMS-датировании кристаллов циркона из одной породы исследователи часто получают спектр дискретных значений возраста с интервалом в десятки и сотни миллионов лет. Корреляция полученных данных с конкретными геологическими событиями производится при изучении морфологии, внутреннего строения и геохимии кристаллов, но не всегда дает однозначные результаты. Дополнением к указанным методикам определения генезиса циркона является исследование в датированных U-Pb-методом кристаллах изотопного состава Hf и сопоставление полученных результатов с данными Sm-Nd изотопной системы в породе, содержащей анализируемый минерал.

В настоящей статье приведены результаты изучения строения кристаллов, их геохимии, U-Pb-возраста и изотопного состава Hf в цирконе из ксенолитов гранатовых гранулитов нижней коры Беломорского подвижного пояса (БПП). На основании U-Pb-датировок и Lu-Hf-систематики кристаллов намечены этапы образования и преобразования нижней коры региона.

Геология и петрография ксенолитов

В северо-западной части БПП находится около 1000 взрывных даек и более 40 трубок взрыва, содержащих ксенолиты гранатовых гранулитов ($Grt + Crx + Pl \pm Opx \pm Qtz \pm Kfs \pm Phl \pm Hbl$, $T = 750\text{--}930\text{ }^\circ\text{C}$, $P = 12\text{--}15$ кбар), и в меньшем количестве — дупироксеновых и гранатовых пироксенитов, принадлежащим к отторженцам нижней коры [1]. Гранатовые гранулиты — это среднезернистые породы, состоящие из граната (10–60 %), клинопироксена (< 1–40 %), плагиоклаза (20–70 %), ромбического пироксена (0–4 %) роговой обманки (0–17 %) и представленные всеми переходными типами от мафических (эклогитовых) до фельзических разновидностей. По химическому составу гранатовые гранулиты соответствуют кварцевым и оливинным толеитам.

Образцы и методы исследования

Кристаллы циркона выделены из трех образцов гранатовых гранулитов, отобранных в трубке взрыва на о. Еловом в Кандалакшском заливе Белого моря. Концентрации U, Th, Pb, REE и U-Pb-возраст циркона определялись на ионном микрозонде SHRIMP-II в центре изотопных исследований (ЦИИ) ВСЕГЕИ, (Санкт-Петербург). Измерение концентраций Sm, Nd и изотопного состава Nd в ксенолитах выполнено на масс-спектрометре TRITON в ЦИИ ВСЕГЕИ. Изотопный состав Hf в цирконе в датированных кристаллах определен в Университете Маквари (Сидней, Австралия) методом MC-LA-ICP-MS.

Строение, возраст и состав кристаллов циркона

При U-Pb-исследовании циркона из ксенолитов гранатовых гранулитов установлено расположение датировок кристаллов в интервале от 2,84 до 0,33 млрд лет с образованием пяти возрастных этапов — мезо- и неогарнейского, раннего, позднего палеопротерозойского и палеозойского [1].

Наиболее древний для изученных кристаллов циркона мезогарнейский возраст определен для отчетливо зонального призматического зерна с конкордантным значением в 2844 ± 11 млн

лет, близким возрасту древнейших гранитоидов БПП (2,83–2,8 млрд лет), или среднекислого вулканизма Северо-Карельской системы зеленокаменных поясов БПП (2,88–2,83 млрд лет). Циркон содержит 242 ppm урана, 175 ppm тория и отнесен к ксенокристам, захваченным из пород архейского фундамента.

Неоархейский конкордантный возраст (2788 ± 35 млн лет) установлен для зональных призматических кристаллов, содержащих 65–93 ppm U ($Th/U = 0,33–0,43$). Все кристаллы содержат повышенные концентрации РЗЭ (1654–3358 ppm), характеризуются слабо выраженной Ce-аномалией ($Ce/Ce^* = 1,21–4,73$) и плоскими, слабодифференцированными спектрами РЗЭ ($Lu_N/La_N = 12,4–104$, $Sm_N/La_N = 0,53–2,63$). Указанные особенности состава циркона более свойственны циркону «гидротермального» происхождения, образованному при высокой активности флюидной фазы, чем циркону магматического генезиса (рис. 1).

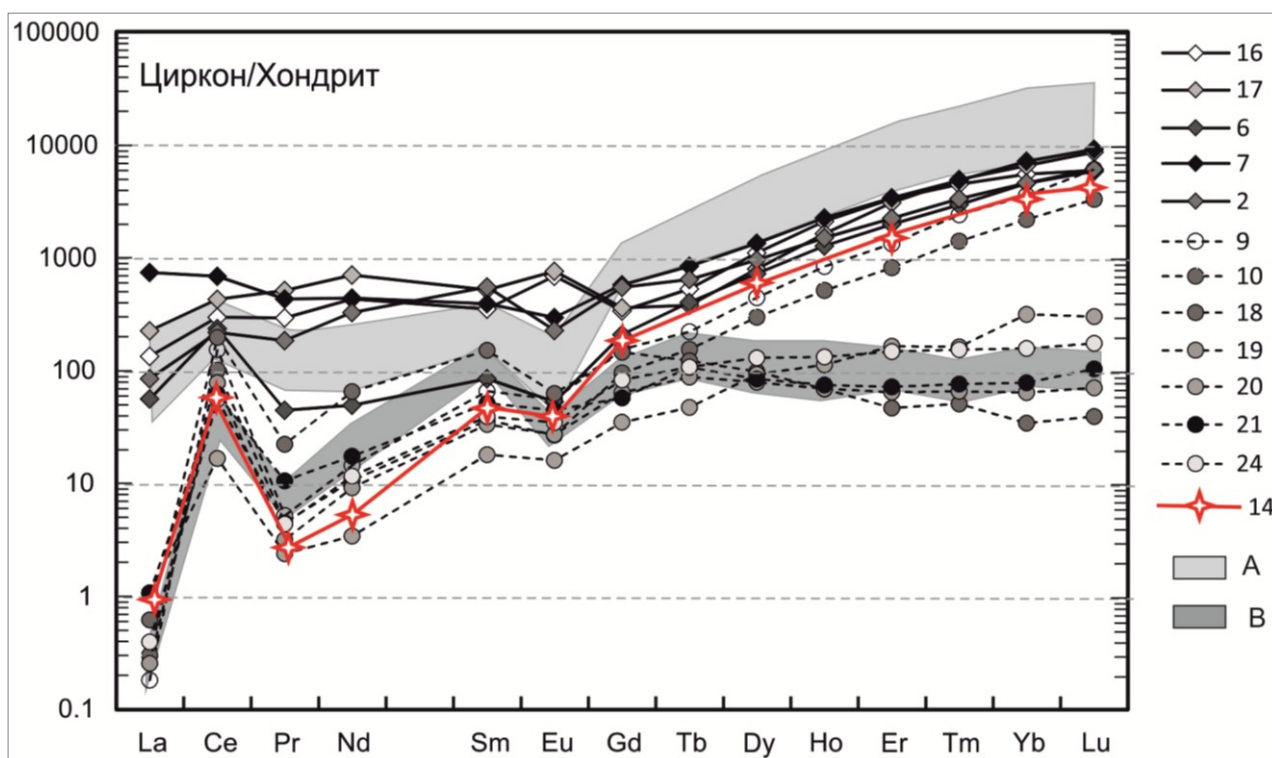


Рис. 1. Спектры распределения РЗЭ в цирконе неоархейского (2, 6, 7, 16, 17) и позднего палеопротерозойского (9, 10, 18, 19–21, 24) возрастов: 14 — состав магматического циркона [2]; А — поле составов гидротермального циркона массива Багги Плейн [3]; В — поле составов циркона гранулитовой фации в парагенезисе с гранатом [4]

Ранний палеопротерозойский конкордантный возраст (2,47 млрд лет) установлен для призматических, овальных, отчетливо зональных кристаллов циркона и обломков кристаллов неправильной формы. Циркон содержит 94–239 ppm урана, 68–169 ppm тория, имеет повышенные значения Th/U (0,58–1,0), что, наряду с зональной структурой кристаллов, определяет их первично-магматический генезис.

Циркон позднего палеопротерозойского возраста образует округлые бесцветные прозрачные кристаллы размером до 0,2–0,4 мм. Концентрации U и Th в кристаллах составляют 41–162 и 23–354 ppm соответственно, Th/U — 0,56–5,94. По морфологии кристаллов и концентрациям U, Th это типичный «гранулитовый» циркон, свойственный многим высокометаморфизованным

комплексам мира [4]. Спектры распределения РЗЭ имеют отчетливо проявленные положительную цериевую и отрицательную европиевую аномалии ($Ce/Ce^* = 10-159$ и $Eu/Eu^* = 0,42-0,64$), но существенно различаются по концентрациям тяжелых лантаноидов. Для преобладающей части кристаллов отношение Lu_N/Gd_N составляет $0,3-9,0$, что свойственно циркону, кристаллизовавшемуся в субсолидусных условиях гранулитовой фации в ассоциации с гранатом. Для двух образцов установлены более высокие значения этого отношения ($35-40$), характерные для циркона, образованного в равновесии с анатектическими расплавами. Вся совокупность возрастных данных характеризуется одномодальным распределением с максимальным количеством значений в интервале $1650-1800$ млн лет и аппроксимируется дискордией с верхним пересечением в 1750 ± 30 млн лет и нижним пересечением в $T_2 = 1231 \pm 230$ млн лет. Последняя цифра отвечает, по-видимому, времени преобразования U-Pb изотопной системы циркона при прогреве нижней коры в процессе внедрения магматических производных гренвилльского этапа с возрастом около $1,2$ млрд лет.

Наименьшее для изученных кристаллов конкордантное значение возраста — 326 ± 13 млн лет определено для призматического кристалла с нечетко выраженной зональностью. Концентрации U и Th в кристалле составляют 142 и 94 ppm соответственно, и повышенное значение отношения Th/U, равное $0,66$, свидетельствует о первично-магматическом генезисе циркона.

Генетические типы кристаллов циркона

Результаты определения U-Pb-возраста циркона из ксенолитов выявляют их существенную вещественную и возрастную гетерогенность. Последняя обусловлена формированием циркона в ксенолитах сложного состава, возникших в результате ряда эндогенных процессов, включающих кристаллизацию исходных расплавов с образованием нижнекоровых протолитов, контаминацию глубинных магм веществом древней коры, а также изменением состава протолитов более поздними процессами метаморфизма и магматизма.

Для реконструкции генетических типов циркона целесообразно использование изотопных Lu-Hf и Sm-Nd-систем, ведущих себя когерентно в процессах магматической дифференциации, с положительной корреляцией начальных изотопных отношений $\epsilon Nd(T)$ в породе и $\epsilon Hf(T)$ в породе или цирконе [5–8]. Графически указанная закономерность поведения изотопных систем выражается линией с параметром $\epsilon Hf(T) = 1,36 \cdot \epsilon Nd(T) + 3,0$, получившей название *terrestrial array*, или ТА, и с учетом дисперсий определения изотопных параметров — полосой ТА, имеющей ширину порядка $2-4 \epsilon Hf(T)$ (рис. 2). На рассматриваемой диаграмме кристаллы циркона, имеющие одно и то же значение $\epsilon Nd(T)$, образуют вертикальные тренды, протяженность которых определяется разбросом значений $\epsilon Hf(T)$. В случае ксеногенных кристаллов циркона, а также при его образовании в процессах более позднего магматизма изотопные Lu-Hf и Sm-Nd-системы породы и циркона становятся некогерентными, что выражается в смещении точек состава за пределы поля ТА. Помимо использования указанной диаграммы, отнесение кристаллов циркона к ксеногенным, собственно протолитовым, и более поздним по времени образования возможно при использовании модельного возраста ксенолитов $T_{Nd}(DM)$ и сопоставления его с модельным возрастом $T_{Hf}(DM)$ циркона и результатами датирования минерала U-Pb-методом.

Исходя из этого, протолитовый первично-магматический генезис установлен для зонального циркона раннего палеопротерозойского возраста ($T_{Zr} = 2,5$ млрд лет) с близкими значениями $T_{Hf}(DM)$ и $T_{Nd}(DM)$ в $2,76$ и $2,72$ млрд лет соответственно. Точка состава циркона расположена

в пределах поля ТА, с $\epsilon_{\text{Hf}}(T) = 1,6$ и $\epsilon_{\text{Nd}}(T) = 1,7$, чем определяется согласованность Lu/Hf и Sm/Nd изотопных систем в цирконе и породе при кристаллизации протолита. Образование рассматриваемых цирконов происходило, вероятно, при кристаллизации в неархейской коре магм ультраосновного-основного состава, аналогами которых в современном эрозионном срезе БПП были многочисленные интрузии друзитов, и в пределах Кольского п-ова, Карелии и Финляндии — расслоенные интрузии перидотит-пироксенит-габброноритового состава и связанные с ними вулканиты с возрастом 2,4–2,5 млрд лет [9].

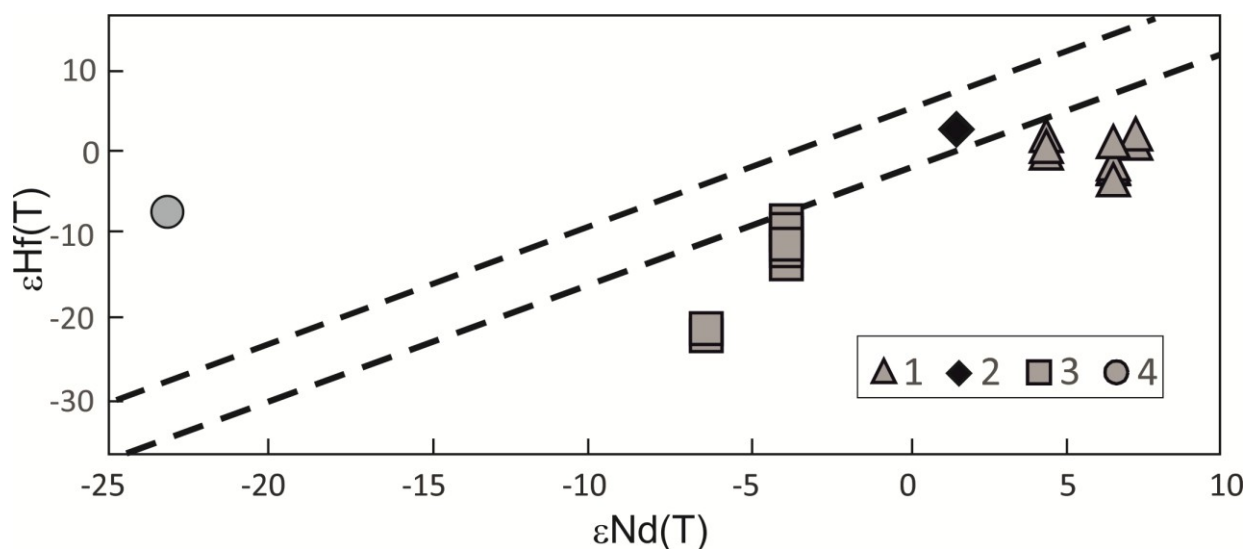


Рис. 2. Диаграмма в координатах $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ – $\epsilon_{\text{Hf}}(T)$:

1–4 — циркон архейского, ранне-, позднепротерозойского и палеозойского возрастов соответственно. Пунктиром показаны границы поля ТА (*terrestrial array*)

К ксеногенным отнесены кристаллы циркона неархейского возраста, имеющие $T_{\text{Hf}}(\text{DM})$ и T_{Zr} 3,09–2,96 и 2,78–2,72 млрд лет соответственно и на ~500 и ~200 млн лет превышающие модельный возраст $T_{\text{Nd}}(\text{DM})$ вмещающего гранатового гранулита, определенный в 2,57 млрд лет. Близким изотопным составом обладают неархейские кристаллы циркона с $T_{\text{Hf}}(\text{DM}) = 3,01$ –2,93, $T_{\text{Nd}}(\text{DM}) = 2,72$ и $T_{\text{Zr}} = 2,72$ –1,58 млрд лет, с уменьшением значений возраста циркона по изотопному отношению $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ вследствие потерь радиогенного свинца. На диаграмме в координатах $\epsilon_{\text{Hf}}(T)$ – $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ точки состава циркона располагаются ниже поля ТА, что обусловлено неравновесностью Lu-Hf и Sm-Nd изотопных систем циркона и ксенолита.

По возрасту рассматриваемый циркон коррелируется с цирконом наиболее распространенных в пределах БПП неархейских тоналитовых гнейсов ($T = 2,76$ –2,72 млрд лет), а по возрасту, Lu-Hf изотопной систематике и редкоземельному составу — с этим минералом из массивов санукитоидов ($T = 2,76$ –2,68 млн лет), имеющих широкое развитие в пределах восточной части Балтийского щита [10]. Особенности внутреннего строения и редкоземельного состава циркона позднего палеопротерозойского возраста позволяют выделить метаморфогенные зерна циркона, кристаллизовавшиеся в парагенезисе с гранатом в условиях гранулитовой фации, и кристаллы, образованные из межзерновых анатектических расплавов. Дискордантный возраст всей совокупности рассматриваемых кристаллов в 1750 ± 30 млн лет может рассматриваться, вероятно, в качестве оценки времени гранулитового метаморфизма при формировании Лапландской коллизионной структуры (1,95–1,75 млрд лет) и обусловленных этим процессов гранитизации и образования пегматитов в породах БПП.

Зональность и особенности геохимии циркона палеозойского возраста свидетельствуют о его магматическом генезисе. В то же время отсутствие когерентности изотопных Lu/Hf- и Sm/Nd-систем в кристаллах циркона и существенно более древних породах ксенолитов определяется существенно радиогенным составом гафния в цирконе и нахождением точек его состава вне поля ТА. Образование рассматриваемых кристаллов происходило, вероятно, при инъекции ксенолитов прожилками вмещающих ксенолиты палеозойских ультраосновных лампрофиров, контаминированных веществом коры.

Вероятный генезис «гидротермальных» кристаллов циркона

Неоархейские ксеногенные кристаллы циркона из ксенолитов нижней коры близки по возрасту циркону из регионально развитых в пределах БПП тоналитовых гнейсов и санукитоидов восточной части Балтийского щита. При изучении геохимии кристаллов циркона из тоналитовых гнейсов в них было установлено близкое к стандартному магматическому циркону распределение REE и пониженные значения Th/U ($< 0,5$ [10]). Как было показано выше, циркон из гранатовых гранулитов имеет повышенные концентрации LREE, повышенные значения Th/U-отношения, слабодифференцированные спектры распределения REE, редуцированную Ce-аномалию. Эти особенности состава существенно отличают его от циркона магматического генезиса и приближают к составу метасоматически измененных или «гидротермальных» цирконов, образование которых предполагается не только из гидротермальных растворов, но и в процессе кристаллизации насыщенных флюидом расплавов, обогащенных несовместимыми элементами, в том числе LREE [3].

Среди неоархейских цирконов Балтийского щита близкое к «гидротермальным» цирконам распределение REE имеют кристаллы циркона санукитоидов Карелии [11], а также их жильных производных — миаскитовых лампроитов [12]. Согласно данным этих исследователей, образование «гидротермальных» цирконов в санукитоидах было обусловлено воздействием на кристаллы циркона магматического генезиса постмагматических флюидов, обусловивших увеличение в них концентраций LREE, Ca, Al, Fe, Ba, Ti, Th, Sr. Сходство циркона из ксенолитов и санукитоидов Карелии подтверждается и близким изотопным составом Hf в этом минерале. Как следует из имеющихся данных ([13, 14], включая ссылки в этих работах), в восточной части Балтийского щита установлено более 30 массивов санукитоидов с возрастными 2,76–2,68 млрд лет. Размещение интрузий контролировалось тектонически ослабленными зонами — крупными разломами, сдвигами, приуроченными как к границам блоковых структур, так и к разломам, секущим их границы. Для санукитоидов характерны высокие концентрации Cr, Ni, повышенные содержания LREE, Ba, Sr. Значения $\epsilon Nd(t)$ варьируют от +2,2 до –4,6, и наименее радиогенный состав Nd определен в санукитоидах, контаминированных веществом коры. Предполагается, что расплавы санукитоидов могли формироваться за счет частичного плавления обогащенной щелочами и несовместимыми элементами метасоматизированной мантии [15], образованной при подъеме мантийного вещества. Во время подъема плюма (астеносферного диапира) сопровождающий его флюидный поток, опережавший плюм, мог произвести метасоматическое изменение литосферной мантии, а сам астеносферный диапир был источником тепла, необходимого для плавления уже метасоматизированной мантии.

Площадное распространение массивов санукитоидов в восточной части Балтийского щита предполагает интенсивное проявление процессов плавления и флюидной переработки литосферной мантии региона в неоархее. Флюидному воздействию подвергалась при этом, вероятно, не только литосферная мантия, но и расположенные выше породы архейской нижней коры, представленные главным образом аналогами вулканитов зеленокаменных поясов и

гранитоидами ТТГ-состава. Флюидная переработка пород нижней коры с изменением состава находившихся в них кристаллов циркона могла производиться преимущественно вдоль зон глубинных разломов, в ряде случаев контролировавших и размещение массивов санукитоидов. Исходя из этого можно полагать, что при подъеме по древним зонам разломов палеопротерозойских расплавов базит-ультрабазитового состава они ассимилировали вещество переработанной флюидами архейской нижней коры с сохранением в расплаве ксенокристаллов циркона этих пород и изменением состава базитов в сторону увеличения концентраций LREE, Ba, Sr и появлением в них отрицательных значений $\epsilon Nd(t)$.

Выводы

При изучении строения, геохимии, U-Pb-возраста и систематики Lu-Hf изотопной системы кристаллов циркона из ксенолитов гранатовых гранулитов нижней коры БП в них установлены первично-магматический протолитовый, ксеногенный, метаморфогенный и поздний магматический генетические типы циркона, часто находящиеся в пределах одного образца.

Протолитовый первично-магматический генезис установлен для зонального циркона раннего палеопротерозойского возраста ($T_{Zr} = 2,5$ млрд лет), имеющего близкий изотопный состав Hf с цирконом высокомагнезиальных вулканитов такого же возраста. Эти данные согласуются с выводами о принадлежности изученных нижнекорových ксенолитов к производным высокомагнезиальных бонинитоподобных расплавов, образующих в верхней коре северной части Балтийского щита палеопротерозойскую провинцию изверженных пород с возрастом 2,4–2,5 млрд лет [9].

Внедрение больших объемов палеопротерозойских расплавов основного-ультраосновного состава в нижние части архейской коры усилило ее расслоение на верхнюю и нижнюю кору. При подъеме расплавов базит-ультрабазитового состава в нижние части архейской коры они, вероятно, ассимилировали вещество переработанных мантийными флюидами пород нижней коры с изменением состава базитов в сторону увеличения в них концентраций LREE, Ba, Sr и сохранением в расплавах ксенокристаллов циркона из этих пород. Неравновесность Lu-Hf и Sm-Nd изотопных систем датированных ксеногенных кристаллов циркона и породы ксенолита подтверждается расположением точек их состава ниже поля ТА (*terrestrial array*) на диаграмме в координатах $\epsilon Hf(T)$ – $\epsilon Nd(T)$.

В позднем палеопротерозое (~ 1,75 млрд лет) породы нижней коры испытали гранулитовый метаморфизм, связанный с формированием Лапландской коллизионной структуры и обусловленных этим процессов гранитизации и частичного плавления пород. Образованные в ксенолитах кристаллы циркона метаморфогенного генезиса по величине отношения $^{176}Hf/^{177}Hf$ близки циркону из интрузивных тел гранитоидов в обрамлении палеорифтогенной Печенгской структуры и в южной части Лапландского гранулитового пояса, что может свидетельствовать о происхождении их исходной магмы в результате процесса гранитизации нижней коры региона.

В палеозое породы нижней коры были прорваны щелочно-ультраосновными расплавами и в виде ксенолитов вынесены на поверхность. Циркон палеозойского возраста имеет слабо радиогенный состав гафния, с $\epsilon Hf(T)$ ниже величины этого отношения в цирконе из имеющих близкое время образования карбонатитов палеозойского Хибинского массива нефелиновых сиенитов. Модельный возраст $T_{Hf}(DM)$ циркона составляет 1,21 млрд лет, и точка его состава расположена ниже линии развития CHUR, что было обусловлено, вероятно, кристаллизацией циркона из инъецирующих ксенолиты прожилков ультраосновных лампрофиров, контаминированных веществом верхней коры.

Автор признателен Е. А. Белоусовой (*Macquarie University, Dept. of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Sydney, Australia*), выполнившей изучение изотопного состава Hf в цирконе, и анонимному рецензенту за ряд замечаний, учтенных в окончательном варианте статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Этапы формирования нижней коры Беломорского подвижного пояса (Кольский полуостров) / В. Р. Ветрин [и др.] // ДАН. 2009. Т. 424, № 5. С. 676–681.
2. Hoskin P. W. O. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alterate Hadean zircon from the Jack Hills, Australia // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2005. Vol. 69. P. 637–648.
3. Hoskin P. W. O., Schaltegger U. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis // *Rev. Mineral. Geochim.* 2003. Vol. 53. P. 27–62.
4. Каулина Т. В. Образование и преобразование циркона в полиметаморфических комплексах. Апатиты: КНЦ РАН, 2010. 144 с.
5. Blichert-Toft J., Albarede F. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and evolution of the mantle-crust system // *Earth, Planet. Sci. Lett.* 1997. Vol. 148. P. 243–258.
6. Vervoort J. D., Blichert-Toft J. Evolution of depleted mantle: Hf evidence from juvenile rocks through time // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1999. Vol. 63, no. 3/4. P. 533–556.
7. Корректная интерпретация U-Pb-возраста по цирконам на основе изотопной геохимии гафния и неодима (на примере некоторых магматических комплексов фундамента Восточно-Европейской платформы) / К. И. Лохов [и др.] // Региональная геология и металлогения. 2009. № 38. С. 43–53.
8. Ветрин В. Р., Белоусова Е. А., Кременецкий А. А. Lu-Hf изотопная систематика циркона из ксенолитов нижней коры Беломорского подвижного пояса // *Записки РМО*. 2017. Ч. CXLVI, № 3. С. 1–16.
9. Шарков Е. В., Смолькин В. Ф., Красивская И. С. Раннепротерозойская магматическая провинция высокомагнезиальных бонинитоподобных пород в восточной части Балтийского щита // *Петрология*. 1997. Т. 5, № 5. С. 503–522.
10. Слабунов А. И. Геология и геодинамика архейских подвижных поясов (на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 296 с.
11. Федотова А. А., Библикова Е. В., Симакин С. Г. Геохимия циркона (данные ионного микрозонда) как индикатор генезиса минерала при геохронологических исследованиях // *Геохимия*. 2008. № 9. С. 980–997.
12. Распределение редкоземельных и редких элементов в цирконах из миаскитовых лампроитов Панозерского комплекса Центральной Карелии / С. Г. Скублов [и др.] // *Геохимия*. 2009. № 9. С. 958–971.
13. Neoarchean crustal recycling and mantle metasomatism: Hf-Nd-Pb-O isotope evidence from sanukitoids of the Fennoscandian shield / E. Heilimo [et al.] // *Precamb. Res.* 2013. Vol. 228. P. 250–266.
14. Егорова Ю. С., Лобиков А. Ф. Изотопный состав свинца и неодима санукитоидов Карелии как свидетельство их гетерогенной природы // ДАН. 2013. Т. 453, № 2. С. 196–200.
15. Stern R., Hanson G. Archean high-Mg granodiorite: a derivative of light rare earth element-enriched monzodiorite of mantle origin // *J. Petrol.* 1991. Vol. 32, no. 1. P. 201–238.

Сведения об авторе

Ветрин Валерий Романович — кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: vetrin@geoksc.apatity.ru

Author Affiliation

Valeriy R. Vetrin — PhD (Geology & Mineralogy), Leading Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: vetrin@geoksc.apatity.ru

Библиографическое описание статьи

Ветрин, В. Р. Этапы формирования нижней коры Беломорского подвижного пояса по данным изучения U-Pb и Lu-Hf изотопных систем циркона из гранатовых гранулитов / В. Р. Ветрин // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 3 (9). — С. 24–31.

Reference

Vetrin Valeriy R. Stages of the Belomorian Mobile Belt Lower Crust Formation According to Studying of U-Pb and Lu-Hf Isotope Systems of Zircon from Garnet Granulites. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 3 (9), pp. 24–31. (In Russ.).

УДК 553.491(551.761+571.63)

**МИНЕРАЛОГИЯ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ
В МАРГАНЦЕВО-СИЛИКАТНЫХ ПОРОДАХ
ТРИАСОВОЙ КРЕМНЕВОЙ ФОРМАЦИИ СИХОТЭ-АЛИНЯ**

В. Т. Казаченко, Е. В. Перевозникова

ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН

Аннотация

Особенностью минералогии Au в марганцево-силикатных породах (метаморфизованных металлоносных осадках) являются редкие минеральные формы, такие как так называемое «медистое Au» и порпезит. Минералы Pt и Pd представлены самородными формами, а также твердыми растворами Pt, Pd, Bi, Ag и Sn. Основное количество Ag присутствует в виде сульфида и в самородном состоянии. Размерность частиц минералов благородных металлов изменяется от долей миллиметров до коллоидно-дисперсной. Минералы Au, Pt, Pd и Ag образовались (в нынешнем виде) в процессе метаморфизма за счет вещества протолита, а также благородных металлов триасовых углеродистых силицитов, мигрировавших по трещинам в другие породы в составе флюида с высоко-, ультравосстановительными способностями. Марганцево-силикатные породы Сихотэ-Алиня изначально являлись продуктами размыва латеритной коры выветривания (поздний анизий — конец триаса) габброидов островов, накапливавшимися в прилегающих к островам акваториях. Обогащение благородными и другими металлами протолитов марганцево-силикатных пород и триасовых углеродистых силицитов обусловлено, вероятно, их сорбированием гидроксидами Mn и Fe, а также органическим веществом в процессе экзогенного выветривания габброидов.

Ключевые слова:

благородные металлы, минералогия, марганцево-силикатные породы, углеродистые силициты, триас, Сихотэ-Алинь.

**MINERALOGY OF PRECIOUS METALS IN MANGANESE SILICATE ROCKS
OF THE TRIASSIC SILICON FORMATION OF THE SIKHOTE-ALIN**

Valentin T. Kazachenko, Elena V. Perevostnikova

Far East Geological Institute of the Far-Eastern Branch of the RAS

Abstract

Specific feature of the Au mineralogy in manganese silicate rocks (metamorphosed metalliferous sediments) are the rare mineral forms, such as so called “copper Au” and porpezite. Pt and Pd minerals are represented by native forms and solid solutions of Pt, Pd, Bi, Ag, and Sn. The main Ag amount is present in the form of sulfide and in native state. Particle sizes of minerals of precious metals vary from the millimeter shares to colloid-dispersion. The Au, Pt, Pd, and Ag minerals originated (in present form) in the process of metamorphism at the expense of the protolith matter and precious metals of the Triassic carbonaceous silicites that migrated along the fractures to other rocks in the composition of the fluid with high- and ultra-reduction abilities. The manganese silicate rocks of the Sikhote-Alin were initially the products of the washout of the laterite crust of weathering (Late Anisian — Triassic end) of gabbroids of islands accumulated in the water areas adjacent to the islands. The enrichment of the manganese silicate rocks and the Triassic carbonaceous silicites in precious and other metals of protoliths was, probably, governed by sorption of them by Mn and Fe hydroxides and organic matter through the exogenic weathering of gabbroids.

Keywords:

precious metals, mineralogy, manganese silicate rocks, carbonaceous silicites, Triassic, the Sikhote-Alin.

Введение

Триасовая кремневая формация Сихотэ-Алиня сложена кремнями, кремневыми аргиллитами, аргиллитами и алевроаргиллитами [1]. В некоторых районах в ее составе присутствуют известняки, мергели, глинистые и кремнистые известняки, а также микститы. В Сихотэ-Алине известны лишь фрагменты триасовой кремневой формации в составе меланжевых комплексов юрских (Самаркинский и Наданьхада-Бикийский террейны), а также меловой (Таухинский) аккреционных призм (рис. 1).

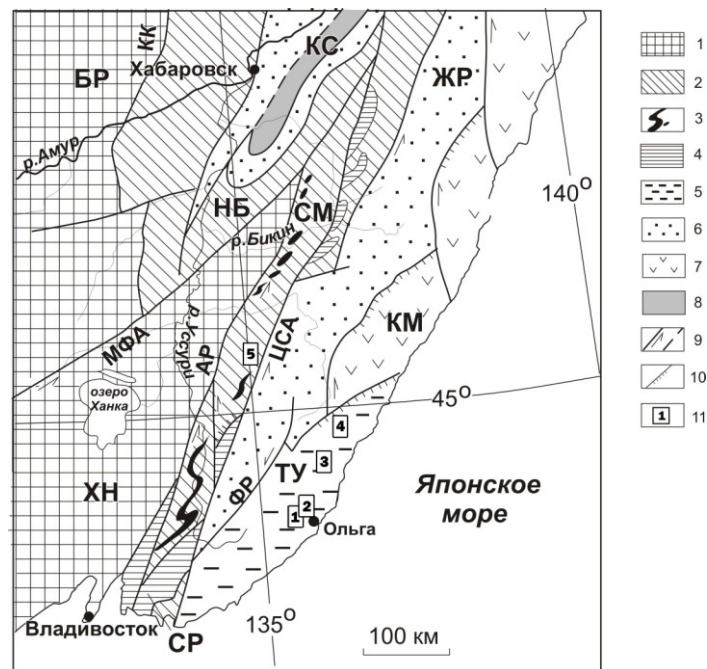


Рис. 1. Положение изученных объектов в Сихотэ-Алине. Тектоническая основа по А. И. Ханчуку [30] с небольшими изменениями:

- 1 — ХН — Ханкайский массив, БР — Буреинский массив; 2 — юрские террейны (фрагменты аккреционных призм): СМ — Самаркинский, НБ — Наданьхада-Бикийский; 3 — калиновские габброиды (девон?);
- 4 — Окраинско-Сергеевский террейн (СР) и его фрагменты; 5–8 — раннемеловые террейны: 5 — неокомовской аккреционной призм (ТУ — Таухинский), 6 — турбидитового бассейна (ЖР — Журавлевско-Амурский);
- 7 — баррем-альбской островодужной системы (КМ — Кемский); 8 — альбской аккреционной призм (КС — Киселевско-Маноминский); 9 — левые сдвиги: КК — Куканский, АР — Арсеньевский, МФА — Мишань-Фушуньский (Алчанский), ЦСА — Центральный Сихотэ-Алинский, ФР — Фурмановский;
- 10 — надвиги; 11 — изученные площади: 1 — Широкопаднинская, 2 — Мокрушинская, 3 — Высокогорская, 4 — Садовая, 5 — Горная

Особенностью формации является наличие яшм и углеродистых разностей кремнистых и кремнисто-глинистых пород, приуроченных к определенным стратиграфическим горизонтам. Они сформировались в узкие интервалы времени, поэтому являются маркирующими отложениями [1]. Нижняя часть формации сложена «глинисто-кремнистой» толщей [2]. Она обогащена прослоями углеродистых разностей пород. Интервал максимального развития таких прослоев выделен в качестве «фтанитовой» пачки [1]. Возраст «глинисто-кремнистой» толщи отвечает верхам нижнего триаса (оленок) — среднему триасу (средний анизий) [1]. Она перекрыта «кремневой» толщей, сложенной светло-серыми плитчатыми кремнями. В основании толщи присутствует горизонт яшм мощностью более 3 м. Уровень их появления — верхний анизий-ладинский ярус [1]. Вышележащие кремни относятся к карнию и норю. Обе толщи

легко узнаются в Таухинском и Самаркинском террейнах Сихотэ-Алиня по литологии и маркирующим горизонтам. Марганцево-силикатные породы вместе с яшмами и силикатно-магнетитовыми рудами слагают единую пачку или фашиально замещающие друг друга линзы и пласты в основании «кремневой» толщи. Триасовые метаморфизованные металлоносные осадки обогащены Au, Ag, Pt, Pd, содержат минералы этих элементов, самородные формы других металлов и интерметаллические соединения.

С метаморфизованными металлоносными осадками триасовой кремневой формации Сихотэ-Алиня пространственно ассоциируют крупные объемы вмещающих пород, рассеченных многочисленными минерализованными трещинами с аномально высоким содержанием благородных и других металлов и разнообразными минералами Au, Ag, Pt, Pd (условно, «штокверковые тела»). Целью данной работы являлось выяснение особенностей минералогии и генезиса благороднометалльной минерализации в марганцево-силикатных породах Малиновского (Самаркинский террейн), Ольгинского и Дальнегорского (Таухинский) рудных районов (рис. 1).

Методика исследований

Для оценки содержания благородных металлов в триасовых металлоносных осадках были использованы пробирный (П) (с атомно-абсорбционным окончанием), атомно-абсорбционный (АА) и масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой (ИСП МС) (с кислотным разложением проб и последующим восстановлением благородных металлов SnCl_2 и концентрированием на элементарном теллуре) методы, а также растворение проб в кислотах. Пробоподготовка для аналитических исследований проводилась по стандартной методике. Анализы П-методом выполнены в лаборатории анализа благородных металлов ДВГИ ДВО РАН, АА — в лабораториях аналитической химии и анализа благородных металлов ДВГИ ДВО РАН с использованием спектрометра АА-6800 (Shimadzu, Япония), ИСП МС — в лаборатории аналитической химии ДВГИ ДВО РАН на приборе ICP-MS 7500c (Agilent Technologies, Inc.) и ХИАЦ ИТИГ ДВО РАН (ICP-MS Elan DRC II Perkin Elmer, США). Всего изучено 288 штучных проб. Результаты АА-анализа частично были заверены путем измерения концентраций благородных металлов (в тех же растворах) рентгено-флюоресцентным методом в ИХ ДВГИ ДВО РАН. Полученные данные частично приведены в табл. 1–3.

Таблица 1

Содержание благородных металлов в марганцево-силикатных породах
Ольгинского рудного района

№ п/п	Проба	Au	Pd	Pt	Rh	№ п/п	Проба	Au	Pd	Pt	Rh
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Ф-04-2	0,007	0,006	0,113	–	18	Ф-80-10	0,103	0,000	0,151	0,00
2	Ф-04-3	0,003	0,015	0,142	–	19	Ш-80-183	26,329	0,010	0,097	2,78
3	Ф-04-1	0,005	0,000	0,125	–	20	Ф-04-16	0,189	0,000	8,386	0,00
4	Ш-86-41	0,004	0,000	0,31	–	21	Ф-04-3а	0,236	0,000	0,039	0,00
5	Ш-86-183	0,011	0,005	0,138	–	22	Ф-04-5	0,161	0,000	0,065	0,00
6	К-80-14	0,023	0,005	0,334	–	23	К-80-5/19	0,118	0,000	0,162	0,00
7	Р-80-8	(1,147)	–	0,087	–	24	К-80-13	0,482	0,000	0,673	0,00

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
8	К-80-11	0,000 (0,993)	0,068	0,022	–	25	Р-80-40	1,077	2,603	4,272	368,3
9	К-80-13	0,032 (1,547)	0,010	0,014	–	26	Ар-80-1	0,485	0,000	0,019	0,00
10	Р-80-18	(1,732)	–	–	–	27	Р-80-27	24,106	0,000	1,015	0,00
11	К-80-20	(2,932)	–	0,205	–	28	Ф-80-10а	0,143	0,027	0,045	0,13
12	Мт-81-11	0,131	0,000	0,000	0,00	29	Ф-80-5а	0,017	0,001	0,005	0,00
13	М-81-3	0,233	0,000	0,000	0,00	30	Ф-80-10в	0,134	0,002	0,013	1,20
14	М-81-17	3,839	0,017	0,275	0,00	31	Ш-86-96	0,076	0,022	0,003	0,00
15	Р-80-100	0,551	0,009	0,022	0,00	32	Ш-80-12	0,003	0,000	0,010	0,00
16	К-80-21	0,005	0,000	0,016	0,00	33	Ш-86-62	1,262	0,000	5,489	0,00
17	Мт-81-8	0,051	0,000	3,102	0,00	34	Ф-80-2	0,025	0,000	0,004	0,00

Примечание. Au, Pd, Pt указаны в граммах на тонну, Rh — в миллиграммах на тонну. Анализ выполнен методом ИСП МС: 1–11 — ДВГИ ДВО РАН; 12–34 — ХИАЦ ИТИГ, в скобках — АА-методом с экстракцией дибутилсульфидом (ДВГИ ДВО РАН).

Таблица 2

Содержание благородных металлов в марганцево-силикатных породах Малиновского рудного района, г/т

№ п/п	Проба	Au, I	Pd, I	Pt, I	Au, a	Au, п	№ п/п	Проба	Au, I	Pd, I	Pt, I	Au, a	Au, п
1	Эв-04-1	0,250	0,002	0,283	–	0,18	7	Эв-01-22	0,006	0,004	0,010	4,426	0,05
2	Эв-04-4	0,004	0,102	0,702	–	0,06	8	Эв-01-45	0,047	5,333	1,222	–	0,04
3	Эв-04-12	0,000	0,004	0,116	–	0,12	9	Эв-01-55	0,160	0,052	0,657	–	0,01
4	Эв-04-16	0,000	0,125	1,542	–	0,01	10	Эв-93-507	0,005	0,227	0,038	5,169	0,02
5	Эв-04-18	0,000	0,007	0,135	–	0,10	11	Эв-93-511	0,000	0,001	0,009	3,212	0,04
6	Эв-01-13	0,006	0,130	0,028	–	3,06	12	Эв-93-512	8,432	0,005	1,294	–	1,17

Примечание. I — ИСП МС (ДВГИ ДВО РАН); а — АА-метод с экстракцией дибутилсульфидом; п — П-метод.

Таблица 3

Серебро в марганцево-силикатных породах Широкопаднинской площади

Пробирный метод			Атомно-абсорбционный метод		
№ п/п	Проба	Содержание, г/т	№ п/п	Проба	Содержание, г/т
1	2	3	4	5	6
1	К-80-13	27,74	12	Ш-80-2	5,0
2	К-80-13	25,74	13	Ш-80-1	1,25
3	К-80-11	30,27	14	Р-80-4	5,0
4	К-80-11	30,1	15	Р-80-19	2,5
5	Ш-80-8	18,94	16	Р-80-41	2,5
6	Ш-80-8	22,74	17	Ш-80-8	8,75
7	К-80-20	13,18	18	Р-80-42	2,5

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5	6
8	К-80-20	9,82	19	К-80-21	52,5
9	Р-80-18	8,39	20	Ш-80-7	6,25
10	Р-80-18	5,67	21	К-80-1	7,5
11	Б-79-102	2,5	22	К-80-14	2,5

Примечание. Анализы выполнены в лабораториях анализа благородных металлов (П-методом) и аналитической химии (АА-методом) ДВГИ ДВО РАН.

Анализы минералов (в аншлифах и неполированных зернах) выполнены в ДВГИ ДВО РАН на рентгеноспектральных микроанализаторах JXA-5A и JXA8100 с тремя волновыми спектрометрами и энергодисперсионным спектрометром INCAx-sight (табл. 4–7) по методикам, принятым в этой организации. Присутствующие в анализах (табл. 5–7) примеси порообразующих элементов при расчете формул не принимались во внимание.

Таблица 4

Состав самородного золота из марганцево-силикатных пород
Широкопаднинской площади, мас. %

№ п/п	Проба	Зерно	Au	Ag	Сумма	Пробность золота	Цвет
1	Р-80-19	1	87,05	13,60	100,65	865	Желтый
2		2	88,90	12,30	101,20	878	То же
3	Р-80-41	1	71,94	27,40	99,34	724	«
4		2	67,90	29,99	97,89	694	«
5		3 (а)	99,62	0,00	99,62	1000	«
6		3(б)	80,14	19,03	99,17	808	«
7		4	70,35	29,56	99,91	704	«
8		5	67,51	32,91	100,42	672	«
9		6	98,77	1,31	100,08	987	«
10		7	62,84	36,89	99,73	630	«
11		8	88,37	11,79	100,16	882	«
12		9	87,41	12,22	99,63	877	«
13		10	76,50	23,45	99,95	765	«
14		11	80,72	18,31	99,03	815	«
15		12	88,00	11,95	99,95	880	«
16	13	54,21	46,83	101,08	536	Бледно-желтый (почти белый)	
17	Ф-04-5	1	94,68	5,32	100,00	947	Желтый
18		2	95,15	4,85	100,00	952	То же
19	Ш-86-41	1	85,42	14,58	100,00	854	«
20	К-80-13	1	94,08	5,92	100,00	941	«

Примечание. Зерна выделены растворением проб в кислотах. Состав определен на электронных микроанализаторах JXA-5A (1–16) и JXA8100 с тремя волновыми спектрометрами и энергодисперсионным спектрометром INCAx-sight (17–20) в ДВГИ ДВО РАН. Анализы 17–20, выполненные на неполированных зернах, нормированы на 100 % (аналитики: В. И. Сапин и А. А. Карабцов). По результатам анализа АА-методом, содержание Au в пробе Р-80-41 составляет 32,7–42,3 г/т.

Результаты изучения минералов благородных металлов
в марганцево-силикатных породах Садовой площади, мас. %

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
O	12,05	8,92	32,76	33,44	9,95	24,21	21,86	18,19	24,77	28,57	26,28
Mg	0,68	0,44	0,47	1,83	—	1,11	0,82	—	—	0,4	0,35
Al	0,31	—	0,98	0,42	0,90	1,24	1,06	—	—	—	—
Si	8,6	5,50	13,12	18,77	4,70	10,22	9,17	10,78	10,59	9,57	8,49
S	—	—	—	—	5,88	5,90	6,38	3,51	3,16	5,35	—
Ca	6,47	4,98	6,33	11,07	3,25	7,21	6,93	3,04	3,24	2,12	2,31
Mn	2,24	2,22	2,85	5,42	2,45	2,82	2,71	1,43	1,48	14,92	12,66
Fe	5,29	5,28	6,87	8,19	3,37	5,47	5,22	6,17	6,09	0,57	0,54
Cu	—	23,22	9,92	6,42	8,88	—	—	—	—	—	—
Zn	—	—	0,78	—	12,33	—	—	—	—	—	—
Se	—	—	—	—	—	1,96	2,46	10,84	9,89	—	—
Ag	6,02	4,64	1,76	1,11	4,25	39,85	43,40	46,03	41,67	0,97	—
Au	62,22	44,79	24,16	15,65	44,04	—	—	—	—	—	—
Pb	—	—	—	—	—	—	—	—	—	34,37	43,27
Сумма	103,89	99,99	100,00	102,32	100,00	99,99	100,01	99,99	101,40	99,47	94,68

Примечания: 1 — золото; 2–5 — «медистое золото» (5 — в сростании со сфалеритом); 6, 7 — сульфид серебра; 8, 9 — агвиларит; 10 — галенит; 11 — церуссит. Формулы: 1 — $Ag_{0,15}Au_{0,85}$; 2 — $Cu_{3,00}[(Cu_{0,45}Au_{0,14})Ag_{0,41}]_{1,00}Au_{2,00}$; 3 — $Cu_{3,00}[(Cu_{0,05}Zn_{0,24}Au_{0,40})Ag_{0,32}]_{1,00}Au_{2,00}$; 4 — $Cu_{3,00}[(Cu_{0,17}Au_{0,50})Ag_{0,33}]_{1,00}Au_{2,00}$; 5 — $Cu_{1,04}(Au_{1,66}Ag_{0,30})_{1,96}$; 6 — $Ag_{1,92}(S_{0,95}Se_{0,13})_{1,08}$; 7 — $Ag_{1,91}(S_{0,94}Se_{0,15})_{1,09}$; 8 — $Ag_{1,90}(S_{0,49}Se_{0,61})_{1,10}$; 9 — $Ag_{1,90}(S_{0,49}Se_{0,61})_{1,10}$; 10 — $(Pb_{0,97}Ag_{0,05})_{1,02}S_{0,98}$; 11 — $(Pb_{0,96}Rh_{0,04})_{1,00}CO_3$.

Состав определен на электронном микроанализаторе JXA8100 с тремя волновыми спектрометрами и энергодисперсионным спектрометром INCAx-sight в ДВГИ ДВО РАН. Кроме того, в анализах 9–11 содержание Na, Cr и Rh — 0,51, 2,64 и 0,78 мас. %.

Результаты исследований

Главными элементами марганцево-силикатных пород, выходы которых изучены на Горной (Самаркинский террейн), Широкопаднинской, Мокрушинской и Садовой (Таухинский террейн) площадях, являются Mn^{+2} и Si, в подчиненном количестве присутствуют Al, Ca, Mg, Fe, щелочи, Ti и P [3, 4]. По результатам изучения ИСП МС методом марганцево-силикатные породы обогащены Ba, REE, Ni, Co, Pb, Zn, Cu, As, Nb, Sb, Sn, Mo и др. Родонит — один из основных минералов марганцево-силикатных пород всех изученных площадей. Пироксмангит является обычным минералом на Горной площади (Малиновский рудный район) и относительно редко встречается на Широкопаднинской (Ольгинский рудный район) и Садовой (Дальнегорский рудный район) площадях. Бустамит, пироксен и манганаксинит характерны только для марганцево-силикатных пород Широкопаднинской площади.

Недосыщенные и бедные кремнием минералы — тефроит и манганпиромалит — не встречаются только в марганцево-силикатных породах Горной площади. Сульфид марганца — алабандин, обнаружен только на Садовой площади. Минералы глинозема представлены в основном спессартином, но на Горной площади, кроме того, распространены полевые шпаты и флогопит. Для марганцево-силикатных пород характерно присутствие V-содержащих разновидностей спессартина и пиррофанита, а также Ba-содержащих флогопита и полевых шпатов.

Таблица 6

Результаты изучения минералов благородных металлов в марганцево-силикатных породах Широкопадинской и Мокрушинской площадей, мас. %

№ п/п	Образец	O	Mg	Al	Si	S	Na	Ca	Mn	Fe	Cu	Co	Ni	As	Pd	Ag	Te	Pb	Au	Сумма
1	Ф-80-1	12,67	1,18	—	4,04	—	—	0,97	3,79	2,3	—	—	—	—	—	—	—	—	78,04	102,98
2		18,71	0,84	0,83	12,32	—	0,74	0,76	5,46	2,18	1,40	—	—	—	—	—	—	—	55,60	99,45
3	Ф-79-32	19,68	0,43	0,65	8,45	—	0,29	0,90	5,55	1,17	—	0,40	—	—	—	—	—	—	62,17	99,69
4		20,34	0,48	0,82	8,39	—	—	1,03	6,14	1,36	0,46	0,41	—	—	—	—	—	—	60,18	99,61
5	Р-80-60	—	0,32	—	—	—	—	—	1,86	—	—	—	—	—	—	96,22	0,74	—	—	99,13
6		5,72	0,37	—	1,39	12,17	—	—	2,43	0,47	—	—	—	—	—	80,6	—	—	—	103,14
7	Ф-80-1	7,67	—	—	1,03	8,59	—	—	1,49	4,92	—	—	—	—	—	72,69	—	—	—	99,40
8		2,76	—	—	0,32	18,15	—	—	2,77	2,37	—	19,88	12,48	40,52	—	1,22	—	—	—	100,47
9		19,38	0,48	—	11,92	—	—	2,25	16,26	2,02	—	—	—	—	—	1,12	18,55	30,93	—	102,91
10	Р-80-15	2,29	—	—	1,19	1,27	—	—	2,72	0,51	—	0,88	0,65	2,31	—	1,23	33,78	55,41	—	102,24
11		17,13	0,45	—	3,98	9,02	—	0,71	6,22	1,26	—	—	—	—	—	62,11	0,67	—	—	101,53
12		10,71	—	—	3,73	—	—	0,57	5,51	1,04	—	—	—	—	—	2,18	29,34	41,77	—	100,00
13	Ф-80-10	7,2	0,41	—	1,03	0,87	—	0,33	—	1,24	—	—	—	—	—	80,78	0,68	—	—	98,85
14		30,99	6,82	3,23	17,13	—	—	1,13	2,88	5,86	8,21	—	—	—	—	2,11	—	—	20,66	99,02
15	Ш-86-129	7,76	—	—	2,47	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	89,14	—	—	—	99,36
16		2,2	—	—	0,87	12,34	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,32	—	—	—	95,56
17		8,11	—	—	2,67	11,98	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8,66	—	—	—	103,00
18		16,92	—	—	7,45	—	—	0,76	7,25	0,77	—	—	—	—	4,43	3,81	—	—	57,97	102,60
19		15,38	—	0,58	1,24	—	0,79	2,28	8,64	1,13	0,64	—	—	—	2,78	5,88	—	—	60,69	100,03
20	М-86-27	25,00	—	—	—	—	—	—	8,67	—	—	—	—	—	—	—	—	—	85,60	98,75
21		2,44	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	101,69
22		8,05	—	1,48	—	10,95	—	—	3,02	—	—	—	—	—	—	79,1	—	—	—	102,60

Примечание. Состав определен на электронном микроанализаторе JXA8100 с тремя волновыми спектрометрами и энергодисперсионным спектрометром INCAx-sight в ДВГИ ДВО РАН. Площади — Широкопадинская (1–17) и Мокрушинская (18–22).

Золото — 1–4, 18–21; «медное золото» — 14; серебро — 5, 13, 15; сульфид Ag — 6, 11, 22; смесь сульфида и хлорида Ag — 7; кобальтин-герседорфит с включениями самородного серебра (?) — 8; галенит — 16 и 17 (с включениями самородного серебра (?)); аллит — 9, 10 (с включениями кобальтин-герседорфита) и 12.

Формулы: 1 — Au_{1,05}; 2 — Au_{0,95}Cu_{0,07}; 3 — Au_{0,96}Cu_{0,02}Co_{0,02}; 4 — Au_{0,96}Cu_{0,02}Co_{0,02}; 5 — Ag_{0,95}Te_{0,05}; 6 — Ag_{1,99}Si_{1,05}; 8 — (Co_{0,61}Ni_{0,38})As_{0,98}Si_{1,05}; 9 — (Pb_{0,98}Ag_{0,07})_{1,05}Te_{0,95}; 10 — (Pb_{0,98}Ag_{0,04})_{1,02}Te_{0,97}; 11 — Ag_{2,00}(S_{0,98}Te_{0,02}); 12 — (Pb_{0,83}Bi_{1,10}Ag_{0,08})_{1,03}Te_{0,96}; 13 — Ag_{0,98}Rh_{0,01}Te_{0,01}; 14 — Cu_{2,00}(Cu_{0,05}Au_{0,48}Ag_{0,47})_{1,00}Au_{2,00}; 15 — Ag_{1,05}; 16 — Pb_{0,99}S_{1,01}; 17 — Pb_{0,96}Si_{1,04}; 18 — Pb_{0,11}Ag_{0,10}Au_{0,79}; 19 — Cu_{0,03}Pd_{0,07}Ag_{0,13}Au_{0,77}; 20 — Au_{1,05}; 21 — Au_{0,88}Ag_{0,07}Pd_{0,05}Pb_{0,05}; 22 — Ag_{2,05}S_{0,95}.

Кроме того, ан. 1 и 7 содержат 0,61 и 3,00 мас. % Cl соответственно, ан. 4 — 0,50 мас. % K; ан. 12 — 5,15 мас. % Bi; ан. 13 — 0,53 Rh и 5,79 Cr мас. %.

Таблица 7

Результаты изучения минералов благородных металлов в марганцево-силикатных породах Горной площади, мас. %

№ п/п	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	Pd	Ag	Sb	Pb	Au	Pt	Сумма
1	37,72	—	0,37	36,50	—	—	—	—	7,23	—	—	2,82	—	—	15,37	—	100,01
2	32,61	—	—	30,57	—	—	—	—	10,27	—	—	4,31	—	—	22,24	—	100,00
3	36,49	2,31	1,93	29,17	—	—	0,91	1,20	8,55	—	—	1,67	—	—	16,87	—	99,99
4	12,38	0,44	—	6,22	—	0,26	10,53	0,39	20,72	—	—	4,65	0,29	—	44,96	—	100,85
5	11,35	0,36	—	6,03	—	0,41	10,5	—	19,9	—	—	5,26	—	—	46,09	—	99,89
6	6,55	0,25	—	4,16	—	0,46	10,09	0,89	—	—	1,17	—	—	—	—	79,63	103,21
7	4,95	—	—	2,57	—	0,31	8,11	0,9	—	—	1,56	—	—	—	—	83,34	102,48
8	15,01	—	—	8,74	0,65	0,32	13,08	0,52	—	—	—	—	—	—	—	61,86	100,18
9	26,44	—	—	23,74	—	0,31	0,60	—	—	—	8,02	—	—	—	—	40,89	100,00
10	36,26	—	—	34,08	—	—	0,55	—	—	—	4,84	—	—	—	—	23,36	99,99
11	36,69	—	—	33,96	—	—	0,44	—	—	—	4,95	—	—	—	—	23,96	100,00
12	9,25	—	—	3,36	—	—	0,73	—	—	—	17,5	1,89	—	—	—	58,19	97,33
13	6,36	—	—	3,54	—	—	0,8	—	—	—	14,85	—	—	—	—	69,29	94,84
14	22,71	—	—	17,52	—	—	1,89	—	—	—	7,08	—	—	—	—	47,92	97,13
15	13,03	—	—	7,66	—	—	2,05	—	—	—	10,13	—	—	—	—	62,26	95,13
16	21,25	0,28	—	11,49	7,23	—	5,6	—	—	—	—	53,32	—	—	—	—	99,17
17	27,05	—	1,56	20,37	11,83	—	5,45	2,28	15,33	3,13	—	3,99	9,68	—	—	—	100,94
18	20	—	0,89	18,76	14,92	—	0,65	1,85	16,54	3,55	—	6,49	15,18	—	—	—	98,82
19	1,55	0,39	—	1,16	—	—	1,16	—	5,16	1,28	—	92,89	—	—	—	—	103,6
20	3	0,33	—	1,12	—	—	0,82	—	4,47	—	—	92,42	—	—	—	—	104,84
21	37,12	—	—	16,4	6,26	—	0,32	0,4	—	—	—	2,12	—	—	—	—	101,91
22	46,82	—	0,21	25,75	4,37	—	—	0,46	—	—	—	18,59	—	—	—	—	105,34
23	10,48	—	—	4,53	—	—	—	—	—	—	—	80,73	—	—	—	—	99,18
24	16,26	—	—	11,1	17,02	0,39	17,83	1,89	30,6	—	—	0,55	—	—	—	—	98,88
25	19,31	—	—	11,17	9,19	—	4,87	—	—	—	—	55,04	—	—	—	—	100,17
26	31,07	—	0,28	20,42	9,16	—	—	—	—	—	—	29,29	9,61	—	—	—	99,60

Примечание. Состав определен на электронном микроанализаторе JXA8100 с тремя волновыми спектрометрами и энергодисперсионным спектрометром INCAx-sight в ДВГИ ДВО РАН.

«Медистое золото» — 1-5; платина — 6-15; пштинна — 6-15; сульфид Ag — 16, 25; тетраэдрит — 17, 18; серебро — 19, 20, 23; англезит — 21; сульфат Pb и Ag(?) — 22; ковеллин — 24; иридарит — 26.

Формулы: 1 — $Cu_3[Cu_{0,13}(Au_{0,15}Ag_{0,72})]Au_5$; 2 — $Cu_3[Cu_{0,08}(Au_{0,15}Ag_{0,76})]Au_5$; 3 — $Cu_3[Cu_{0,27}(Au_{0,29}Ag_{0,43}Pb_{0,01})]Au_5$; 5 — $Cu_3[Cu_{0,15}(Au_{0,36}Ag_{0,49})]Au_5$; 6 — $Pt_{0,97}Pd_{0,03}$; 7 — $Pt_{0,95}Pd_{0,05}$; 8 — $Pt_{0,06}Pt_{0,03}Sb_{0,02}$; 9 — $Pt_{0,74}Pd_{0,26}$; 10 — $Pt_{0,70}Pd_{0,30}Bi_{0,03}$ или $(Pt_{2,83}Bi_{0,10}Zn_{0,93}Pd)$; 11 — $Pd_{0,97}Pt_{0,03}$ или $Pt_{2,90}Pd_{1,10}$; 12 — $Ag_{0,04}Bi_{0,06}Pd_{0,32}Pt_{0,58}$ или $(Pt_{1,75}Bi_{0,13}Ag_{0,10}Zn_{0,03}Pd_{0,97})$; 13 — $Pd_{0,28}Pt_{0,72}$ или $Pt_{2,32}Pd_{1,13}$; 14 — $Pt_{0,79}Pd_{0,21}$; 15 — $Pt_{0,77}Pd_{0,23}$; 16 — $Ag_{2,06}Sb_{0,04}$; 17 — $(Cu_{17,29}Ag_{2,65}Fe_{3,94}Zn_{3,43})Sb_{5,69}S_{26,45}$; 18 — $(Cu_{1,56}Ag_{3,6}Fe_{1,99}Zn_{2,25})Sb_{7,49}S_{27,97}$; 19 — $Ag_{0,90}Cu_{0,08}Zn_{0,02}$; 20 — $Ag_{0,90}Cu_{0,07}Rh_{0,02}Te_{0,01}$; 21 — $0,95PbSO_4 \cdot 0,05Ag_2SO_4$; 22 — $0,34PbSO_4 \cdot 0,66Ag_2SO_4$; 23 — $Ag_{0,96}Ni_{0,04}$; 24 — $(Cu_{0,90}Ni_{0,10}Ag_{0,01})_{0,01}Sb_{0,99}$; 25 — $Ag_{1,91}(S_{1,07}Te_{0,02})_{0,06}S_{26}$ — $Ag_{3,00}Sb_{0,86}S_{31,4}$.

Номера образцов: 1, 2, 16 — Эв-01-24; 3, 17, 18 — Эв-01-5; 4-7, 19, 20 — Эв-93-206; 8-13, 23-26 — Эв-93-210; 14 и 15 — Эв-93-213; 21, 22 — Эв-01-31.

Кроме того, ан. 3 и 17 содержат 0,89 и 0,26 мас. % Si соответственно, ан. 7 — 0,74 Sn, ан. 10, 12 — 0,90 и 6,41 Bi, ан. 20 — 0,43 Cl, 1,51 Rh и 0,74 Te; ан. 23, 24 — 1,76 и 3,23 Ni; ан. 25 — 0,59 Te.

На Горной площади широко распространен гиалофан, на Широкопаднинской изредка встречается цельзиан. Флогопит Широкопаднинской площади отличается высоким содержанием бария [5] и отсутствием никеля, а во флогопите Горной площади присутствуют оба элемента, в виде изоморфной примеси (0,1 % массы). Распространены также марганцовистые амфиболы тремолит-ферроактинолитового и куммингтонит-грюнеритового рядов (Широкопаднинская и Мокрушинская площади Ольгинского рудного района, Горная площадь Малиновского рудного района), марганцовистый хлорит, манганаксинит и тинценит (Широкопаднинская площадь), а также родохрозит (Широкопаднинская и Горная площади).

Марганцево-силикатные породы образовались в результате нескольких последовательных событий [4]:

1) накопление обогащенных благородными и другими металлами, гидроокислами Mn и органическим веществом кремнистых и глинисто-кремнистых илов (поздний анизий);

2) диагенез восстановительного типа, обусловившего преобразование металлоносных осадков в кремнисто-родохрозитовые породы;

3) контактовый метаморфизм (мел-палеоген) с участием метаморфогенной флюидной фазы, при котором в результате реакций между кремнистым, глинистым и карбонатным веществом образовались породы, сложенные в основном силикатами и алюмосиликатами Mn⁺² [3].

Триасовые метаморфизованные металлоносные осадки обогащены благородными металлами. Всеми использованными методами (см. выше) были выявлены высокие содержания (до десятков граммов на тонну) в отдельных пробах, однако результаты пробирного анализа оказались в противоречии с данными ИСП МС и атомно-абсорбционного методов, растворения проб в кислоте и микронзондовых исследований аншлифов. Платина и палладий были почти полностью потеряны (в нескольких пробах определены десятые доли граммов на тонну, а в остальных сотые и тысячные доли). Золото утеряно в меньшей мере: примерно в 25 % проб установлены десятые доли грамма на тонну и лишь в нескольких пробах — первые граммы.

Сравнение результатов анализов, выполненных разными методами, позволило более или менее достоверно оценить уровень содержания благородных металлов. В породах Малиновского рудного района содержится, г/т: Au — до 8,43, Pt — 1,54 и Pd — 5,33, Дальнегорского района — до 2,48, 11,27 и 2,12 соответственно. Породы Ольгинского района содержат, г/т: Au — до 35,38, Pt — 8,39, Rh — 0,37, Pd — 2,60 и Ag — 52,5. Полученные данные приведены в табл. 1–3.

В результате растворения проб в кислотах и изучения аншлифов под микроскопом и на микроанализаторе установлено широкое распространение разнообразных минералов благородных металлов в марганцево-силикатных породах всех изученных площадей. Наиболее распространены минералы Au, Ag, Pt и Pd. Для пород *Широкопаднинской площади* наиболее характерны минералы Au и Ag. Широко распространено *самородное* Au, относящееся к нескольким разновидностям. Относительно крупное самородное Au (рис. 2), выделенное растворением проб в кислотах, представлено исключительно твердым раствором Au и Ag или (в редких случаях) оно совсем не содержит примесей других элементов. Твердый раствор Au и Ag большей частью имеет высокую пробу (см. табл. 4). Зерна крупного Au из одной и той же пробы различаются по содержанию Ag, иногда значительно.

При растворении проб марганцево-силикатных пород в кислотах наряду с зернами крупного Au изредка встречаются зерна богатой Au разновидности самородного Ag состава Ag_{0,61}Au_{0,43}. Мелкое самородное Au (десятые доли микрона — микроны), наблюдаемое только под микроскопом, не содержит Ag и представлено твердыми растворами Au и Cu, Au и Co, а также Au, Co и Cu (см. табл. 6). Мелкое Au нередко совсем не содержит примесей.

Медьсодержащее самородное Au в виде рассеянных зерен размером около 1×2 мкм обнаружено в образцах, содержащих шеелит, сфалерит, галенит, халькопирит, блеклую руду, молибденит, брейгауптит, миллерит, твердые растворы кобальтин-гесдорфитового ряда, уранинит и другие минералы. Зерна этого минерала нередко приурочены к микротрещинам в породе, выполненным органическим веществом или марганцевыми охрами экзогенного происхождения. Медьсодержащее самородное Au характеризуется невысоким содержанием Cu. Формульный коэффициент этого элемента изменяется от 0,02 до 0,07. Кобальтсодержащее самородное Au встречается редко, совместно с медьсодержащим Au. Формульный коэффициент Co в этой разновидности составляет всего лишь около 0,02. Кобальт- и медьсодержащее самородное Au тоже очень бедно примесями, его состав отвечает формуле $Au_{0,96}Cu_{0,02}Co_{0,02}$. Золото, не содержащее примеси других элементов, обнаружено совместно с галенитом, халькопиритом, шеелитом, вольфрамитом, магнетитом, блеклой рудой (не содержащей Ag), молибденитом и другими минералами, однако сростаний с ними не образует. Для образцов, содержащих такую разновидность самородного Au, характерно присутствие большого количества зерен сульфида Ag размером до 10×20 мкм.

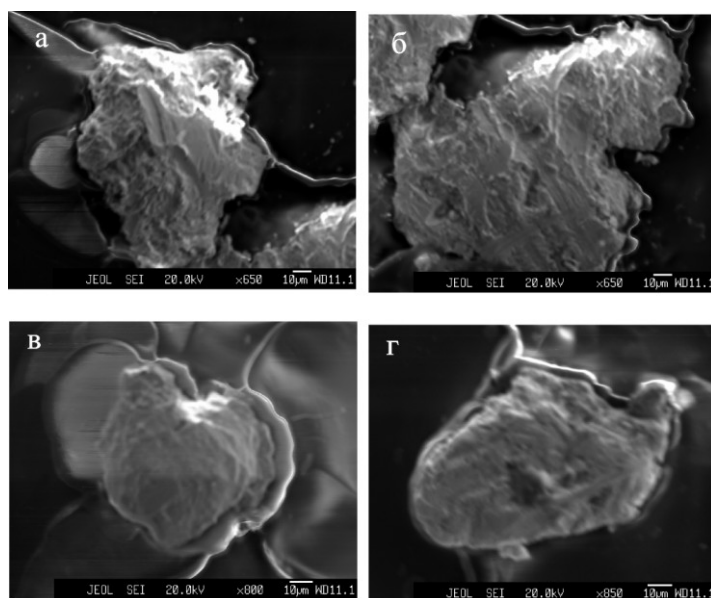


Рис. 2. Частицы самородного золота (на углеродистой пленке), выделенные растворением проб марганцево-силикатных пород в плавиковой кислоте. BSE-изображение. Образцы: Ф-05-5 (а, б), Ш-86-41 (в) и К-80-13 (г)

Кроме самородного Au в марганцево-силикатных породах Широкопаднинской площади встречается так называемое «медистое золото». Непрерывный твердый раствор золота и меди с неограниченной смесимостью, как следует из диаграммы фазового состояния, с понижением температуры распадается на несколько твердых растворов с ограниченной смесимостью. К ним относятся твердые растворы с небольшими количествами золота в меди и меди в золоте, а также несколько (с учетом полиморфных модификаций) фаз, состав которых в точках температурных максимумов отвечает формулам $CuAu$ и Cu_3Au . Природные аналоги таких фаз упоминаются в геологической литературе под общим названием «медистое золото» или, в зависимости от состава, под собственными названиями — аурикуприд, купроаурид, тетрааурикуприд и другими. Ниже температурных максимумов вследствие разупорядочения структур этих минералов характерны значительные вариации составов, что вызывает трудности в диагностике

и пересчетах анализов на идеальные формулы. Вариации состава «медистого золота» в триасовых метаморфизованных металлоносных осадках Сихотэ-Алиня и «штокверкоподобных телах» отвечают, за редким исключением, условно выделяемому здесь для удобства пересчета анализов изоморфному ряду $\text{CuAu-Cu}_2\text{Au}$, или, в более удобной форме, $\text{Cu}_3(\text{Cu,Au})\text{Au}_2$. На Широкопаднинской площади «медистое золото» встречается в образцах марганцево-силикатных пород, содержащих арсенопирит, галенит, сфалерит, станнин, касситерит и вольфрамит. Кроме того, присутствуют самородное Ag, цинкит, крокоит, самородные Zn и Ni, промежуточные члены никелин-брейтгауптитового ряда, ураноторит и многие другие минералы. «Медистое золото» образует мелкие (1×2 мкм) кристаллы. Этот минерал всегда содержит небольшое количество Ag (см. табл. 6). Он представлен разновидностью, близкой по составу к купроауриду. Рассмотренные выше разновидности самородного Au и «медистого золота» нередко встречаются совместно.

Основное количество Ag в марганцево-силикатных породах Широкопаднинской площади присутствует в самородном состоянии и в виде сульфида этого металла. Самородное Ag встречается в виде отдельных зерен диаметром до 15 мкм или их скоплений. Иногда этот минерал образует эмульсионную вкрапленность в родоните и пиросмалите. Нередко самородное Ag содержит незначительную примесь Te (см. табл. 6) или мельчайшие включения халькопирита. Сульфид Ag встречается в образцах совместно с арсенопиритом, станнином, самородными Ag, Pb и Zn, сфалеритом, касситеритом, кобальтином, герсдорфитом и промежуточными членами кобальтин-герсдорфитового ряда, никелином, ульманитом, алтаитом и другими минералами. Сульфид Ag присутствует как в виде отдельных зерен диаметром до 20 мкм, так и в виде скоплений таких зерен, рассеянных в родоните и в других минералах марганцево-силикатных пород или приуроченных к гнездам и прожилкам с углеродистым веществом. Иногда сульфид Ag образует включения в магнетите и халькопирите, а также встречается в виде сростаний со сфалеритом или хлораргиритом. Сульфид Ag, как правило, содержит небольшое количество Te (см. табл. 6). В некоторых анализах присутствует Cl, иногда в значительном количестве. Такие анализы, по-видимому, относятся к тонкой механической смеси сульфида и хлорида Ag. Встречаются также зерна, представляющие собой тонкую смесь сульфида Ag и хлорида двухвалентной меди. Иногда в анализах таких зерен фиксируется небольшое количество Hg. Довольно часто в марганцево-силикатных породах Широкопаднинской площади встречается Ag-содержащий алтаит (см. табл. 6). Совместно с ним в образцах присутствуют пирротин, халькопирит, сфалерит, шеелит, кобальтин, промежуточные члены кобальтин-герсдорфитового ряда, ульманит, твердые растворы мелонит-брейтгауптитового состава, сульфид Ag, никелин и другие минералы. В некоторых зернах алтаита отмечается небольшое количество Co, Ni, As и S, связанное с присутствием мельчайших включений твердого раствора кобальтин-герсдорфитового ряда. Наряду с Ag этот минерал иногда содержит Bi. Галенит, в анализах которого отмечается Ag (см. табл. 6), встречается довольно часто. Совместно с ним присутствуют самородное Ag, цинкит, арсенопирит, станнин, касситерит, самородные Zn и Ni и многие другие минералы. Галенит отличается слишком высоким для этого минерала содержанием Ag, связанным, очевидно, с присутствием мельчайших включений самородного Ag или сульфида этого металла.

Особенностью марганцево-силикатных пород *Мокрушинской площади* является присутствие многочисленных зерен самородного Au, имеющих размерность от коллоидно-дисперсной до 10–25 мкм в диаметре (рис. 3). Большинство мелких (диаметром до нескольких микрометров) зерен представлено палладистой разновидностью (порпецитом), содержащей

небольшое количество Ag (см. табл. 6). Нередко в анализах порпечита фиксируется Pb или Cu. Зерна более крупного Au представлены разновидностью, не содержащей примеси других элементов. Самородное Au частично присутствует в виде относительно редких включений в минералах, слагающих марганцево-силикатную породу, в частности, в гранате и родоните. Однако основное количество его зерен сосредоточено в прожилковидных зонках, выполненных охрами Mn и Fe экзогенной природы, и, кроме того, в участках сплошного экзогенного изменения породы. Такие участки, состоящие из пиролюзита и других оксидов марганца, при наблюдении на рентгеноспектральном микроанализаторе в режиме «COMP» имеют сложную волнисто-полосчатую текстуру и нередко содержат зерна порпечита, избирательно приуроченные к тем или иным полоскам. Отдельные полоски насыщены мельчайшими включениями этого минерала. Из других минералов благородных металлов в марганцево-силикатных породах встречаются мелкие (диаметром до 25 мкм) зерна сульфида Ag. Наряду с минералами благородных металлов, в образцах присутствуют ураноторит, пирротин, пирит, сфалерит, станнин, галит, кобальтин, паракостибит или костибит CoSbS , паркерит, самородная сурьма и др.

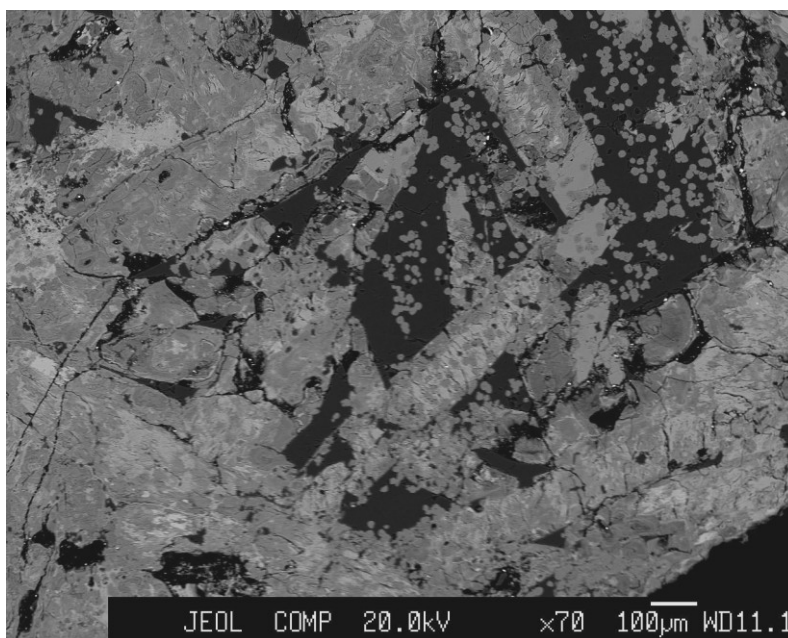


Рис. 3. Частицы палладистого золота (белые, большей частью округлые выделения и точки, приуроченные преимущественно к прожилковидным участкам черного цвета, выполненным охрами марганца и железа) в марганцево-силикатных породах Мокрушинской площади. Крупные кристаллы и участки черного цвета — кварц, мелкие округлые выделения серого цвета — спессартин, остальное — в разной степени измененный гипергенными процессами родонит. Обр. М-86-27. BSE-изображение

Характерными минералами благородных металлов в марганцево-силикатных породах *Садовой площади* являются разнообразные соединения Au и Ag. Минералы Au представлены многочисленными мелкими зернами самородного (диаметром до 2 мкм) и «медистого» золота (размером до 2—7 мкм) (рис. 4). Совместно с ними присутствуют пирит, сфалерит, касситерит, уранинит, квенселит, сульфат свинца с небольшим количеством Ag, сульфид Ag и агвиларит. Широко представлены арсениды и сульфоарсениды Ni и Co (кобальтин, кобальтин-герсдорфит, герсдорфит, зигенит, никелин), самородные элементы (Bi с небольшим количеством Pb; W) и

твердые растворы Cu, Zn и Ni. Кроме того, встречаются разнообразные минералы экзогенного происхождения, такие как вульфенит, арсенат-ванадат свинца $Pb_4[(P,As,V)O_4]_2(SO_4,Cl_2)$, коронадит, миметизит и миметизит-ванадинит(?) $Pb_5(TeO_4,AsO_4,VO_4)_3Cl$. «Медистое золото» иногда встречается в виде мелких включений в сфалерите, самородное представлено твердым раствором Au и Ag (см. рис. 4, табл. 5).

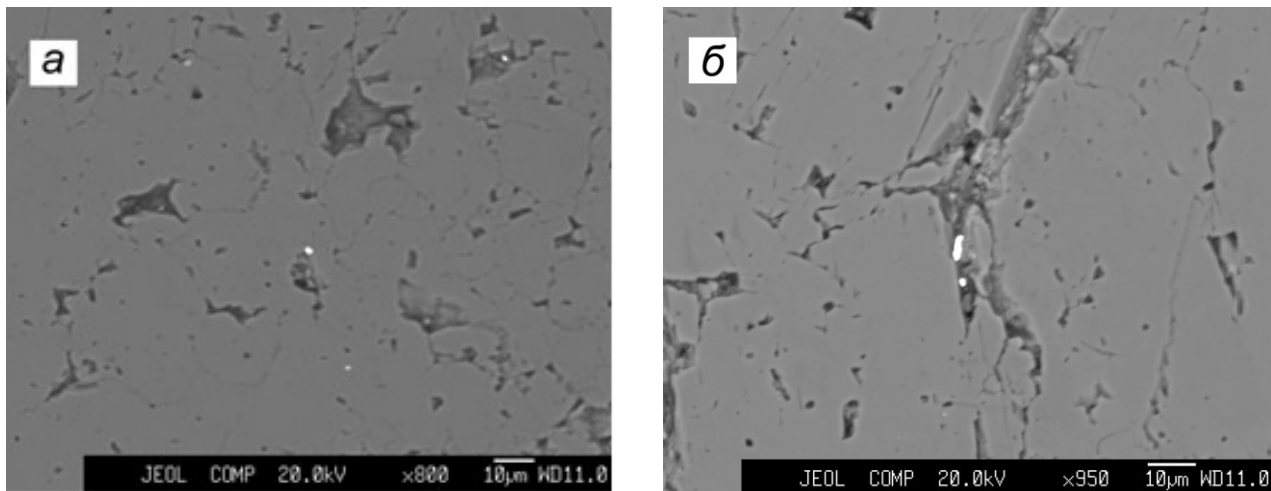


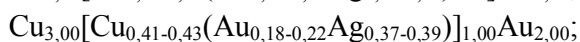
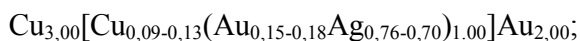
Рис. 4. Самородное золото $Au_{0,85}Ag_{0,15}$ (а — яркое в центре и в правом верхнем углу) и «медистое золото» $(Cu_{1,72}Ag_{0,29})_{1,92}Au_{1,07}$ (б — яркое в центре и ниже) в марганцево-силикатных породах Дальнегорского района. Серое поле соответствует родониту. Обр. Сд-06-1(2). BSE-изображение

«Медистое золото» представлено двумя минералами. Один из них относится к условному изоморфному ряду $Cu_3[Cu,(Au,Ag)]Au_2$ и содержит Ag от 0,33 до 0,41 ф. е. (см. табл. 5). Кроме того, в нем иногда присутствует немного Zn. Второй минерал встречается реже первого и является соединением с идеальной формулой $CuAu_2$.

Минералы Ag представлены самородным Ag, сульфидом Ag и агвиларитом. Кроме того, присутствует англезит с небольшим количеством Ag. Все перечисленные минералы встречаются вместе в аншлифах, содержащих самородное и «медистое» золото. В аргентите присутствует Se (см. табл. 5). Агвиларит встречается в виде редких рассеянных кристаллов размером около 1×2 мкм. В рассчитанных формулах этого минерала Se в количественном отношении преобладает над S.

В марганцево-силикатных породах *Горной площади* распространены как собственные минералы Au, Ag, Pt и Pd, так и минералы, содержащие эти элементы в качестве изоморфной примеси. Минералы Au представлены исключительно «медистым золотом». Оно присутствует в виде рассеянных зерен и кристаллов размером до 4×2 мкм. Совместно с ним в образцах марганцево-силикатных пород обнаружены арсенопирит, сфалерит, шеелит, гюбнерит, касситерит и молибденит. Обычными минералами являются киноварь, бурнонит, антимонит. Кроме того, для образцов с «медистым золотом» характерны уранинит и ураноторит, сульфид серебра и серебрясодержащий тетраэдрит. Распространены арсенид марганца MnAs, минералы группы гаухекорнита (тучекит, гаухекорнит и их мышьяковистый аналог), $Ni_4(Sb,As)S_2$, орселит, самородные Ag, Pt, Fe, Zn, Sb, Ni, W и Bi, а также миллерит и маухерит. Часто встречаются также хизлевудит, герсдорфит, кобальтин-герсдорфит, кобальтин, брейтгауптит, интерметаллические соединения Cu_2Zn и Cu_5Zn_3 , твердые растворы Cu и Zn или Ni, Ag и Bi.

Встречаются также минералы экзогенного происхождения — добреит, окись свинца и англезит. «Медистое золото» содержит немного Ag (см. табл. 7), в редких случаях — изоморфную примесь Pb. Вариации состава отвечают формулам:



Последние две формулы отражают пределы изменения состава «медистого золота» в одном аншлифе.

Минералы Pt и Pd можно обнаружить почти в каждом аншлифе. Они встречаются в виде кристаллов или зерен неправильной формы, иногда вместе с зернами и кристаллами «медистого золота» и сопутствующих ему рудных минералов, бреггеритом, пиритом, пирротинном, пираргиритом, зигенитом, (Cu,Ni)S, Cu_3Sn_2 , Cu_3Zn_2 , фосфидом Ni_{11}P_2 , а также каломелью и пироморфитом экзогенного происхождения. Зерна и кристаллы минералов Pt и Pd в несколько раз по размерам превосходят зерна и кристаллы «медистого золота». Из минералов Pt и Pd встречается главным образом самородная платина. Она представлена твердыми растворами Pt и Pd с размером зерен до 2×6 мкм (рис. 5, а), Pt, Pd и Sn (рис. 5, б), Pt, Pd и Bi, а также Pt, Pd, Bi и Ag (см. табл. 7). Твердый раствор Pt, Pd и Sn иногда образует довольно крупные обособления сложной формы вдоль границ зерен родонита и апатита (см. рис. 5, б). Реже отмечается самородная платина, не содержащая примеси других элементов, за исключением, возможно, железа в количестве до первых процентов (мас.). Встречается палладистая платина с низким и высоким содержанием палладия (см. табл. 7). Платина с низким содержанием палладия иногда содержит незначительную примесь олова. Платина с высоким содержанием палладия (или, возможно, интерметаллическое соединение типа Pt_3Pd) отмечается довольно часто. Иногда в ее составе присутствует висмут. Твердый раствор сложного состава или, возможно, интерметаллическое (?) соединение типа Pt_2Pd содержит, наряду с Pt и Pd, также Bi и Ag.

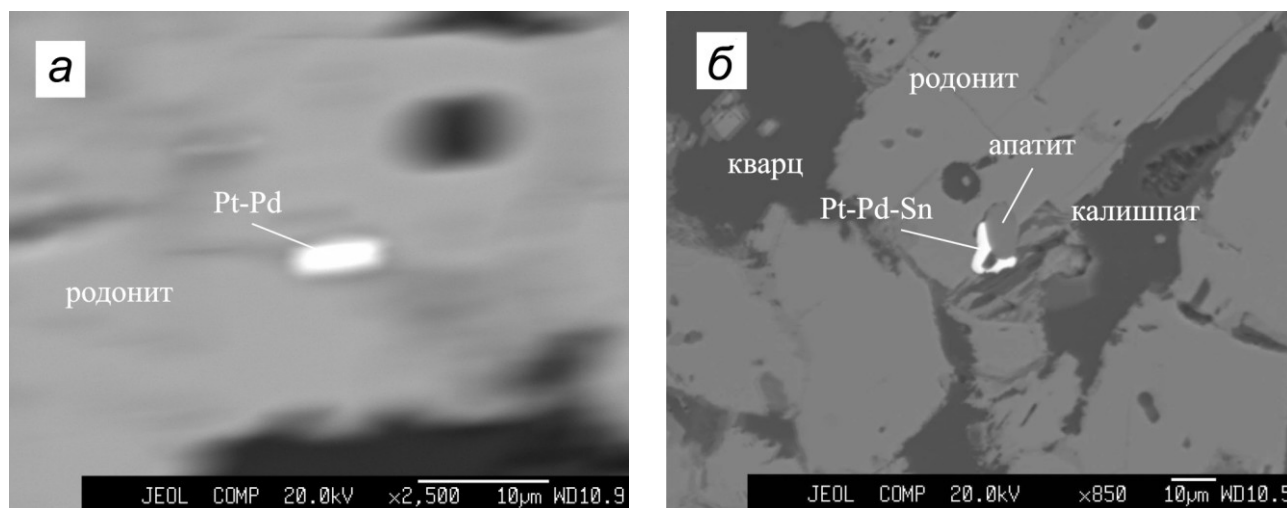
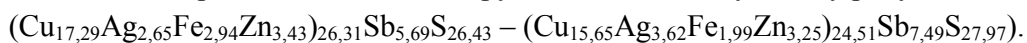


Рис. 5. Палладистая платина (а) и твердый раствор Pt, Pd и Sn (б) в марганцево-силикатной породе Малиновского рудного района. BSE-изображение. Обр. ЭВ-93-210 (а) и ЭВ-93-206 (б)

Из минералов Ag наиболее часто встречаются самородное серебро и сульфид серебра в виде рассеянных в породе, нередко относительно крупных (до 10×10 мкм) зерен или их скоплений. Несколько реже попадаются микроскопические зерна Ag-содержащей блеклой руды

и пираргирита. Присутствие Ag установлено в анализе никельсодержащего ковеллина (см. табл. 7). Самородное серебро и сульфид серебра постоянно присутствуют в образцах, содержащих «медистое золото» и самородную платину. Кроме того, эти минералы отмечались совместно с галенитом, киноварью, самородным свинцом, цумоитом, никелином, Cu_4Zn_3 , Sn_6Pb , SnPb_3 , Cu_4Sn , уранинитом, а также окисью свинца, крокоитом, ледгиллитом и другими минералами экзогенного происхождения. Самородное серебро иногда образует включения в сфалерите. В некоторых случаях в его составе отмечается существенная примесь меди, небольшое количество цинка или никеля. В сульфиде серебра иногда присутствует примесь теллура. Блеклая руда встречается в образцах, содержащих сфалерит, арсенипирит, касситерит, шеелит, киноварь, бурнонит, антимонит, самородные сурьму, вольфрам, цинк, никель, а также Cu_2Zn , «медистое золото», самородное серебро и сульфид серебра. Она представлена не содержащим мышьяк тетраэдритом (см. табл. 7). Количество цинка и железа невелико, причем первый обычно преобладает над вторым. Состав блеклой руды отвечает следующему ряду:



Пираргирит встречается редко в виде зерен микроскопических размеров вместе с пирротинном, сфалеритом, халькопиритом, пиритом, минералами группы гаухекорнита и коронадитом экзогенного происхождения. В образцах с пираргиритом присутствуют также самородное серебро, сульфид серебра, самородные платина и никель, а также уранинит, брэггит, миллерит, герсдорфит, маухерит, хизлевудит, $(\text{Cu},\text{Ni})\text{S}$ и добреит экзогенного происхождения. Кроме того, широко представлены интерметаллические соединения Cu_3Sn_2 , CuSn_2 и Cu_3Zn_2 .

Обсуждение результатов

Рудные минералы, в том числе и минералы благородных металлов, присутствующие в метаморфизованных триасовых металлоносных осадках (табл. 8), по особенностям состава, характеру взаимоотношений с породообразующими минералами и, соответственно, генетическому признаку можно разделить на две группы. К первой группе относятся минералы благородных металлов и других элементов, образующие рассеянные включения в породообразующих минералах и сростания с ними без признаков реакционного взаимодействия. Они слагают относительно крупные зерна (до 0,5 мм) и образовались в процессе метаморфизма за счет вещества триасовых металлоносных осадков. Эти минералы представлены в основном самородными золотом и платиной без примесей, палладистой платиной или интерметаллидами Pt, Pd, Bi и Ag, Au-Ag твердым раствором, самородным серебром, сульфидом серебра и блеклой рудой.

Ко второй группе относятся, главным образом, Cu-, Pb-, и Co-содержащее золото, «медистое золото», Cu-, и Zn-содержащее Ag. Эти минералы, так же как и самородные формы других элементов и интерметаллиды, встречаются в виде мельчайших (доли микрометров — первые микрометры, редко первые десятки микрометров) частиц или их скоплений, иногда в ассоциации с органическим веществом. Они присутствуют в основном в минерализованных микротрещинах и прилегающих участках пород. Наряду с самородными формами и твердыми растворами многих других металлов, они формировались при метаморфизме в особых высоко-, и ультравосстановительных условиях. В марганцево-силикатных породах, как следует из приведенного выше материала, кроме минералов рассмотренных групп, встречаются минералы благородных металлов экзогенного происхождения.

Таблица 8

Минералы и минеральные фазы редких и благородных элементов в марганцево-силикатных породах Сихотэ-Алиня

Широкоплатинская площадь		Мокрушинская площадь		Садовая площадь		Горная площадь		
1	2	3	4	5	7	8	9	
монацит (н)	тетраэдрит (н)	Co ₃ Cr (н)	монацит (в)	(Ce,La,Nd,Pr) ₂ O ₃ (н)	Cu(Sn,Pb) (н)	монацит (в)	бравонт (в)	медь (н)
торианит (н)	буланжерит (н)	хромиды Fe (н)	торианит (н)	(Ce,La)O(OH) (н)	Cu ₃ Sn (н)	бадделит (н)	орселит (н)	цинк (н)
уранинит (с)	джермсонит (н)	хромиды Fe и Ni (н)	ураногорит (н)	бастнезит (н)	(Cu,Ni) ₃ Sn (н)	(Ce,La,Nd,Pr) ₂ O ₃ (н)	Ni ₄ (Sb,As) ₂ S ₂ (н)	свинец (н)
ураногорит (н)	леллинит (н)	Cu-Sn-Pb* (в)	вольфрамит (с)	CeZrO ₄ (н)	Cu ₄ (Sn,Hg) (р)	(La,Ce...)O(OH,F) (н)	пумоит (с)	графит (н)
алланит (в)	арсенопирит (в)	Ni-Cu-Zn* (в)	кобальтин (в)	бадделит (н)	Cu ₅ Sn (н)	бастнезит (н)	бретгерит (н)	Co-W (н)
касситерит (в)	Cu ₃ S ₂ (н)	Pb-Bi (н)	паркерит (н)	уранинит (н)	Pb-Sn (с)	уранинит (с)	зипенит (н)	Cu-Sn* (в)
молибденит (с)	сфалерит (в)	Pb-Bi (н)	арсенопирит (с)	вольфрамит (н)	(Cu,Ni) ₃ Zn ₅ (н)	ураногорит (н)	Ni ₁₁ P ₂ (н)	Pb-Sn* (в)
кобальтин-герсдорфит (в)	галенит (в)	Bi ₂ (Pb,Sn,Cd) ₃ (н)	станнин (н)	касситерит (с)	маухерит (с)	торианит (н)	антимонит (н)	Cu-Zn* (в)
ульманит (с)	цинкит (н)	золото (без примесей) (в)	сфалерит (в)	вульфенит (н)	Аu-Ag (в)	алланит (н)	тетраэдрит (н)	Cu-Ni-Zn* (в)
коринт (н)	крокоит (н)	Ag-Au (в)	монганит (н)	кобальтин-герсдорфит (в)	«медистое золото» (в)	шеелит (с)	бурнонит (н)	(Cu,Zn) ₁₋₂ Al ₃ (н)
(Co,Ni)(As,Sb)S (в)	фосфиды Fe (с)	Cu-Au (н)	сурьма (н)	пентландит (в)	Серебро (в)	вольфрамит (с)	арсенопирит (с)	PbBi (н)
пентландит (н)	(La,Ce,Nd)Si ₂ (н)	Co-Au (н)	медь (н)	поллимит (с)	сульфид Ag (в)	тунгстенит (н)	сфалерит (в)	Ni-Bi (н)
никелин (в)	вольфрамит (с)	Cu-Co-Au (н)	вольфрамит (н)	никелин (в)	агвиларит (с)	касситерит (н)	галенит (в)	маухерит (с)
миллерит (в)	молибден (н)	«медистое золото» (в)	золото (без примесей) (в)	миллерит (в)	-	молибденит (в)	книоварь (н)	MnAs (н)
Ni ₂ (Te,Sb,As) ₂ (н)	олово (с)	Серебро (в)	порпелит (в)	зипенит (в)	-	кобальтин-герсдорфит (в)	(Cu,Ni)S (н)	«медистое золото» (в)
брейгауптит (с)	никель (с)	Te-содержащее Ag (н)	сульфид Ag (в)	цумоит (н)	-	группа гаухекорнита (в)	Ni ₁₁ P ₂ (н)	Pt (с)
мелонит-брейгауптит (н)	железо (с)	Rh- и Te-содержащее Ag (н)	-	тетраэдрит (н)	-	хивлевудит (н)	ZnSi ₂ (?) (н)	Pd-Pt (в)

Окончание таблицы 8

1	2	3	4	5	7	8	9	
$Ni_3(Te, Sb, As)_4$ (н) алтаит (с)	медь (н) цинк (н)	хлорид Ag (н) Ag-содержащий алтаит (н)	- -	вольфрам (н) висмут (н)	- -	миллерит (с) $Ni_4(S, As)_3$ (н)	вольфрам (н) олово (н)	Sp-Pd-Pt (н) Pd-Bi-Pt (с)
цумоит (с)	свинец (с)	Ag-содержащий галенит (с)	-	медь (н)	-	паркерит (с)	никель (н)	Pd-Bi-Ag-Pt (с)
висмутин (н) ангимоит (н)	селен (н) графит (с)	- -	- -	свинец (н) Co-W (н)	- -	Ni_4AsS_4 (н) Ni_4As_3 (н) брейтваунит (с)	железо (н) висмут (н) сурьма (н)	серебро (в) сульфид Ag (в) Ag-тетраэдрит (н)
-	-	-	-	-	-	-	-	пираргирит (н)

Примечание. Частота встречаемости: в — высокая; с — средняя; н — низкая.

* Неупорядоченные твердые растворы и интерметаллические соединения.

Ассоциации минеральных форм многих предельно восстановленных металлов, образовавшиеся в особых высоко-, и ультравосстановительных условиях, являются характерной особенностью черносланцевых формаций и ассоциированных с ними разнообразных месторождений. Например, на крупнейшем золоторудном с платиноидами месторождении Сухой Лог в самородном состоянии присутствуют Au, Ag, Pt, Fe, Sn, Pb, Cu, Ti, W, Cr и Al. Кроме того, распространены неупорядоченные твердые растворы металлов и интерметаллические соединения [6]. Разнообразные металлы в самородном состоянии, в том числе Au, Cu и Al, выявлены в графитоносных метаморфитах Ханкайского террейна [7]. Широко представлены разнообразные самородные элементы и интерметаллические соединения в кимберлитах и алмазах [8–14]. Известны их находки в родингитах и других продуктах изменения основных и ультраосновных пород [15–22]. Обзор литературных сведений свидетельствует о том, что ассоциации минералов, образующихся в высоко-, и ультравосстановительных условиях, распространены в черносланцевых формациях и ассоциированных с ними месторождениях, в метеоритах, продуктах гидротермального изменения ультраосновных пород и горения углей, в кимберлитах, алмазах, лунном реголите, углях и в некоторых других породах. В марганцево-силикатных породах они обнаружены впервые и представляют особый интерес в минералогическом и генетическом отношении.

Протолиты марганцево-силикатных пород (исходные осадки) изначально были обогащены разнообразными элементами, за счет которых при метаморфизме образовались минералы многих металлов [4], относимых в данной работе по генетическому признаку к первой группе. Особенностью благороднометалльной минерализации этой группы является полное отсутствие в ее составе «медистого золота», относительно крупные (диаметром до 0,5 мм) выделения самородного золота, представленного Au-Ag твердым раствором (рис. 6). Ассоциации самородных элементов и интерметаллических соединений, относимых в данной работе ко второй генетической группе, нередко ассоциируют с органическим веществом, что свидетельствует об активном участии углерода и, вероятно, водорода, обеспечивавших высоко-, и ультравосстановительный характер процессов минералообразования. Особенностью благороднометалльной минерализации второй группы является широкое представительство «медистого золота», Cu-, Pb-, и Co-содержащего золота (см. рис. 6) и, как правило, очень мелкие (диаметром доли микрометров — первые микрометры) частицы минералов.

Согласно приведенным данным, окислительно-восстановительные условия метаморфизма вблизи микротрещин и в остальном объеме пород резко различались. Можно полагать, что присутствие минеральных форм различных предельно восстановленных металлов в марганцево-силикатных породах, так же как и в метаморфизованных триасовых металлоносных осадках других типов (силикатно-магнетитовых рудах и яшмах) [4, 23, 24], обусловлено влиянием органического вещества подстилающей глинисто-кремнистой толщи. Оно связано с удалением из углеродистых пород при нагревании наиболее летучих компонентов, в первую очередь плохо связанной воды и углеводородов, и с возникновением таким образом некоторого объема флюида с высоко- и ультравосстановительными способностями, мигрировавшего по трещинам в другие породы. Этот процесс, в частности, фиксируется по присутствию систем многочисленных маломощных (доли миллиметров — первые миллиметры) минерализованных трещин (прожилков), рассекающих породы «глинисто-кремнистой» и «кремневой» толщ и содержащих органическое вещество, благороднометалльную минерализацию и предельно восстановленные формы разнообразных металлов. Визуально следы такого процесса наиболее хорошо фиксируются по изменению коричневой окраски яшм вдоль трещин на зеленовато-светло-серую

из-за неравномерного восстановления пород (замещения дисперсного гематита и гидрослюда хлоритом). В прожилках в виде мельчайших зерен встречаются пирит, галенит, Ni-содержащий пирротин, сфалерит, халькопирит и арсенопирит.

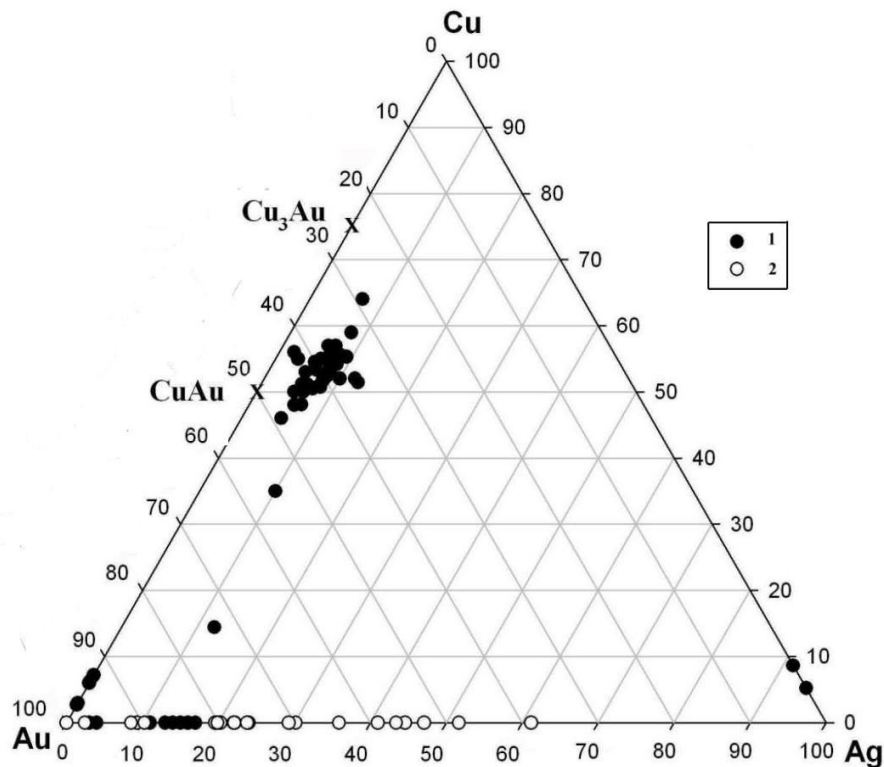


Рис. 6. Особенности состава минералов системы Au-Cu-Ag в триасовых метаморфизованных металлоносных осадках Сихотэ-Алиня (марганцево-силикатных породах, силикатно-магнетитовых рудах и измененных яшмах):

1 — точки состава мелких (до 10 мкм) зерен, приуроченных к порам и микротрещинам с органикой; 2 — точки состава относительно крупных зерен, выделенных растворением проб в плавиковой кислоте. Крестиками отмечено положение на диаграмме теоретических составов аурикуприда и купроаурида

Из других рудных минералов обнаружен хлоантит-смальтин, $(Ni,Co)As_3$, киноварь, аргентит, V- и Co-содержащий магнетит, антимонит, молибденит, шеелит, богатая серебром блеклая руда, буланжерит, тенорит, бравоит, колорадоит, галеновисмутит, бурнонит и пентландит. В самородном состоянии присутствуют Zn, Sb, Bi, Ni, Cu и Pb. Кроме того, встречаются самородные Cd, Cr, Sn, Fe, Al, W, Pt, Au и Ag [25, 26]. Широко представлены «медистое золото» и неупорядоченные твердые растворы и интерметаллические соединения, относящиеся к химической системе Cu-Ni-Zn. Источником металлов в минерализованных микротрещинах являлось, очевидно, органическое вещество «глинисто-кремнистой» толщи. Этот вывод подтверждается повышенными содержаниями многих элементов в углеродистых силицитах [27] и присутствием в контактово-метаморфизованных аналогах углеродистых пород благороднометалльной минерализации (в том числе «медистого золота») и предельно восстановленных форм разнообразных металлов [24], впоследствии обнаруженных и в углеродистых силицитах без явных признаков метаморфизма [28].

Заключение

Таким образом, аномально высокое содержание благородных и многих других металлов в металлоносных осадках, установленное пробирным, атомно-абсорбционным и ИСП МС методами, подтверждено результатами изучения аншлифов на микроанализаторе и растворения проб в кислотах. Как и следовало ожидать из результатов валового определения содержания благородных металлов, наиболее распространены минералы Au, Ag, Pt и Pd. Особенностью минералогии золота является распространение редких минеральных форм, таких как так называемое «медистое золото» и порпекит. Минералы Pt и Pd представлены самородными формами, а также твердыми растворами (или, возможно, интерметаллическими соединениями) Pt, Pd, Bi, Ag и Sn. Основное количество серебра в изученных породах присутствует в виде сульфида серебра и в самородном состоянии. Размерность частиц минералов благородных металлов изменяется от долей миллиметров до коллоидно-дисперсной.

Благороднометаллическая минерализация в марганцево-силикатных породах образовалась (в нынешнем виде) в процессе метаморфизма за счет вещества протолита марганцево-силикатных пород (триасовых металлоносных осадков), а также благородных металлов триасовых углеродистых силицитов, мигрировавших по трещинам в другие породы в составе флюида с высоко-, и ультравосстановительными способностями. В триасовых контактово-метаморфизованных металлоносных осадках Сихотэ-Алиня фиксируются геохимические и изотопные «метки» габброидов сергеевского, калиновского и владими́ро-александровского комплексов, офиолитов, а также вещества пассивной континентальной окраины, предположительно Ханкайского массива. Габброиды этих комплексов слагали две цепочки островов, располагавшихся, по меньшей мере, с середины девона до конца триаса вблизи окраины Ханкайского массива. Триасовые метаморфизованные металлоносные осадки Сихотэ-Алиня изначально являлись продуктами размыва латеритной коры выветривания (поздний анизий — конец триаса) островов, накапливавшимися в прилегавших к островам акваториях [29]. Обогащение благородными и другими металлами триасовых метаморфизованных металлоносных осадков и триасовых углеродистых силицитов было обусловлено, вероятно, сорбированием металлов гидроксидами Mn и Fe, а также органическим веществом в процессе экзогенного выветривания габброидов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волохин Ю. Г., Михайлик Е. В., Бурый Г. И. Триасовая кремневая формация Сихотэ-Алиня. Владивосток: Дальнаука, 2003. 252 с.
2. Казаченко В. Т., Сапин В. И. Минералогия и генезис железо-марганцевого оруденения Прибрежной зоны Приморья. Владивосток: ДВО АН СССР, 1990. 248 с.
3. Казаченко В. Т. Петрология и минералогия гидротермальных марганцевых пород Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2002. 250 с.
4. Перевозникова Е. В. Марганцево-силикатные породы Южного Сихотэ-Алиня: минералогия и генезис: дис. ... канд. геол.-мин. наук. Владивосток, 2010. 192 с.
5. Manganous barium-rich phlogopite from Shirokopadninskoye deposit in Primorye, U.S.S.R. N / V. T. Kazachenko [et al.] // *Jb. Miner. Mh.* 1988. N. 2. P. 49–66.
6. Формы нахождения металлов платиновой группы и их генезис в золоторудном месторождении Сухой Лог (Россия) / В. В. Дистлер [и др.] // *Геология рудных месторождений.* 1996. Т. 38, № 6. С. 467–484.
7. Самородные металлы в графитоносных породах Ханкайского террейна / А. И. Ханчук [и др.] // *Чтения, посвященные памяти акад. К. В. Симакова: тез. докл. на Всерос. конф. Магадан, 2007.* С. 107–108.
8. Тищенко А. И. Самородные металлы в кимберлитах Восточного Приазовья // *Современные проблемы формационного анализа, петрология и рудоносность магматических образований: тез. докл. Всерос. совещ., посвященного 100-летию со дня рождения акад. Ю. А. Кузнецова, Новосибирск, 16-19 апр., 2003.* Новосибирск: Филиал ГЕО. С. 329–330.
9. Тищенко А. И. Находка самородного алюминия в Украине // *Минералог. журн.* 2005. Т. 27, № 1. С. 38–43.
10. Особенности минеральных включений и примесей в алмазах из лампроитов трубки Аргайл (Западная Австралия) / А. И. Горшков [и др.] // *Геохимия.* 2003. № 12. С. 1251–1261.
11. Минеральные микровключения в алмазах кубического габитуса из месторождений Якутии по данным аналитической электронной микроскопии / С. В. Тутков [и др.] // *ДАН.* 2006. Т. 410, № 2. С. 255–258.
12. Карбонадо: физические свойства, минеральные включения и условия образования /

В. А. Петровский [и др.] // Высокие технологии в промышленности России (материалы и устройства электронной техники): материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. (Москва, 11–13 сентября 2003 г.). М.: Изд-во ЦНИТИ «Техномаш», 2003. Т. 2. С. 206–220. **13.** Морфологическое и субструктурное строение природных карбонадо / *В. А. Петровский* // Поверхность. Рентген. синхротрон. и нейтрон. исслед. 2004. № 9. С. 73–85. **14.** Включения карбонатов в несовершенных алмазах из Якутских месторождений по данным аналитической электронной микроскопии / *С. В. Тутков [и др.]* // Минералогические исследования в решении геологических проблем: материалы Годичного собрания МО РМО 2005 г. (Москва, 11 декабря 2005 г.). М.: Изд-во ВИМС, 2005. С. 24–125. **15.** Золотое оруденение в родингитах массивов альпинотипных гипербазитов / *В. В. Мурзин [и др.]* // Литосфера. 2006. № 1. С. 113–134. **16.** *Спиридонов Э. М., Плетнев П. А.* Месторождение медистого золота Золотая Гора (о «золото-родингитовой» формации). М.: Науч. мир, 2002. 220 с. **17.** *Кудрявцева А. И., Кудрявцев В. И.* Проявление медистого и серебристого золота в благороднометалльном оруденении Южно-Тувинского гипербазитового пояса // Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. Геоэкология природной среды и общества. Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2003. С. 45–48. **18.** Благороднометалльная минерализация в родингитах юго-восточной части Восточного Саяна / *Б. Б. Дамдинов [и др.]* // Геология и геофизика. 2004. № 45 (5). С. 577–587. **19.** Новый тип олово-золото-(ртуть)-платинометалльной рудной минерализации в Восточном Саяне / *С. М. Жмодик [и др.]* // ДАН. 1998. № 361 (4). С. 510–513. **20.** *Delura K.* Magnetite-nickel sulphides-awaruite associations in serpentinites from Braszowice-Brzeznicza massif (Sudetic ophiolite, SW Poland) // 12 Meeting of the Petrology Group of the Mineralogical Society of Poland “Crystalline Rocks of the East-European Craton”, Stary Folwark, Oct. 13–16, 2005: Scientific Communications. Krakow. Univ. Sl., 2005. P. 147–150. **21.** Самородное железо из ультраосновных обломочных пород (Петровский рудник, Средний Урал) / *Ю. В. Ерохин [и др.]* // Уральская минералогическая школа-2004 «Под знаком целочных пегматитов»: материалы Всерос. науч. конф. студентов, аспирантов, научных сотрудников академических институтов и преподавателей вузов геологического профиля (Екатеринбург, 5–9 июля 2004 г.). Екатеринбург: Изд-во Урал, гос. горн. ун-та, 2004. С. 84–85. **22.** *Ерохин Ю. В., Шагалов Е. С.* Аваруит из Баженовского офиолитового комплекса // VI Всероссийские научные чтения памяти ильменского минералога В. О. Полякова. (Миасс, 3–5 ноября 2005 г.). Миасс: Изд-во ИМин УрО РАН, 2005. С. 23–26. **23.** Минеральные формы благородных металлов в металлоносных отложениях триасово-юрской углеродистой толщи Сихотэ-Алиня / *В. Т. Казаченко [и др.]* // ДАН. 2008. № 421 (3). С. 383–386. **24.** *Мирошниченко Н. В., Перевозникова Е. В.* Интерметаллическое соединение Ni₃Au и твердые растворы золота и никеля в метаморфизованных металлоносных осадках трассовой кремневой формации Сихотэ-Алиня // Тихоокеанская геология. 2010. Т. 29, № 1. С. 60–66. **25.** Геохимия и минеральные формы золота, серебра, платины и палладия в металлоносных осадках триаса Дальнереченского, Дальнегорского и Кавалеровского районов Приморья / *Е. В. Перевозникова [и др.]* // Тихоокеанский рудный пояс: материалы новых исследований (к 100-летию Е. А. Радкевич). Владивосток: Дальнаука, 2008. 460 с. **26.** Геохимия и минералогия золота, серебра, платины и палладия в металлоносных осадках триаса Ольгинского рудного района (Сихотэ-Алинь) / *Н. В. Мирошниченко [и др.]* // Тихоокеанский рудный пояс: материалы новых исследований (к 100-летию Е. А. Радкевич). Владивосток: Дальнаука, 2008. 460 с. **27.** *Волохин Ю. Г., Иванов В. В.* Геохимия и металлоносность углеродистых силицитов триаса Сихотэ-Алиня // Литология и полезные ископаемые. 2007. № 4. С. 406–425. **28.** *Волохин Ю. Г., Карабцов А. А.* Минералы в углеродистых силицитах триаса Сихотэ-Алиня // Литология и полезные ископаемые. 2016. № 5. С. 465–484. **29.** *Казаченко В. Т., Перевозникова Е. В., Лаврик С. Н.* Геохимические и изотопные «метки» древних габброидов в триасовых метаморфизованных металлоносных осадках, скарнах и рудах скарновых месторождений Сихотэ-Алиня // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016. № 4 (27). С. 16–36. **30.** *Геодинамика*, магматизм и металлогения Востока России / под ред. А. И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с.

Сведения об авторах

Казаченко Валентин Тимофеевич — доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией Дальневосточного геологического института ДВО РАН

E-mail: vkazachenko@mail.ru

Перевозникова Елена Валериевна — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Дальневосточного геологического института ДВО РАН

E-mail: elenavalper@yandex.ru

Author Affiliation

Valentin T. Kazachenko — Dr. Sci. (Geology & Mineralogy), Head of Laboratory of the Far East Geological Institute of the Far-Eastern Branch of the RAS

E-mail: vkazachenko@mail.ru

Elena V. Perevoznikova — PhD (Geology & Mineralogy), Senior Researcher of the Far East Geological Institute of the Far-Eastern Branch of the RAS

E-mail: elenavalper@yandex.ru

Библиографическое описание статьи

Казаченко, В. Т. Минералогия благородных металлов в марганцево-силикатных породах триасовой кремневой формации Сихотэ-Алиня / *В. Т. Казаченко, Е. В. Перевозникова* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 3 (9). С. 32–53.

Reference

Kazachenko Valentin T., Perevoznikova Elena V. Mineralogy of Precious Metals in Manganese Silicate Rocks of the Triassic Silicon Formation of the Sikhote-Alin. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 3 (9), pp. 32–53. (In Russ.).

УДК 550.42-552.125

**ПРОЦЕССЫ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ В ЦИРКОНЕ
КАК ОТРАЖЕНИЕ ГЕОХИМИИ УРАНА В ПОРОДАХ
(НА ПРИМЕРЕ УРАНОВОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ СКАЛЬНОЕ
ЛИЦЕВСКОГО РАЙОНА КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА)***

**Т. В. Каулина¹, Л. М. Лялина¹, Л. И. Нерович¹, А. А. Аведисян¹, В. Л. Ильченко¹,
В. Н. Бочаров², Е. А. Ниткина¹**

¹ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

²СПбГУ РЦ «Геомодель»

Аннотация

Проведено комплексное изучение внутреннего строения, химического состава и возраста циркона из гранитоидов уранового рудопоявления Скальное (Лицевский урановорудный район). Степень изменения циркона в гранитоидах на участках гидротермальных проявлений зависит от содержания урана в цирконе и от степени гидротермальной переработки пород. Локальное датирование показывает, что участки вторичных изменений в цирконе из щелочных и субщелочных гранитов Кольского региона образовались в результате гидротермальных процессов, с которыми связано формирование урановых концентраций.

Ключевые слова:

циркон, U-Pb-возраст, гидротермальные изменения, урановые рудопоявления, Лицевский район.

**PROCESSES OF HYDROTHERMAL CHANGE IN ZIRCON AS MANIFESTATION OF URANIUM
GEOCHEMISTRY IN ROCKS (A CASE STUDY OF SKALNOYE URANIUM ORE OCCURRENCE
IN LITSA REGION, KOLA PENINSULA)**

**Tatiana V. Kaulina¹, Lyudmila M. Lyalina¹, Lyudmila I. Nerovich¹, Anaida A. Avedisyan¹,
Vadim L. Il'chenko¹, Vladimir N. Bocharov², Elena A. Nitkina¹**

¹Geological Institute of the KSC of the RAS

²Centre for Geo-Environmental Research and Modelling (GEOMODEL)

Abstract

Zircon from granitoids of the Skalnoye uranium ore occurrence (Litsa uranium ore district) was investigated in details including internal structure, chemical composition and age. The degree of granitoid zircon alteration in hydrothermal manifestation areas depends on the zircon uranium content and the degree of hydrothermal processing of rocks. Zircon from plagiogranites with uranium content below 300 ppm does not change under hydrothermal conditions. Hydrothermal alteration is observed in high-uranium (2 400 ppm) zircon from alkaline granites, where zircon structure is disturbed by radioactive decay, and in zircon from metasomatite, in which, with a relatively low uranium content (up to 1000 ppm), the changes are stipulated by stronger hydrothermal influence. Local (SIMS and LA-ICPMS) age dating shows that secondary areas in zircon crystals from alkaline and subalkaline granites of the Kola Region (Litsa District, Javrozersky District, Keivy Block) are confined to the stages of hydrothermal activity at 1,78–1,65 and 0,42–0,38 Ga, which are associated with the formation of uranium concentrations.

Keywords:

zircon, U-Pb age, hydrothermal alteration, uranium ore occurrences, Litsa District.

* Работа выполнена в рамках госзадания Геологического института КНЦ РАН с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ «Геомодель».

Введение

Циркон — основной минерал-геохронометр, используемый для датирования процессов в широком диапазоне температур и давлений. Изотопная U-Pb-система циркона представляет собой мощный инструмент прецизионного датирования магматических, метаморфических и метасоматических процессов. Известно также, что растворимость циркона повышается в присутствии воды, CO₂ флюидов и в щелочных магмах [1–3]. Способность циркона к изменению возрастает у кристаллов с нарушенной структурой: обычно это происходит вследствие метамиктности (см. работу [4] и ссылки в ней), а также в результате механической трещиноватости или пластической деформации. Циркон с высокими концентрациями U и Th обычно более подвержен изменениям, поскольку радиоактивный распад этих элементов со временем вызывает серьезное нарушение кристаллической структуры минерала. Степень метамиктности циркона зависит от его возраста и содержания U. Существенное нарушение структуры у докембрийских цирконов наблюдается при содержаниях урана более 1000 ppm, тогда как у циркона моложе 1 млн лет аморфная структура обнаруживается при содержаниях урана в несколько тысяч частей на миллион [4].

Метамиктный циркон создает проблемы при датировании, поскольку под воздействием флюидов выщелачивается в первую очередь Pb и, следовательно, возрастает степень дискордантности U-Pb-возрастов [1, 5]. Тем не менее, именно благодаря способности метамиктного циркона к растворению его можно использовать для датирования наложенных гидротермальных процессов.

Циркон является основным концентратором урана (и тория) в породе. Считается, что он содержит в 150–250 раз больше урана и в 15–20 раз больше тория, чем порода-хозяин [6]. Поскольку уран, как несовместимый элемент, накапливается в расплаве, наиболее высокое его содержание отмечается в магматическом цирконе из гранитов и пегматитов, то есть связь магматического циркона с геохимией урана очевидна. Наша задача — проследить связь вторичных преобразований циркона с геохимией урана.

Экспериментальное изучение поведения циркона в гидротермальных условиях показывает, что происходит как частичное растворение исходного зерна циркона с нарушением его U-Pb-системы, так и образование новой фазы циркона [1, 5, 7]. Нарушение U-Pb-системы исходного циркона, обычно определяемое нижним пересечением дискордии с конкордией, а также возраст нового циркона могут отражать время гидротермального процесса, что говорит о применимости циркона как геохронометра в низкотемпературных флюидонасыщенных зонах.

Для определения возможной связи процессов гидротермального преобразования циркона с геохимией урана в породах был изучен циркон из гранитоидов рудопроявления Скальное Лицевского урановорудного района и проведено сравнение полученных результатов с изученным ранее цирконом из гранитов других районов Кольского п-ова: Яврозерского района пояса Танаэлв и хребта Серповидного Кейвского блока [7] (рис. 1). Общее для всех этих районов — повышенная проницаемость пород в результате процессов деформации: Лицевский район находится в зоне пересечения разломных и сдвиговых зон [8], пояс Танаэлв — в зоне сдвиговых деформаций регионального масштаба, район хребта Серповидного находится в подошве надвиговой пластины [9, 10], следовательно, флюидная переработка пород там повышена, соответственно высокоурановый циркон из гранитов должен подвергаться изменению и/или растворению.

Рудопроявление Скальное было выбрано как урановорудный объект, на котором время проявления гидротермальных процессов можно контролировать прямым датированием урановых минералов, связанных с этими процессами.

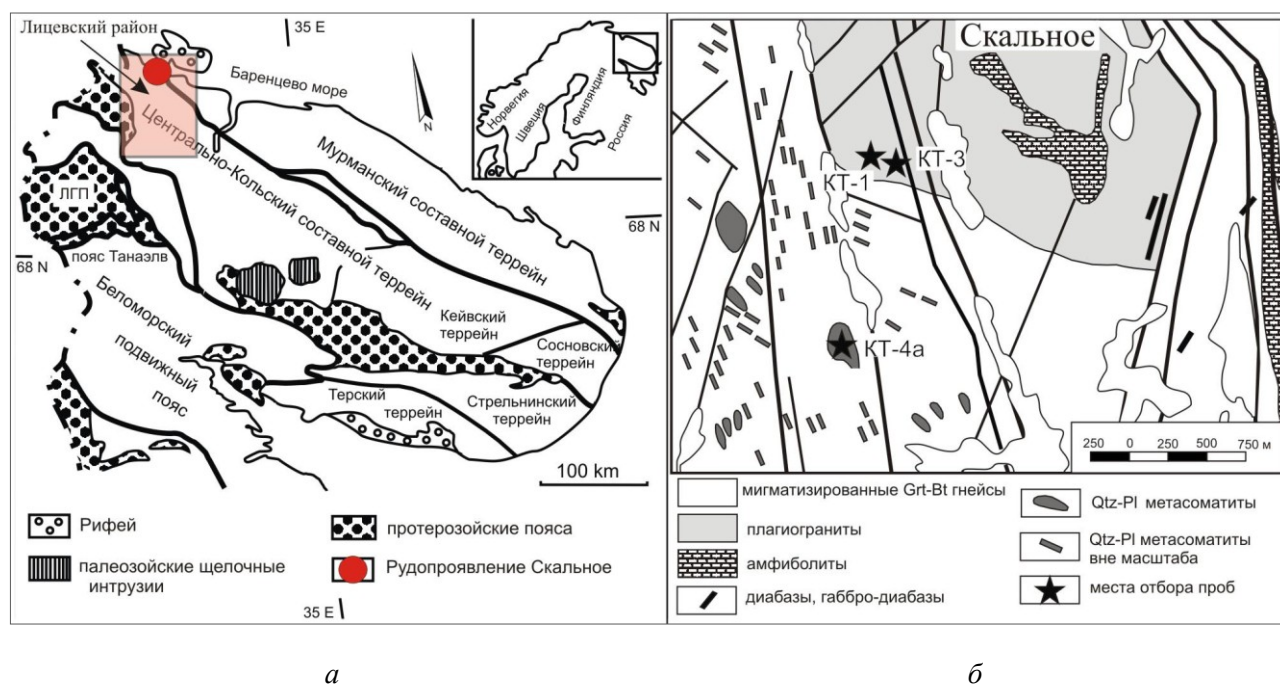


Рис. 1. Положение Лицевского района в пределах Кольского региона (а) и геологическая карта участка Скальное [по 11] с точками отбора проб (б)

Краткая геология участка Скальное

Рудопроявление Скальное находится в Лицевском урановорудном районе [8], который выделен на северо-западе Кольского п-ова (рис. 1). В региональном масштабе участок Скальное расположен в зоне сочленения Центрально-Кольского и Мурманского блоков и северо-западного продолжения зоны Колмозеро-Воронья.

В геологическом строении участка Скальное основная роль принадлежит мигматизированным гранат-биотитовым гнейсам кольской серии с телами плагиигранитов и прослоями амфиболовых гнейсов, сланцев и амфиболитов. В плагиигранитах отмечаются жилы и небольшие тела крупнозернистых микроклиновых гранитов.

На участке широко развиты процессы катаклаза и брекчирования. Проведенные нами петрофизические исследования пород показывают, что район подвергался неоднократному динамическому воздействию, причем главные составляющие полей напряжений, выявленные в образцах, имели разные ориентировки. Интересно, что большая часть образцов с участков урановых аномалий относится к умеренно или слабоанизотропным, что обусловлено, вероятно, гидротермальной проработкой (несущей урановую минерализацию) с эффектом залечивания микротрещин. Также отмечаются участки с высоким уровнем микротрещиноватости и соответственно с повышенным уровнем напряженно-деформированного состояния пород. Об этом свидетельствуют высокие показатели анизотропии упругих свойств с эффектами «разбегания» значений показателей анизотропии А и В (А — для скоростей распространения продольных волн, В — для поперечных волн), характерными для пород, которые в значительно меньшей степени оказались подверженными гидротермальной переработке (т. е. с незалеченной микротрещиноватостью) [12].

Пробы на участке Скальное были отобраны из плагиогранитов (проба КТ-1/12, КТ-2/12), микроклиновых (щелочных) гранитов (проба КТ-3/12) и из кварц-альбит-микроклинового метасоматита из зоны дробления и брекчирования (проба КТ-4а/12) (рис. 1, б).

Плагиограниты представляют собой средне- и мелко-среднезернистые биотитовые и мусковит-биотитовые плагиогранитоиды с разной степенью сохранности магматической гипидиоморфнозернистой структуры. Породы имеют повышенное отношение ($Al/(Ca + Na + K)$, mol.) и относятся к пералюминиевым образованиям.

Микроклиновые (щелочные) граниты представляют собой массивные крупнозернистые породы с хорошо проявленной гипидиоморфнозернистой (и пойкилитовой) структурой, с отчетливым идиоморфизмом плагиоклаза по отношению к кварцу и микроклин-пертит. Содержание SiO_2 варьирует от 69,1 до 73,8 %, $Na_2O + K_2O$ в пределах 8,66–11,41 %, тип щелочности — натрий-калиевый, при $Na_2O/K_2O = 0,3–0,6$.

Метасоматиты представляют собой массивную, крупно-среднезернистую катаклазированную и брекчированную породу, образовавшуюся по граниту, в которой микроклин-пертит, плагиоклаз (альбит) и амфибол погружены в кварцевый цемент.

Методы исследования

Изучение строения циркона из гранитоидов участка Скальное в обратно-рассеянных электронах (BSE) и определение состава отдельных участков циркона было проведено в ГИ КНЦ РАН (г. Апатиты) на электронном микроскопе LEO 1450 с волновым спектрометром QUANTAX 200 Bruker и на микроанализаторе Cameca MS-46. Рамановская спектрометрия циркона проводилась в Ресурсном центре «Геомодель» (Санкт-Петербург) на рамановском спектрометре HORIBA Jobin-Yvon Labram HR800, Ar-лазер 514,5 нм, время экспозиции — 3 с, число повторений — 5, мощность лазера — 50 мВт. Локальное U-Pb-датирование циркона проводилось в LA-ICP-MS лаборатории Университета Тасмании (Австралия) на масс-спектрометре Agilent 7700 с помощью аналитической системы Resonetics RESolution для лазерной абляции. Система оснащена когерентным эксимером COMPEX Pro ArF с длиной волны 193 нм.

Строение и состав циркона в гранитоидах участка Скальное

Циркон во всех пробах имеет сложное строение с ядрами, каймами и участками преобразования, которые хорошо проявлены в обратно-рассеянных электронах (рис. 2, 3). В плагиогранитах (проба КТ-1/12, рис. 2) циркон имеет типичный призматический габитус с тонкой магматической зональностью, характерной для магматического циркона. Процессы вторичных изменений циркона минимальны. В пробе щелочных гранитов (проба КТ-3/12, рис. 2) кристаллы циркона сохраняют длиннопризматический габитус и тонкую ростовую зональность, но процессы изменения более проявлены. Это выражается в появлении криволинейных, фестончатых участков другого оттенка в BSE, развитых по трещинам и зонам роста, что свидетельствует о частичном растворении участков циркона и росте новой генерации, которая отличается по химическому составу и структуре. Циркон в метасоматитах (проба КТ-4а/12, рис. 2) существенно более изменен, чем циркон из гранитов, тем более плагиогранитов, он теряет ростовую зональность, приобретает микроблочное строение и представляет собой смесь участков разного состава и строения.

Отличным инструментом для изучения радиационно-индуцированной метамиктизации циркона на микроуровне (< 1 мкм) является рамановская спектрометрия [13]) С увеличением структурных повреждений кристаллической решетки форма и положение отдельных рамановских мод изменяется: 1) полосы становятся шире; 2) уменьшается общая интенсивность спектра; 3) полосы смещаются в сторону меньших волновых чисел; 4) пики становятся асимметричными [13, 14].

Для обычного циркона с ненарушенной кристаллической структурой характерны следующие КР-полосы: 1008, 975, 439, 393, 355, 269, 225, 214 и 202 см^{-1} [15] (показаны пунктиром на рис. 2). Раман-спектры циркона из плагиогранитов соответствуют кристаллическому циркону (проба КТ-1/12, рис. 2), хотя в отдельных зернах отмечается некоторое снижение интенсивности пиков и смещение в сторону меньших длин волн. Раман-спектры циркона из метасоматитов показывают, что циркон имеет очень нарушенную структуру (проба КТ-4а/12, рис. 2). Интенсивность КР-полос падает, происходит уширение и смещение пиков, почти пропадает сигнал от 975 и от 1008 см^{-1} , что свидетельствует о появлении аморфной фазы [16].

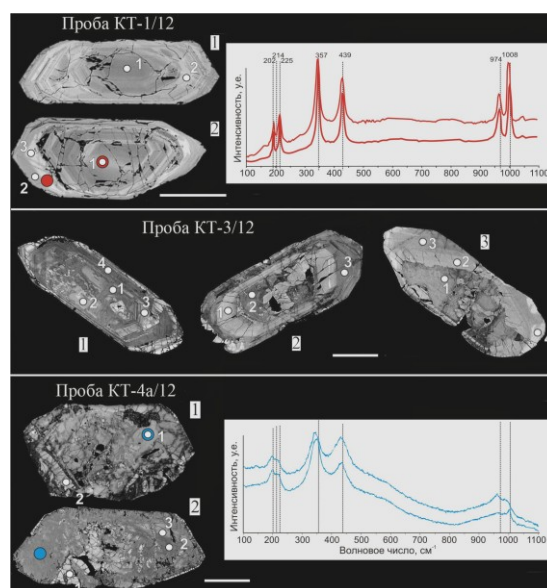


Рис. 2. Фотографии циркона из гранитоидов участка Скальное в обратно-рассеянных электронах с точками микрозондового анализа (белые кружки) и точками анализа (цветные кружки) с соответствующими рамановскими спектрами. Масштабная линейка 100 мкм.

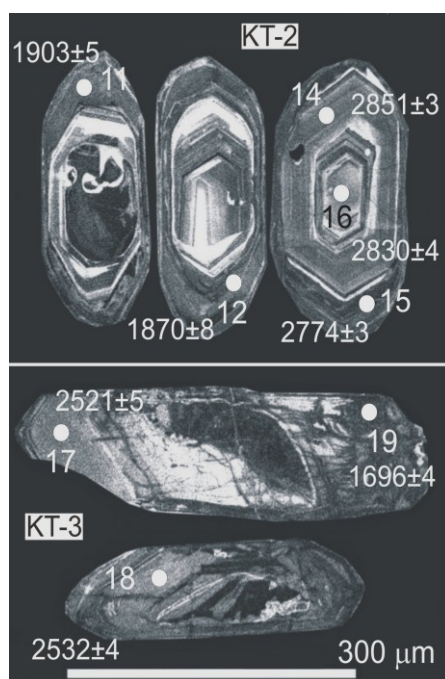


Рис. 3. Фотографии циркона в катодоллюминесценции с точками LA-ICPMS анализа и $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -возрастом

Химический состав циркона

Изучение химического состава разных участков циркона показывает, что в изученных породах минерал существенно различается по химическому составу (табл. 1). Циркон в плагиигранитах содержит относительно невысокое количество элементов-примесей, в том числе и гафния, что приводит к высоким (до 62) Zr/Hf-отношениям; в щелочных гранитах и метасоматитах содержание всех его примесей повышается (табл. 1). Помимо первичных участков циркона с ростовой зональностью, появляются измененные участки с повышенным содержанием неформульных элементов (Ca, Mn, Fe, Al), что говорит о нарушении структуры и гидратации циркона, об этом же свидетельствует и значительное количество воды (до 6 вес. %). Повышается содержание гафния, особенно в цирконе метасоматитов, которое достигает 2,1 % и является самым высоким из всех изученных проб. Можно предполагать, что флюид был обогащен гафнием. Проба метасоматита показывает, что степень изменения циркона зависит от степени гидротермальной переработки пород.

Таблица 1

Микрозондовый анализ отдельных участков циркона
из гнейсов и гранитоидов участка Скальное

Номер зерна – номер точки	Элемент, ppm									
	Si	Al	P	Ca	Mn	Fe	Yb	Zr	Hf	Zr/Hf
Проба КТ-1/12 плагиигранит										
1–1	14,546	0,041	0	0,555	0,078	0,245	0	47,291	1,232	38
1–2	15,067	0,040	0	0	0	0	0	48,930	1,449	34
2–1	14,958	0,031	0	0,014	0,032	0,010	0	49,287	0,798	62
2–2	15,054	0	0	0	0	0,011	0	49,313	0,800	62
2–3	14,817	0,046	0	0,077	0	0,087	0	48,956	1,142	43
Проба КТ-3/12 микроклиновый гранит										
1–1	16,104	0,494	0,068	1,106	0,151	0,886	0,225	46,382	1,484	31
1–2	14,746	0,078	0	1,442	0,075	0,424	0	47,231	1,597	30
1–3	15,204	0,255	0	1,034	0,072	0,665	0	46,163	1,518	30
1–4	16,577	0,432	0	0,993	0,108	0,647	0,450	47,744	1,439	33
2–1	15,054	0	0	0,378	0,124	0,076	0	46,566	1,505	31
2–2	15,789	0,588	0	1,132	0,130	0,872	0,247	43,796	1,669	26
2–3	15,232	0,210	0	0,981	0,077	0,428	0	46,597	1,467	32
3–1	14,537	0,164	0,174	1,478	0	0,222	0,337	45,394	1,701	27
3–2	15,367	0	0	0,318	0,047	0	0	47,893	1,832	26
3–3	15,365	0	0,064	0,573	0,060	0,444	0	47,848	1,693	28
3–4	15,575	0	0	0	0	0	0	48,755	1,728	28
Проба КТ-4а кварц-альбит-микроклиновый метасоматит из зоны дробления										
1–1	14,773	0,227	0,193	1,497	0,145	0,418	0,302	44,182	1,571	28
1–2	14,918	0,078	0,128	0,667	0,130	0,318	0	45,907	2,122	22
2–1	15,378	0,184	0	0,465	0,123	0,266	0	45,214	1,897	24
2–2	15,782	0,438	0	1,228	0,184	0,648	0,346	45,921	1,805	25
2–3	15,305	0,224	0,058	1,103	0,095	0,452	0	44,028	2,001	22

Примечания. Измерения химического состава циркона проведены на микроанализаторе Cameca MS-46 (ГИ КНЦ РАН, Апатиты) при ускоряющем напряжении 22 кВ и токе 40 нА.

Аналитические линии и эталоны: ZrL α и SiK α — синтетический циркон; HfL β_1 — чистый металл.

U-Pb-возраст циркона

Результаты LA-ICPMS анализа для циркона из плагиогранитов (пробы КТ-1/12 и КТ-2/12) показали, что возраст кристаллизации плагиогранитов составляет 2829 ± 10 млрд лет [17]. Наиболее характерные зерна магматического циркона из плагиогранитов приведены на рис. 3 (точки 14, 16). Ядра содержат мало урана — 214–245 ppm и имеют повышенные торий-урановые отношения 0,4–0,6 (табл. 2). Более высокоурановая кайма циркона (точки 11 и 12) имеет возраст 1,87–1,9 млрд лет. Надо отметить, что ядра практически не изменены, то есть при образовании кайм (скорее всего, из расплава, судя по тонкой зональности) они не растворялись и более поздняя гидротермальная переработка на цирконе никак не отразилась.

Таблица 2

Результаты LA-ICPMS анализа циркона из гранитоидов участка Скальное Лицевского района

Номер точки	Изотопный состав, ppm					Изотопные отношения				Возраст, Ma
	Pbtot	²³² Th	²³⁸ U	⁵⁶ Fe	¹⁷⁸ Hf	²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb	±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±1σ	
Плагиограниты (проба КТ-2/12)										
11	197	29	1404	2331	12360	7,89	0,09	0,1165	0,0007	1903±5
12	176	28	1381	3496	13071	8,64	0,13	0,1143	0,0010	1870±8
14	170	123	245	1277	11935	1,94	0,02	0,2031	0,0008	2851±3
15	223	106	275	393	13134	1,63	0,02	0,1937	0,0008	2774±3
16	158	129	214	801	10697	1,82	0,02	0,2005	0,0009	2830±4
Микроклиновые граниты (проба КТ-3/12)										
17	740	45	2339	4239	13639	3,83	0,05	0,1663	0,0005	2521±3
18	646	191	2409	5782	15615	4,97	0,07	0,1674	0,0008	2532±4
19	208	11	1653	4488	14850	9,09	0,11	0,1040	0,0005	1696±4

Два зерна циркона с ростовой зональностью из микроклиновых гранитов (проба КТ-3/12) имеют возраст 2526 ± 19 млн лет (рис. 3). Точки очень дискордантны, что связано с сильными изменениями циркона. Химический состав циркона, определенный на масс-спектрометре (табл. 2), показывает, что он существенно обогащен ураном и железом, это подтвердил и микрозондовый анализ (табл. 1). Возраст измененного участка циркона — 1696 ± 4 млн лет (рис. 3), в пределах ошибки совпадает со временем гидротермальной переработки пород, определенной Rb-Sr-методом. Rb-Sr-возраст, который рассчитан по изохроне, построенной по точкам породы, апатита и мусковита из микроклиновых гранитов участка Скальное, определяет возраст метасоматоза в 1788 ± 32 млн лет [17]. Надо отметить, что здесь новый циркон образовался не в виде каймы, а как участок замещения в магматическом цирконе. Магматический циркон растворялся, скорее всего, из-за нарушений структуры в связи с повышенным содержанием урана (и тория) — до 2600 ppm (табл. 2).

Обсуждение результатов

Мы рассмотрели циркон из трех пород участка Скальное: плагиогранитов, микроклиновых (щелочных) гранитов и метасоматитов, которые различаются по содержанию урана и тория и геологическому положению. Как уже отмечалось, способность циркона к изменению пропорциональна содержанию в нем урана и возрасту. Концентрация урана и тория в плагиогранитах наиболее низкая: U — 0,5–1 ppm, Th — 1,1–1,5 ppm, соответственно магматический циркон в плагиогранитах содержит мало урана (214–275 ppm) и тория (106–129 ppm). Несмотря на то, что плагиограниты — наиболее древние породы из рассматриваемых,

при таком низком содержании, как показывает рамановская спектроскопия, радиоактивных элементов существенного нарушения структуры циркона не происходит. Циркон из плагиогранитов не реагирует на гидротермальную переработку и не отражает ее.

Возраст гидротермальной переработки на участке Скальное, в результате которой образовалась урановая минерализация, определен в 1,79–1,83 млрд лет Rb-Sr-методом по $WR + Ar + Mc$ из щелочных гранитов [17] и U-Pb-методом по ураниниту. Возраст уранинита участка Скальное, полученный на масс-спектрометре SHRIMP II, равен 1825 ± 20 млн лет [12]. Также присутствует более поздний уранинит: по урановой смолке получен U-Pb-возраст в 455 ± 6 млн лет [12].

В щелочных гранитах содержание урана (и тория) повышается: U — до 5,3 ppm, Th — до 25 ppm, также увеличивается содержание урана — 2339–2314 ppm и в меньшей степени тория — 45–191 ppm в цирконе. При такой высокой концентрации урана структура циркона нарушается, хотя щелочные граниты на 300 млн лет моложе плагиогранитов. Наложённая гидротермальная переработка выражается в появлении участков замещения возраста 1,7 млрд лет в магматическом цирконе возраста 2,53 млрд лет.

Метасоматиты содержат несколько больше урана — 4,8 ppm и тория — 8,9 ppm, чем плагиограниты, но меньше, чем щелочные граниты. Циркон в метасоматитах содержит 900–980 ppm урана (данные получены на электронном микроскопе в Ресурсном центре «Геомодель», СПбГУ). Возраст циркона не определялся, но на основании общей геологической ситуации и геохронологических данных по другим участкам Лицевского района [17], исходная магматическая порода (гранит) образовалась около 2,55 млрд лет, а метасоматические процессы в ней произошли после 2,3 млрд лет. Более низкие, чем в цирконе из щелочных гранитов, содержания урана не могли привести к полной метамиктизации структуры циркона. Вероятно, в данном случае проявился комплексный эффект повышенного содержания урана и высокой степени гидротермальной переработки пород, связанной с нахождением метасоматитов в зоне брекчирования. Надо отметить, что низкоуровневый циркон в гнейсах, находящихся на контакте с метасоматитами, никаких изменений не претерпел.

Анализ флюидных включений в кварце из плагиогранитов, щелочных гранитов и метасоматитов показал, что газовая составляющая флюида участка Скальное представлена практически чистым CO_2 (99,3–100 мол. %), что, как известно, более способствует выщелачиванию урана из циркона и его переносу [3], поскольку в настоящее время общепризнано, что наиболее реальной формой переноса урана являются уранил-карбонатные ионы.

Изучение вторичных структур в цирконе из гранитоидов других районов Кольского п-ова, показало, что циркон с высоким содержанием урана отражает гидротермальные процессы. Локальное SIMS-датирование измененных участков циркона из субщелочных гранитов Яврозерского района и пород Кейвского блока с уран-ториевой минерализацией определяет два возраста — 1,78–1,76 и 0,48–0,40 млрд лет [7]. Эти данные говорят о приуроченности вторичных структур в цирконе к широко проявленным в Кольском регионе этапам гидротермальной переработки метаморфических комплексов пород в 1,78–1,65 и 0,42–0,38 млрд лет (см. [7] и ссылки там). С этими же рубежами связано перераспределение и накопление основных урановых концентраций [8].

Выводы

Степень изменения циркона в гранитоидах на участках гидротермальных проявлений зависит от содержания урана в цирконе и от степени гидротермальной переработки пород. Возраст измененных участков циркона из щелочных и субщелочных гранитов Кольского региона (Лицевский и Яврозерский районы, Кейвский блок) определяет интервалы 1,78–1,76 и 0,48–0,40 млрд лет, что говорит о приуроченности вторичных структур в цирконе к широко проявленным в Кольском регионе этапам гидротермальной переработки метаморфических комплексов пород, с которыми связано формирование урановых концентраций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Динамика взаимодействия циркона с гидротермальным углекислым флюидом / *Н. Г. Ризванова [и др.]* // Геохимия. 1996. № 3. С. 253–263.
2. *Watson E. B., Harrison T. M.* Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types // *Earth and Planetary Science Letters*. 1983. Vol. 64. P. 295–304.
3. *Kepler H., Wyllie P. J.* Role of fluids in transport and fractionation of uranium and thorium in magmatic processes // *Nature*. 1990. 348. P. 531–533.
4. Radiation effects in zircon / *R. C. Ewing [et al.]*; P. Hoskin (eds) // *Zircon*. Mineralogical Society of America Reviews in Mineralogy & Geochemistry. 2003. Vol. 53. P. 387–425.
5. *Geisler T., Schaltegger U., Tomaschek F.* Re-equilibration of zircon in aqueous fluids and melts // *Elements*. 2007. No. 3. P. 43–50.
6. *Hoskin P., Rodgers K. A.* Raman spectral shift in the isomorphous series $(Zr_{1-x}Hf_x)SiO_4$ // *Eur. J. Solid State Inorg. Chem.* 1996. Vol. 33. P. 1111–1121.
7. *Kaulina T. V., Sinai M. Yu., Savchenko E. E.* Crystallogenic models for metasomatic replacement in zircons: implications for U–Pb geochronology of Precambrian rocks // *Intern. Geol. Rev.* 2015. Vol. 57, No. 11–12. P. 1526–1542.
8. Урановое оруденение Лицевского района на Кольском полуострове (Россия) / *А. В. Савицкий [и др.]* // *Геология рудных месторождений*. 1995. № 5. С. 403–416.
9. *Балаганский В. В.* Главные этапы тектонического развития северо-Востока Балтийского щита в палеопротерозое: автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. СПб., 2002. 32 с.
10. Альпинотипная тектоника в палеопротерозойском Лапландско-Кольском орогене / *С. В. Мудрук [и др.]* // *Геотектоника*. 2013. № 4. С. 13–30.
11. *Serov L.* Métallogénèse de l'uranium dans la région de Litsa (Péninsule de Kola, Russie). Docteur de l'Université Henry Poincaré (en géosciences). Soutenance publique le 24 juin // Nancy. France. 2011. 166 p.
12. *Ильченко В. Л., Афанасьева Е. Н.* О вариациях анизотропии упругих свойств горных пород в районе У-рудопоявления Скальное, Центрально-Кольский мегаблок, Балтийский щит // *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. 2011. № 8. С. 180–183.
13. *Nasdala L., Imer G., Wolf D.* The degree of metamictization in zircon: a Raman spectroscopic study // *Eur. J. Mineral.* 1995. No. 7. P. 471–478.
14. *Кожееников В. Н., Ивашевская С. Н., Кевлич В. И.* Геохимия и рамановские спектры цирконов из рудных (PGE-Au) амфиболитов массива Травяная губа, Северная Карелия // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2015. № 7. С. 36–53.
15. *Hoskin P., Schaltegger U.* The Composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis // *Reviews in mineralogy & geochemistry*. 2003. Vol. 53. P. 27–62.
16. Metamictization of zircon: Raman spectroscopic study / *M. Zhang [et al.]* // *J. Phys.* 2000. No. 12. P. 1915–1925.
17. Поведение Rb–Sr и U–Pb-систем в породах и минералах Лицевского урановорудного района (Кольский полуостров) / *Т. В. Каулина [и др.]* // *Геодинамика раннего докембрия: сходства и различия с фанерозоем и путеводитель научных экскурсий: материалы науч. конф. Петрозаводск, 2017. С. 110–113.*

Сведения об авторах

Каулина Татьяна Владимировна — доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: kaulina@geoksc.apatity.ru

Лялина Людмила Михайловна — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: lialina@geoksc.apatity.ru

Нерович Людмила Ивановна — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: nerovich@geoksc.apatity.ru

Аведисян Анаида Акоповна — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: avedisyan@geoksc.apatity.ru

Ильченко Вадим Леонидович — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: vadim@geoksc.apatity.ru

Бочаров Владимир Николаевич — специалист Ресурсного центра «Геомодель» СПбГУ

E-mail: bocharov@molsp.phys.spbu.ru

Ниткина Елена Анатольевна — кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: nitkina@geoksc.apatity.ru

Autor Affiliation

Kaulina Tatiana Vladimirovna — Dr. Sci. (Geology & Mineralogy), Leading Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: kaulina@geoksc.apatity.ru

Lialina Lyudmila Mikhailovna — PhD (Geology & Mineralogy), Senior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: lialina@geoksc.apatity.ru

Nerovich Lyudmila Ivanovna — PhD (Geology & Mineralogy), Senior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: nerovich@geoksc.apatity.ru

Avedisyan Anaida Akopovna — PhD (Geology & Mineralogy), Senior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: avedisyan@geoksc.apatity.ru

Il'chenko Vadim Leonidovich — PhD (Geology & Mineralogy), Senior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: vadim@geoksc.apatity.ru

Bocharov Vladimir Nikolaevich — Researcher at the Centre for Geo-Environmental Research and Modelling (GEOMODEL)

E-mail: bocharov@molsp.phys.spbu.ru

Nitkina Elena Anatol'evna — PhD (Geology & Mineralogy), Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: nitkina@geoksc.apatity.ru

Библиографическое описание статьи

Процессы гидротермального изменения в цирконе как отражение геохимии урана в породах (на примере уранового рудопроявления Скальное Лицевского района Кольского полуострова) / Т. В. Каулина [и др.] // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 3 (9). — С. 54–63.

Reference

Kaulina Tatiana V., Lyalina Lyudmila M., Nerovich Lyudmila I., Avedisyan Anaida A., Il'chenko Vadim L., Bocharov Vladimir N., Nitkina Elena A. Processes of Hydrothermal Change in Zircon as Manifestation of Uranium Geochemistry in Rocks (A Case Study of Skalnoye Uranium Ore Occurrence in Litsa Region, Kola Peninsula). *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 4 (27), pp. 54–63. (In Russ.).

УДК 551.71/72/73+552.16/3 (470.21/22)

СВЯЗЬ ОСОБЕННОСТЕЙ ПАЛЕОЗОЙСКОГО МАГМАТИЗМА КОЛЬСКОГО РЕГИОНА СО СПЕЦИФИКОЙ МАГМАТИЗМА ДОКЕМБРИЯ*

Н. Е. Козлов¹, Е. В. Мартынов¹, Н. О. Сорохтин², Т. С. Марчук¹

¹ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

²ФГБУН Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва

Аннотация

Показано, что породы ультраосновного-основного состава Лапландского гранулитового пояса отличаются от аналогичных пород других гранулитовых поясов Евразии (развитых в пределах площадей, для которых щелочная специализация проявлялась в меньшей степени), повышенным содержанием SiO₂ и Al₂O₃ при снижении содержания суммы щелочей, то есть специфичны по содержанию элементов, определявших впоследствии состав палеозойских щелочных пород, для которых, наоборот, характерна недосыщенность глиноземом (и кремнекислотой) относительно повышенного содержания щелочей. На основании этого сделано предположение, что специфика магматизма неархея Северо-Востока Балтийского щита могла стать одной из причин своеобразия и уникальности состава продуктов последующих этапов магматизма. С учетом результатов предыдущих исследований авторов можно говорить о раннедокембрийской предыстории не только для платинометалльной, но и для щелочной специализации региона, то есть о тесной связи как минимум в его пределах поздних геологических событий с более ранними.

Ключевые слова:

Кольский регион, уникальность, протолит, докембрий, супракрупальный комплекс, петрогеохимия, моделирование, реконструкция.

THE CONNECTION OF THE PECULIARITIES OF PALEOZOIC MAGMATISM IN THE KOLA REGION WITH THE SPECIFICS OF PRECAMBRIAN MAGMATISM

Nikolay E. Kozlov¹, Evgeny V. Martynov¹, Nikolay O. Sorokhtin²,

Tatyana S. Marchuk¹

¹Geological Institute of the KSC of the RAS

²P. P. Shirshov Institute of Oceanology of the RAS

Abstract

It is shown that the rocks of basic-ultrabasic composition of the Lapland granulite belt differ from similar rocks of other Eurasian granulite belts developed within the areas of less manifested alkali specialization. They possess an increased content of SiO₂ and Al₂O₃ and a reduced amount of alkali. Thus, they have a specific content of elements, which afterwards defined the content of the Paleozoic alkali rocks characterized on the contrary by alumina (and silica) under saturation as compared to a high content of alkali. On this basis, the assumption is made that the peculiarities of Neoproterozoic magmatism of the Northeastern Baltic Shield could be one of the reasons of compositional originality and uniqueness of the products of later magmatism stages. Taking into account the results of the previous studies of the authors, we can speak about the early Precambrian history not only for PGM, but also for alkaline specialization of the region, i. e. about the close connection of later geological events with earlier ones at least within the Kola Region.

Keywords:

the Kola Region, uniqueness, protolith, the Precambrian, supracrustal complex, petrogeochemistry, modelling, reconstruction.

* Работа выполнена в Геологическом институте КНЦ РАН по государственному заказу № 0231-2015-0007.

Введение

Гигантские по размерам и уникальные по качеству сырья апатитовые, апатит-магнетитовые, флогопитовые, вермикулитовые месторождения, редкометалльная минерализация, в первую очередь иттриевая, руды металлов платиновой группы и т. п. определяют ведущее место Кольского региона среди других докембрийских провинций. Ранее мы уже делали предположение о том, что предпосылки платинометалльной специализации региона закладывались еще в архее [1]. Не претендуя на окончательное решение данной проблемы в отношении всех специфичных породных ассоциаций и связанных с ними полезных ископаемых, в настоящей работе авторы рассмотрели вопрос о возможной связи с докембрийской историей развития региона формирование Кольской щелочной провинции. По мнению детально исследовавших ее специалистов, по масштабам многоэтапного проявления щелочного магматизма она является уникальной и, как минимум, одной из крупнейших в мире [2–4]. Перед тем как предпринять попытку приблизиться к решению этого вопроса, были изучены ранние этапы развития Кольского коллизии, где, как представляется, могли зародиться черты такой уникальности.

Материал и методика исследований

В методическом плане авторы придерживались выбранного ранее подхода — сравнение однотипных по петрогеохимической номенклатуре образований. С учетом опыта предыдущей работы, полученного при изучении энсиалических и энсиматических породных ассоциаций [5], в качестве объектов исследования были выбраны породы ультраосновного-основного состава, метаморфизованные аналоги которых распознаются наиболее надежно. Кроме того, информация о составе данных пород, связанных в своем формировании с мантией, несет в себе сведения о некоторых ее геохимических характеристиках. При постановке исследований авторы исходили из следующих положений, два из которых были обоснованы в упомянутой выше работе:

- породы основного состава океанических структур отличны по составу от континентальных, причем эти различия фиксируются уже в архее. Это свидетельствует в пользу правомерности вывода о различии мантии под океанами и континентами уже на ранних стадиях развития Земли, а также о незначительной относительной миграции коры относительно подстилающих ее верхних слоев мантии, продуцирующих магмы основного состава;
- базиты, формирующиеся в различных геодинамических обстановках, имеют петрогеохимическую специфику, что позволяет распознавать их даже среди метаморфизованных разновидностей раннего докембрия и свидетельствует о близких характеристиках состава мантии под сходными по геодинамике зонами;
- с учетом первого положения, а также общих представлений о геологическом строении региона [6] можно полагать, что, начиная как минимум с неархея, земная кора Кольского региона имела примерно постоянное положение относительно глубинных частей Земли. Таким образом, при постановке задачи не исключалась преемственность петрогеохимических черт вещественно-структурных комплексов, являющихся мантийными продуктами палеозойской мантии, и мантии более древних этапов геологической истории региона.

В основу исследования были положены данные о составе пород ультраосновного-основного состава высокобарных гранулитовых поясов Евразии, развитых на Балтийском (северо-восточная часть), Анабарском, Алданском (южная и юго-западная часть), Украинском (Побужье) щитах, в Прибайкалье (ольхонская и шарыжалгайская серии), в Северо-Восточной Азии, Южной и Юго-Восточной Индии и Северном Китае. Всего в работе при решении этой задачи было использовано порядка 900 полных силикатных анализов. Данные объекты реконструируются нами как протоостроводужные образования [7]. С учетом изложенных выше положений можно ожидать, что продукты мантийного магматизма данных структур, при всем своеобразии каждого региона, должны иметь сходные петрогеохимические черты. И лишь

в случае существования ярко выраженной специфики состава мантии в любом из названных регионов можно ожидать отражения этого в составе мантийных продуктов формирующихся на его территории магматических комплексов.

Следуя этой логике, можно полагать, что раннедокембрийские протоостроводужные образования Лапландского гранулитового пояса, в силу петрогеохимической специфичности Кольского региона, наряду с общими для всех подобных структур Евразии характеристиками, могли обладать особыми, лишь им свойственными чертами. Поскольку в настоящей работе исследуется проблема формирования Кольской палеозойской щелочной провинции, уместно напомнить, что характерной чертой щелочных пород является присутствие в них индикаторных минералов повышенной щелочности. В составе пород это находит отражение в повышенных содержаниях Na_2O и K_2O при специфическом поведении SiO_2 и (или) Al_2O_3 [4], при этом большинство ультраосновных-основных щелочных пород характеризуются недосыщенностью глиноземом и (или) кремнеземом относительно щелочей [8]. Поэтому в ходе исследования нас интересовало распределение в раннедокембрийских комплексах именно этих элементов.

Для сравнения состава объектов был использован метод сопоставления и оценки степени «сходства-отличия» породных ассоциаций, представленных неоднородными совокупностями петрогеохимических параметров. Данный метод был разработан ранее для моделирования изменчивости химического состава геологических образований в ходе эволюции Земли и поиска гомологов архейских образований Кольской сверхглубокой скважины СГ-3, в дальнейшем усовершенствованный для поиска тренда отличий в заданных рядах совокупностей при введенном исследователем отношении частичного порядка [9–11].

Результаты и их обсуждение

С учетом изложенного была сформулирована задача поиска обобщенного показателя, по которому первично-магматические породы ультраосновного-основного состава Лапландского гранулитового пояса значимо отличаются от аналогичных по петрогеохимической классификации образований всех прочих перечисленных выше структур. Такой обобщенный показатель был найден (см. рис., табл.). Отчетливо видно, что отличия исследованных пород Лапландского гранулитового пояса от других поясов Евразии определялись повышенным содержанием в них SiO_2 и Al_2O_3 при снижении содержания щелочей (при этом последние отличаются друг от друга в значительно меньшей степени). Такое поведение перечисленных элементов противоположно тому, что характерно для палеозойских щелочных пород региона. Это позволяет предполагать, что уже в неоархее — палеопротерозое мантия и соответствующие мантийные продукты в пределах Кольского региона, в сравнении со структурами регионов, для которых щелочная специализация проявлялась в меньшей степени, были специфичны по содержанию элементов, определявших впоследствии состав палеозойских щелочных пород.

Можно предложить два объяснения выявленных закономерностей. Первое — это существование родоначальной для ультраосновных-основных пород Лапландско-Колвицкого гранулитового пояса специфической по составу мантии, изначально обедненной щелочными элементами и обогащенной SiO_2 и Al_2O_3 . Данное предположение представляется маловероятным, поскольку подобная мантия не могла бы стать источником более поздних продуктов магматической деятельности, характеризующихся диаметрально противоположным поведением всех перечисленных элементов.



Положение точек, соответствующих составам пород Кольского региона и гранулитовых поясов Евразии, на оси, описываемой обобщенным показателем:

$$F_1 = -0,324\text{SiO}_2 - 0,210\text{TiO}_2 - 0,468\text{Al}_2\text{O}_3 - 0,115\Sigma\text{Fe} - 0,010\text{MgO} + 0,207\text{CaO} + 0,184\text{Na}_2\text{O} + 0,736\text{K}_2\text{O}$$

1–9 — ультраосновные-основные гранулиты: 1 — северо-востока Балтийского щита (Лапландско-Колвицкий гранулитовый пояс), 2 — Прибайкалья, ольхонская серия, 3 — Анабарского щита, 4 — Северо-Восточной Азии, 5 — южной и юго-западной части Алданского щита, 6 — Северного Китая, 7 — Южной и Юго-Восточной Индии, 8 — Прибайкалья, шарыжалгайская серия, 9 — Украинского щита (Побужье); 10–12 — ультраосновные — основные магматические породы палеопротерозоя (9) и палеозоя (10) Кольского региона, а также усредненный состав ультраосновных-основных пород, формировавших неархейские протоостроводужные пояса и более поздние структуры Кольского региона вплоть до палеозоя (12)

Медианы (выделено полужирным) и значения статистик Пури-Сена-Тамуры для F_1

	1	7	4	2	9	5	3	6	8
1	-22,371								
7	12,060*	-21,921							
4	14,790	0,163	-21,861						
2	12,053	0,128	0,007	-21,678					
9	13,155	0,463	0,031	0,044	-21,648				
5	79,257	2,162	0,418	0,479	0,065	-21,582			
3	14,478	0,581	0,029	0,112	0,054	0,013	-21,514		
6	12,189	0,956	0,330	0,486	0,272	0,222	0,243	-21,478	
8	38,595	5,522	3,095	3,490	2,477	4,759	2,316	0,435	-21,269

Примечание. Цифры в головке и боковике таблицы обозначают комплексы пород (см. на рис.).

* Значения статистики Пури Сена-Тамуры более 3,8 для 95 % вероятности отличий, более 6,6 — для 98 %.

Вторым объяснением может быть выплавление из «нормальной» для подобных зон Земли мантии продуктов, на первых этапах в ходе дифференциации обедненных щелочами и обогащенных SiO_2 и Al_2O_3 . В этом случае можно ожидать обогащение первыми и обеднение последними остаточных мантийных продуктов, что не противоречит петрогеохимическим характеристикам пород палеозойских комплексов региона и поэтому выглядит более логичным.

Если это предположение верное, то с учетом приведенных выше положений можно представить, что при отсутствии магматической дифференциации петрогеохимические характеристики гипотетических пород мантийного генезиса в пределах Кольского региона должны были бы быть сходными с аналогичными образованиями других исследованных структур Евразии. В этой связи следует упомянуть, что на территории Кольского региона

мантийный магматизм, начиная с подвижных поясов конвергентных зон неархейского времени, наиболее мощно проявился на трех этапах:

- в неархее (по некоторым данным в неархее — палеопротерозое) при формировании Лапландско-Колвицкого пояса и иных зеленокаменных протоостроводужных поясов (Колмозеро-Вороньинского, Сергозерско-Стрельнинского);
- в палеопротерозое, при образовании основных-ультраосновных массивов палеопротерозоя — Монче- и Федорово-Панских тундр (и др.), а также проторифтогенных структур Имандра-Варзуги, Печенги и Пана-Куоляярви;
- в палеозое, когда шло формирование щелочных комплексов Кольского региона (Хибины, Ловозеро и т. д.).

В дальнейшем исследовании мы использовали данные о составе продуктов ультраосновного-основного магматизма всех перечисленных структур (около 1 400 полных силикатных анализов). Гипотетические породы, которые могли бы сформироваться в Кольском регионе в результате одноактного магматизма при отсутствии процессов дифференциации мантийного вещества, можно теоретически вывести из состава всех ультраосновных-основных пород перечисленных выше комплексов неархей, палеопротерозоя и палеозоя. Для этой цели они были взяты в пропорции как 60, 21 и 18 % соответственно, что отражает примерное соотношение их распространенности в регионе (наша оценка, с учетом данных [12] для палеозойских пород Кольской щелочной провинции).

Точка среднего состава таких гипотетических пород мантийного генезиса на оси обобщенного показателя F_1 заметно смещена в направлении составов продуктов основного магматизма всех остальных исследованных гранулитовых поясов Евразии, что вполне объяснимо с учетом положения на этом показателе составов палеопротерозойских и палеозойских образований (рис.). Таким образом, сделанное ранее предположение о подобии состава мантийных продуктов, а опосредованно и мантии, в районах, характеризующихся сходными режимами геодинамического развития, находит свое подтверждение.

Выводы

Специфика вулканизма раннего докембрия Северо-Востока Балтийского щита могла предопределить своеобразие и уникальность состава продуктов последующих этапов магматизма. В качестве механизма возникновения подобной специфики может быть предложена, к примеру, экстракция из исходного вещества примитивной мантии расплавов, обедненных щелочными элементами, по схеме [13] или [14], при большей степени плавления мантийного субстрата в пределах Лапландской протоострововой дуги. При этом если принять точку зрения Ф. П. Митрофанова [15] о длительности геологических процессов в раннем докембрии, подобное преобразование мантии могло быть продолжительным и, соответственно, более значительным, чем в названной схеме.

Авторы подчеркивают, что данный вывод ни в коей мере не претендует на роль новой модели формирования щелочных массивов Кольского региона. Тем не менее, следует заметить, что он хорошо согласуется с выводом о возможной связи мантийных источников палеозойского магматизма Кольской провинции с докембрийской мантией, полученным ранее на основе изотопно-геохимических данных [2]. Учитывая это, можно говорить о том, что сделанные нами предположения имеют право на существование и нуждаются в дальнейшем исследовании, как и изучение причин столь специфического развития раннедокембрийской протоострововой дуги на территории Кольского коллизии.

С учетом результатов наших предыдущих исследований можно говорить о раннедокембрийской предыстории не только для платинометалльной, но и для щелочной специализации

региона, то есть о тесной связи, как минимум в пределах Кольского региона, поздних геологических событий с более ранними.

ЛИТЕРАТУРА

1. Metamorphic rocks of the Murmansk domain (Kola Peninsula) as compared with the oldest rock associations of the northeastern Baltic shield, Canada and Greenland / *N. E. Kozlov [et al.]* // *Geochemistry International*. 2008. Vol. 46, no. 6. P. 608–613.
2. Арзамасцев А. А. Эволюция палеозойского щелочного магматизма Северо-Восточной части Балтийского щита: автореф. дис. ... д. г.-м. н. СПб., 1998. 30 с.
3. *Bulakh A. G.* Overview of carbonatite-phoscorite complexes of the Kola Alkaline Province in the context of a Scandinavian North Atlantic Alkaline Province / *A. G. Bulakh, V. V. Ivanikov, M. P. Orlova* // *Mineralogical Soc. Series*. Vol. 10. Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: the key example of the Kola alkaline province / ed. by *F. Wall, A. N. Zaitsev*. London: The Geological Society of Great Britain & Ireland, 2004. Chapter 1. P. 1–44.
4. Alkaline Rocks and Carbonatites of the World. Part Two: Former USSR / *L. N. Kogarko [et al.]*. London: Chapman & Hall, 1995. 226 p.
5. *Kozlov N. E., Martynov E. V., Ivanov A. A.* Petrogeochemical differences between basic rocks of ensialic and ensimatic complexes: a comparative analysis of the Phanerozoic and Precambrian // *Geochemistry International*. 1999. Vol. 37, no. 6. P. 512–518.
6. Геология архея Балтийского щита / *Н. Е. Козлов [и др.]*. СПб.: Наука, 2006.
7. *Козлов Н. Е.* Вещественный состав метаморфических комплексов высокобарных гранулитовых поясов и проблема формирования их протолитов (на примере Лапландских гранулитов): автореф. дис. ... д. г.-м. н. СПб.: ИГГД, 1995. 36 с.
8. *Дубровский М. И.* Что же такое щелочные горные породы? // *ЗВМО*. 1999. № 4. С. 100–105.
9. Геолого-петрогеохимические особенности и метаморфизм архейских пород северо-восточного обрамления Печенги как критерий выбора их в качестве гомологов глубинных пород разреза СГ-3 / *Н. Е. Козлов [и др.]* // *Вестник МГТУ*. 2002. Т. 5, № 1. С. 75–84.
10. Петрогеохимическое обоснование обнаружения гомологов архейских пород разреза Кольской СГ-3 на поверхности / *Н. Е. Козлов [и др.]* // *Геохимия*. 2002. № 6. С. 601–611.
11. Эволюция вещественного состава метабазитов раннего докембрия Кольского региона / *Н. Е. Козлов [и др.]* // *Вестник МГТУ*. 2014. Т. 17, № 2. С. 304–313.
12. Кольская щелочная провинция в палеозое: оценка состава первичных мантийных расплавов и условий магмогенерации / *А. А. Арзамасцев [и др.]* // *Российский журнал наук о Земле*. 2001. Т. 3, № 1. С. 1–35.
13. Вариации химического состава мантийных перидотитов как результат различных степеней частичного плавления примитивной мантии / *И. Д. Рябчиков [и др.]* // *ДАН СССР*. 1987. Т. 295, № 1. С. 185–189.
14. *Когарко Л. Н.* Магматизм островов Мирового океана и неоднородность верхней мантии Земли // *Твердая кора океанов (проект «Литос»)*. М.: Наука, 1987. С. 113–121.
15. *Митрофанов Ф. П.* Современные проблемы и некоторые решения докембрийской геологии кратонов // *Литосфера*. 2001. № 1. С. 5–14.

Сведения об авторах

Козлов Николай Евгеньевич — доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий лабораторией геологии и геодинамики Арктики Геологического института КНЦ РАН

E-mail: kozlov@geoksc.apatity.ru

Мартынов Евгений Васильевич — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: mart@geoksc.apatity.ru

Сорохтин Николай Олегович — доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института океанологии РАН

E-mail: nsorokhtin@ocean.ru

Марчук Татьяна Сергеевна — инженер I категории Геологического института КНЦ РАН

E-mail: marchuk@geoksc.apatity.ru

Author Affiliation

Nikolay E. Kozlov — Dr. Sci. (Geology & Mineralogy), Professor, Head of Laboratory of Arctic Geology and Geodynamics of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: kozlovne@afmgtu.apatity.ru

Evgeny V. Martynov — PhD (Geology & Mineralogy), Senior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: mart@geoksc.apatity.ru

Nikolay O. Sorokhtin — Dr. Sci. (Geology & Mineralogy), Chief Researcher of the P. P. Shirshov Institute of Oceanology of the RAS

E-mail: nsorokhtin@ocean.ru

Tatyana S. Marchuk — Senior Engineer of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: marchuk@geoksc.apatity.ru

Библиографическое описание статьи

Связь особенностей палеозойского магматизма Кольского региона со спецификой магматизма докембрия / *Н. Е. Козлов [и др.]* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 3 (9). — С. 64–70.

Reference

Kozlov Nikolay E., Martynov Evgeny V., Sorokhtin Nikolay O., Marchuk Tatyana S. The Connection of the Peculiarities of Paleozoic Magmatism in the Kola Region with the Specifics of Precambrian Magmatism. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 3 (9), pp. 64–70. (In Russ.).

УДК 553.3+549.2+549.3+546.57(470.21)

**О МИНЕРАЛАХ ПЛАТИНЫ, ПАЛЛАДИЯ, СЕРЕБРА И ЗОЛОТА
В ПОРЬЕРЕЧЕНСКОМ ТИТАНОНОСНОМ КОМПЛЕКСЕ
(КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)***

**Ю. Н. Нерадовский, Н. Ю. Грошев, Ю. Л. Войтеховский,
С. В. Бороздина, Е. Э. Савченко**
ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

Аннотация

Рассмотрены новые данные о минералах благородных металлов, обнаруженных в составе титаномагнетитовых руд Колвицкого месторождения Порьереченского интрузивного комплекса. Всего описано: 17 минеральных фаз ЭПГ — атокит Pd_3Sn , звягинцевит Pd_3Pb , инсизваит $PtBi_2$, котульскит $Pd(Te,Bi)$, майченерит $PdBiTe$, меренскиит $(Pd,Pt)(Te,Bi)_2$, мончеит $(Pt,Pd)(Te,Bi)_2$, платина самородная Pt , плюмбопалладинит Pd_3Pb_2 , паоловит Pd_2Sn , полярит $Pd(Bi,Pb)$, соболевскит $PdBi$, станнопалладинит Pd_2Sn_2Cu , минеральные фазы $(Pd,Ag,Bi)_{3+x}Te$ и $(Pd,Ag,Pb)_{3+x}Te$, тетраферроплатина $PtFe$, фрудит $PdBi_2$; 5 минеральных фаз золота и серебра — акантит Ag_2S , купроаурид Cu_3Au , гессит Ag_2Te , серебро Ag , эмпрессит $AgTe$; 2 минеральные фазы с примесями Pt , Pd и Ag — алтаит $PbTe$, иодид свинца PbI_2 . Подобная широкая ассоциация минералов БМ с титаномагнетитовыми рудами подтверждает высокий потенциал (Fe-Ti-V) месторождений в отношении сопутствующих элементов (Cu-Ni-Co), а также (Pt, Pd, Ag, Au).

Ключевые слова:

минералы, платина, палладий, серебро, золото, титаномагнетитовая руда, Колвицкое месторождение.

**MINERALS OF PLATINUM, PALLADIUM, ARGENTUM AND GOLD
OF THE POR'YERENCHENSKY TITAN-BEARING COMPLEX (KOLA PENINSULA)**

**Yury N. Neradovsky, Nikolay Yu. Groshev, Yury L. Voytekhovsky,
Svetlana V. Borozdina, Evgeny E. Savchenko**
Geological Institute of the KSC of the RAS

Abstract

The article considers minerals of precious metals identified in the composition of titanium-magnetite ores of the Kolvitsa deposit within the Por'yerechensky igneous complex. In total, 17 mineral phases of PGE have been described, as follows: atokite Pd_3Sn , zvyagintsevite Pd_3Pb , insizwaite $PtBi_2$, kotulskite $Pd(Te,Bi)$, michenerite $PdBiTe$, merenskyite $(Pd,Pt)(Te,Bi)_2$, moncheite $(Pt,Pd)(Te,Bi)_2$, native platinum Pt , plumbopalladinite Pd_3Pb_2 , paolovite Pd_2Sn , polarite $Pd(Bi,Pb)$, sobolevskite $PdBi$, stannopalladinite Pd_2Sn_2Cu , mineral phases $(Pd,Ag,Bi)_{3+x}Te$ and $(Pd,Ag,Pb)_{3+x}Te$, tetraferroplatinum $PtFe$, froodite $PdBi_2$; and 5 mineral phases of Au and Ag to follow: acanthite Ag_2S , cuproaurite Cu_3Au , hessite Ag_2Te , silver Ag , empressite $AgTe$; and 2 mineral phases with admixtures of Pt , Pd , Ag — altaite $PbTe$ and lead iodide PbI_2 . This association of precious metals with titanium-magnetite ores has been observed for the first time. The authors believe, that it allows referring the Kolvitsa deposit to a new metallogenic object in the Kola Region. It occurred after the precious metal mineralization (Pt, Pd, Ag, Au) had superimposed on the titanium-bearing formation (Fe-Ti-V) with Cu-Ni-Co. In result, such a unique association of complex ores formed, still demanding further research.

Keywords:

minerals, platinum, palladium, silver, gold, titanium-magnetite ore, Kolvitsa deposit.

* Исследования проводились по НИР № 0231-2015-0001, при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-35-20501.

Введение

Порьереченский интрузивный комплекс пород развит в южной части Кольского п-ова. Интрузии прорывают гранулиты Лапландско-Колвицкого пояса, образуя цепь массивов северо-западного простирания протяженностью более 20 км, севернее крупного Колвицкого массива анортозитов. В состав комплекса входит более 15 массивов, сложенных среднезернистыми пироксенитами, перидотитами и оливинитами, относящимися к клинопироксенит-верлитовой формации [1]. В наиболее крупном интрузиве геолого-разведочными работами выявлено Колвицкое месторождение титаномагнетитовых руд [2]. Главные минералы руд изучены в процессе исследований последних лет [3–5 и др.]. Особый интерес вызывали данные о возможном присутствии в титаномагнетитовых рудах платинометалльной минерализации [6]. Они были подтверждены находками 10 минералов благородных металлов, в т. ч. 7 минералов платины и палладия и 3 минералов серебра и золота [7, 8]. Дальнейшие исследования привели к обнаружению еще 13 минеральных фаз благородных металлов (БМ). Общее количество минеральных фаз этой группы в титаномагнетитовых рудах достигло 24, что ставит месторождение в лидеры по разнообразию минералов БМ среди месторождений подобного типа в мире. В настоящей работе рассмотрены все минеральные фазы платины, палладия, серебра и золота, установленные в титаномагнетитовых рудах и вмещающих породах второй интрузивной фазы. Ввиду мелких размеров зерен все минералы благородных металлов выявлены исключительно с помощью сканирующего электронного микроскопа. Оценочный анализ фаз проведен с использованием рентгеновского энергодисперсионного спектрометра Bruker XFlash-5010, установленного на СЭМ LEO-1450, нестандартным методом при помощи программы QUANTAX-200. Ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 500 pA. Аналитик Е. Э. Савченко.

Результаты исследований

Минералы Pt и Pd

Атокит Pd₃Sn — встречается в виде включений в ильмените, халькопирите и пироксене. Размеры зерен до 6 мкм. Формы выделений: неправильные и частично ограненные зерна и прожилки. Pt-содержащий атокит наблюдается в сростках с платиновыми фазами — инсизваитом и тетраферроплатиной (рис. 1, а) и в сростаниях с стехиометричным атокитом (рис. 1, б). Химический состав атокита непостоянен, наблюдаются примеси Pt, Au, Pb, Fe, Cu (табл. 1).

Звягинцевит Pd₃Pb — встречается в виде вкраплений в сульфидах меди — халькопирите и кубаните (рис. 2), реже — в жилках по пироксену (рис. 3). Размеры зерен до 15 мкм. Формы зерен неправильные, иногда с огранкой. В жилах звягинцевит ассоциирует с поляритом, а во вкрапленниках в сульфидах — с соболевскитом и тетраферроплатиной (рис. 4). Морфология жил соответствует метасоматическим образованиям. Сростки имеют весьма сложную структуру, которая характерна для последовательно кристаллизовавшихся фаз. Химический состав звягинцевита неустойчив, наблюдается примесь Au, Bi, Sn и Hg (табл. 1).

Таблица 1

Результаты исследования химического состава минералов Pt и Pd

Минерал	Pt	Pd	Rh	Ir	In	Ag	Au	Pb	Fe	Cu	Ni	As	Sb	Bi	Te	Sn	Hg	Σ
Алоцит	—	68,67	—	—	—	—	3,56	3,44	—	—	—	—	—	—	—	24,54	—	100
	36,06	41,51	—	—	—	—	7,17	2,05	—	—	—	—	—	—	—	13,21	—	100
	25,58	30,82	—	—	—	—	—	—	2,73	13,2	0,28	—	—	—	—	25,37	—	100
	14,00	50,09	—	—	—	—	—	1,87	—	7,93	—	—	—	—	—	26,12	—	100
Звяглицевит	4,84	60,46	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	34,70	—	100
	—	59,57	—	—	—	—	—	40,43	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100
	—	59,89	—	—	—	—	—	40,11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100
	—	59,29	—	—	—	—	—	40,71	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100
	—	59,44	—	—	—	—	—	40,56	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100
	—	60,14	—	—	—	—	—	36,78	—	—	—	—	—	—	—	—	3,09	100
	—	59,82	—	—	—	—	—	34,42	—	—	—	—	—	—	—	—	4,92	100
	—	59,86	—	—	—	—	—	34,87	—	—	—	—	—	—	—	—	0,47	100
	—	58,58	—	—	—	—	—	35,49	—	—	—	—	—	—	—	—	1,83	100
	—	62,59	—	—	—	—	—	25,48	—	—	—	—	—	—	—	5,64	0,35	100
Инсизваит	29,91	2,16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100
	28,00	4,80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,10	—	100
Котульскит	—	38,12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100
	13,12	21,27	—	—	—	2,43	—	—	—	—	0,28	—	—	—	—	—	—	100
	4,56	20,15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,86	—	—	—	—	100
Майченерит	2,15	21,47	0,72	—	—	—	—	—	—	—	—	1,11	1,29	—	—	—	—	100
Меренскит	12,19	15,30	—	—	—	—	—	—	—	—	0,42	—	—	—	—	—	—	100
	12,21	17,07	—	—	—	—	—	—	—	—	0,33	—	—	—	—	—	—	100
Мончегит	35,93	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100
	33,59	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100
	30,89	2,82	0,91	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100
	31,35	2,87	1,56	—	—	0,18	—	2,66	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100
	35,50	1,10	0,94	—	—	—	—	1,18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100
	31,21	2,10	2,64	2,45	—	0,02	—	1,17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100

Продолжение таблицы 1

Минерал	Pt	Pd	Rh	Ir	In	Ag	Au	Pb	Fe	Cu	Ni	As	Sb	Bi	Te	Sn	Hg	Σ
Платина	92,68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,52	-	-	-	-	6,8	-	100
Плюмбопалладинг	-	44,69	-	-	-	-	-	51,31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100
Пасовит	-	64,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35,08	-	100
Полярит	-	42,23	-	-	-	-	-	11,02	-	-	-	-	-	46,76	-	-	-	100
	-	33,71	-	-	-	-	0,26	18,51	-	-	-	-	-	47,37	-	-	0,15	100
	-	59,10	-	-	-	-	-	13,03	-	-	-	-	-	18,68	-	-	9,20	100
	-	53,31	-	-	-	-	2,02	18,00	-	-	-	-	-	22,67	-	-	3,20	100
Соболевскит	2,18	34,30	1,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	60,14	0,46	1,71	-	100
	-	35,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	63,86	0,84	-	-	100
	-	32,87	1,26	-	-	-	-	5,48	-	-	-	-	-	69,93	-	-	0,46	100
	-	21,32	1,51	-	-	-	-	1,58	-	-	-	-	1,47	71,12	-	-	-	100
	-	44,72	1,27	-	-	-	-	1,92	-	-	-	-	-	52,09	-	-	-	100
	-	36,42	1,29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	62,30	-	-	-	100
Станнопалладинг	-	56,86	-	-	3,31	-	0,93	11,40	-	9,49	-	-	-	2,83	-	12,66	2,50	100
	-	54,83	-	-	1,34	-	1,90	15,50	-	8,93	-	-	-	7,40	-	6,73	2,31	100
	-	57,24	-	-	-	-	4,99	14,07	-	8,04	-	-	-	6,96	-	7,35	1,35	100
	-	59,08	-	-	3,76	-	-	-	-	11,70	-	-	-	-	-	25,44	-	100
	-	39,29	-	-	-	-	1,13	12,32	-	-	-	-	-	18,75	28,51	-	-	100
МФ-1	-	39,07	-	-	-	0,68	-	11,15	-	-	-	-	-	20,55	28,55	-	-	100
	-	39,39	-	-	-	-	-	10,85	-	-	-	-	-	23,44	26,33	-	-	100
	-	39,66	-	-	-	-	-	12,78	-	-	-	-	-	19,66	27,91	-	-	100
	-	38,13	-	-	-	2,70	-	11,51	-	-	-	-	-	21,73	25,93	-	-	100
	-	39,15	-	-	-	-	-	11,08	-	-	-	-	-	22,25	27,52	-	-	100
МФ-2	8,73	36,96	-	-	-	11,90	-	14,66	-	-	-	-	-	-	27,75	-	-	100
	-	40,00	-	-	-	15,38	-	13,53	-	-	-	-	-	-	29,31	1,79	-	100
	-	35,36	-	-	-	23,69	-	14,18	-	-	-	-	-	-	26,77	-	-	100
	-	36,93	-	-	-	20,96	-	14,74	-	-	-	-	-	-	27,37	-	-	100
	-	38,44	-	-	-	15,34	-	15,44	-	-	-	-	-	30,78	-	-	100	

Окончание таблицы 1

Минерал	Pt	Pd	Rh	Ir	In	Ag	Au	Pb	Fe	Cu	Ni	As	Sb	Bi	Te	Sn	Hg	Σ
МФ-2	-	40,23	-	-	-	10,21	-	14,56	-	-	-	-	-	-	33,26	1,75	-	100
	-	35,57	-	-	-	22,05	-	13,93	-	-	-	-	-	2,06	26,40	-	-	100
	-	37,86	-	-	-	14,42	-	17,72	-	-	-	-	-	-	30,00	-	-	100
	-	35,84	-	-	-	9,25	-	19,38	-	-	-	-	-	-	35,52	-	-	100
	-	38,01	-	-	-	15,11	-	15,62	-	-	-	-	-	2,23	29,03	-	-	100
Тетраферро-платина	-	36,69	-	-	-	17,29	0,75	15,77	-	-	-	-	-	1,20	28,28	-	-	100
	78,34	-	-	-	-	-	-	-	17,82	1,69	2,15	-	-	-	-	-	-	100
	71,56	3,95	-	-	-	-	-	-	20,72	3,80	-	-	-	-	-	-	-	100
Фрудит	70,14	-	-	-	-	-	-	-	23,43	6,43	-	-	-	-	-	-	-	100
	-	23,65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	75,01	-	1,34	-	100
	-	19,61	0,77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	79,61	-	-	-	100
	-	20,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	79,40	-	-	-	100
	-	20,84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	79,16	-	-	-	100
-	20,13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	79,87	-	-	-	100	

Примечание. Здесь и далее в таблицах: исследование проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа LEO-1450 с энергодисперсионным спектрометром Bruker XFlash-5010.

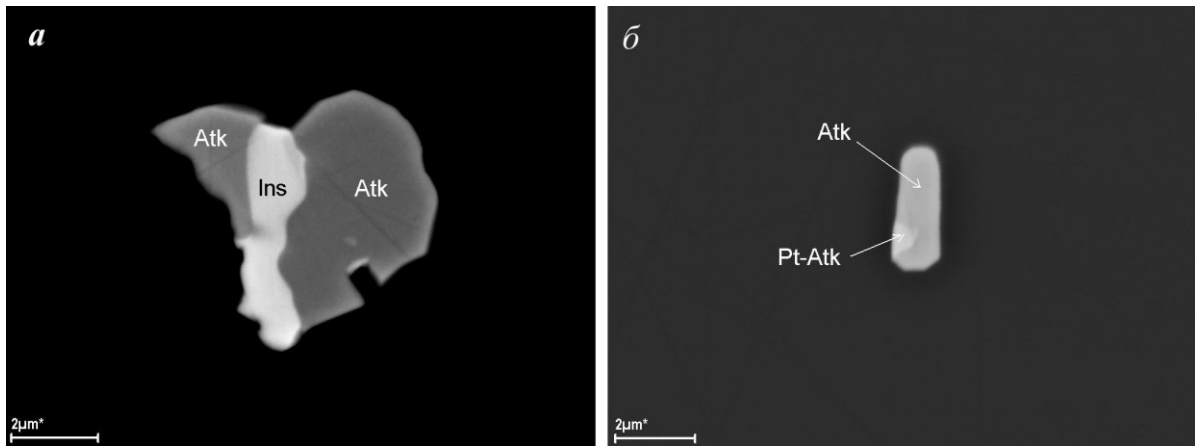


Рис. 1. Формы зерен атокита (Atk) и инсизвайта (Ins), на атоките видны многочисленные грани: а — сросток Pt-атокита с инсизвайтом; б — сросток атокита с Pt-атокитом. Здесь и далее изображение в отраженных электронах СЭМ LEO-1450

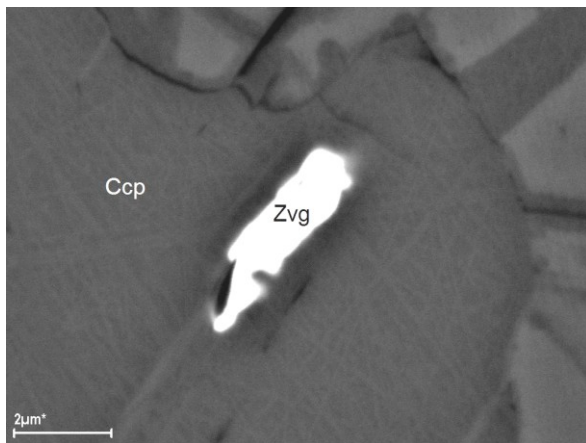


Рис. 2. Включение звягинцевита (Zvg) в халькопирите (Ccp)

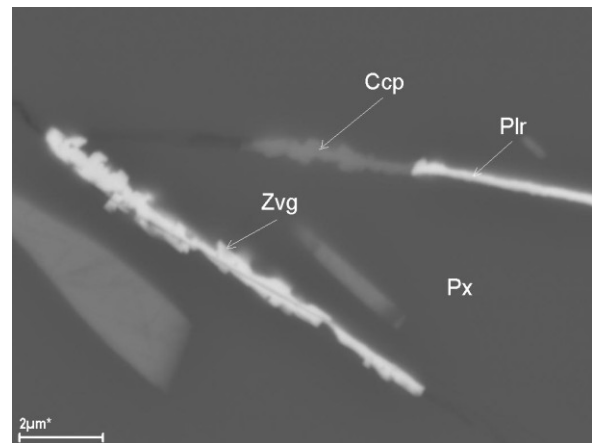


Рис. 3. Выделение звягинцевита (Zvg) полярита (Plr) и халькопирита (Ccp) в трещинах по пироксену (Px)

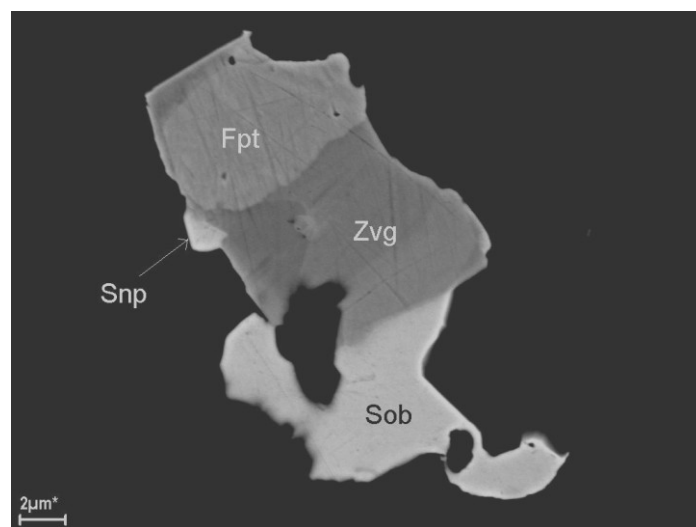


Рис. 4. Сросток звягинцевита (Zvg) с соболевскитом (Sob), тетраферроплатиной (Fpt) и станнопалладинитом (Snp). Видна неоднородность состава звягинцевита

Инсизваит $PtBi_2$ — встречается в виде включений в халькопирите (рис. 1, а) и в сростках с атокитом. Формы зерен неправильные, размеры до 6 мкм. Химический состав, мас. %: Pt — 28,0–29,91; Bi — 62,96–65,10; примеси: Pd — 2,16–4,80; Te — 4,97; Sn — 2,1.

Котульскит Pd (Te, Bi) — обнаружен в виде включений в халькопирите и борните (рис. 5). Размер зерен 1–2 мкм. Форма неправильная. Выделение котульскита приурочено к границе замещения халькопирита борнитом, возможно, отложение котульскита произошло в связи с этим событием. В химическом составе котульскита присутствует примесь Pt, Ag, Ni и Sb (табл. 1).

Майченерит PdBiTe — встречается в виде включений в халькопирите, в сростках с Au-серебром и галенитом (рис. 6). Форма зерен неправильная. Размеры зерен менее 2 мкм. Химический состав, мас. %: Pd — 21,47; Bi — 43,83; Te — 29,43; примеси: Pt — 2,15; Rh — 0,72; As — 1,11; Sb — 1,29.

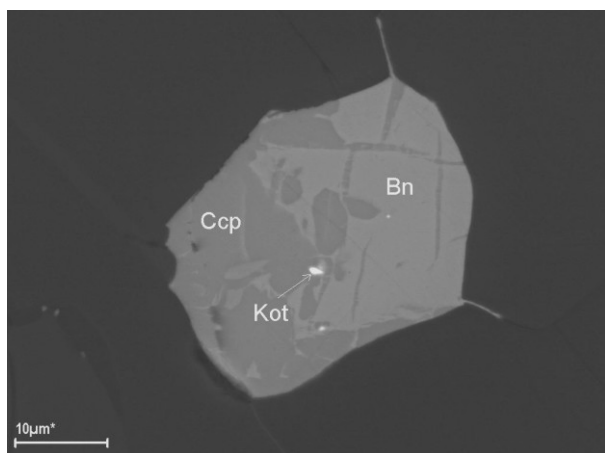


Рис. 5. Зерно котульскита (Kot) в халькопирите (Ccp) с борнитом (Bn)

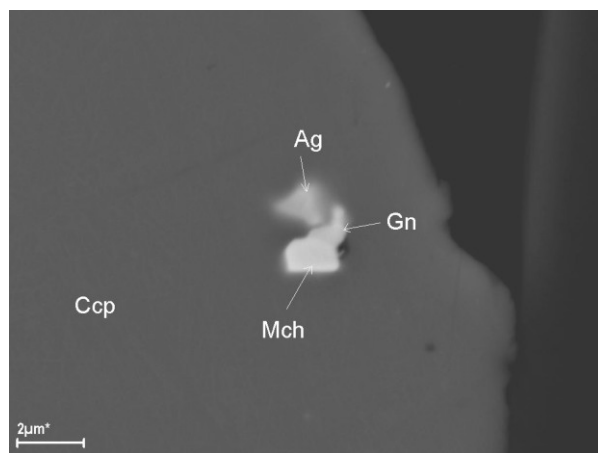


Рис. 6. Сросток майченерита (Mch) с Au-серебром (Ag) и галенитом (Gn) в халькопирите (Ccp)

Меренскиит (Pd, Pt) (Te, Bi)₂ — развит исключительно вне вкрапленников сульфидов, в трещинах, где ассоциирует с халькопиритом, пентландитом (рис. 7, 8). Форма зерен неправильная, чешуйчатая, угловатая, овальная, иногда с прямоугольными контурами, возможно, ограниченная. Размеры зерен преимущественно 1–2 мкм, отдельные зерна до 3 мкм, прожилки по длине до 10 мкм. В химическом составе характерна примесь никеля (табл. 1).

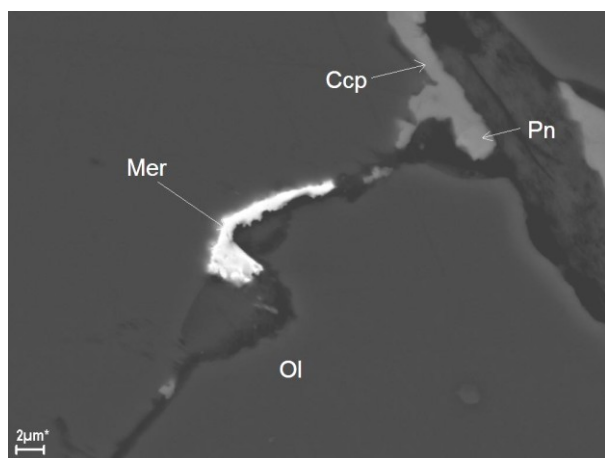


Рис. 7. Выделение меренскиита (Mer) в жилке с халькопиритом (Ccp) и пентландитом (Pn) по оливину (Ol)

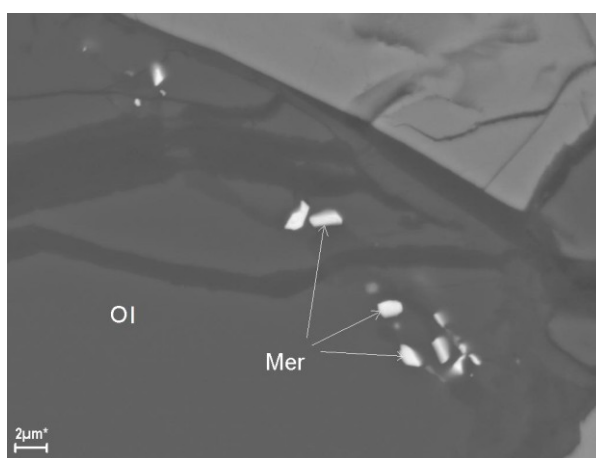


Рис. 8. Цепочка зерен меренскиита (Mer) в жилке позднего силиката по оливину (Ol)

Мончеит (Pt, Pd) (Te, Bi)₂ — встречается преимущественно в прожилках, пронизывающих породы с сульфидной вкрапленностью, редко образует включения на краю вкрапленников халькопирита. В прожилках ассоциирует с халькопиритом, алтаитом, гесситом (рис. 9, а) и минеральной фазой 1 (МФ-1) (рис. 9, б). Формы зерен линзовидные, чешуйчатые, пластинчатые. Размеры зерен до 4 мкм, прожилков до 10 мкм. Химический состав неустойчивый, присутствуют примеси Pd, Rh, Ir, Ag, Pb, Bi (табл. 1).

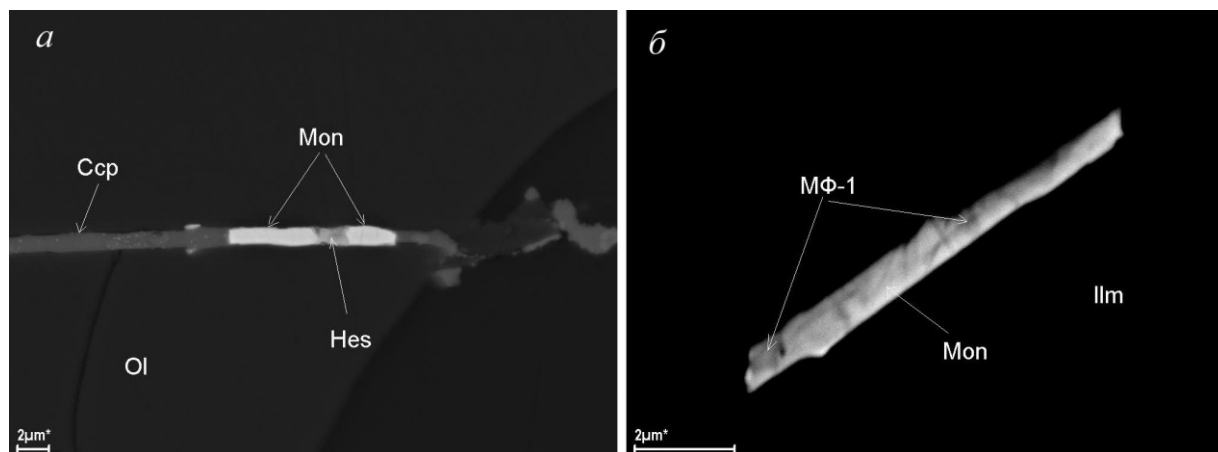


Рис. 9. Выделение мончеита (Mon) в прожилке: а — с халькопиритом (Ccp) и гесситом (Ges) по оливину (Ol); б — с минеральной фазой 1 (МФ-1) по ильмениту (Ilm)

Платина Pt — встречается в виде включений в халькопирите. Формы зерен неправильные (рис. 10, а). Размеры менее 2 мкм. Химический состав, мас. %: Pt — 92,68; Ni — 0,52; Sn — 6,8 (табл. 1).

Плюмбопалладинит Pd₃Pb₂ — встречается в виде включений в кубаните (рис. 10, б). За пределами вкрапленников не наблюдался. Размеры выделения менее 2 мкм. Форма зерна округлая, каплеобразная, с одной стороны плоская, примыкает к пластинке халькопирита. Выделение минерала произошло, вероятно, в период распада твердого раствора

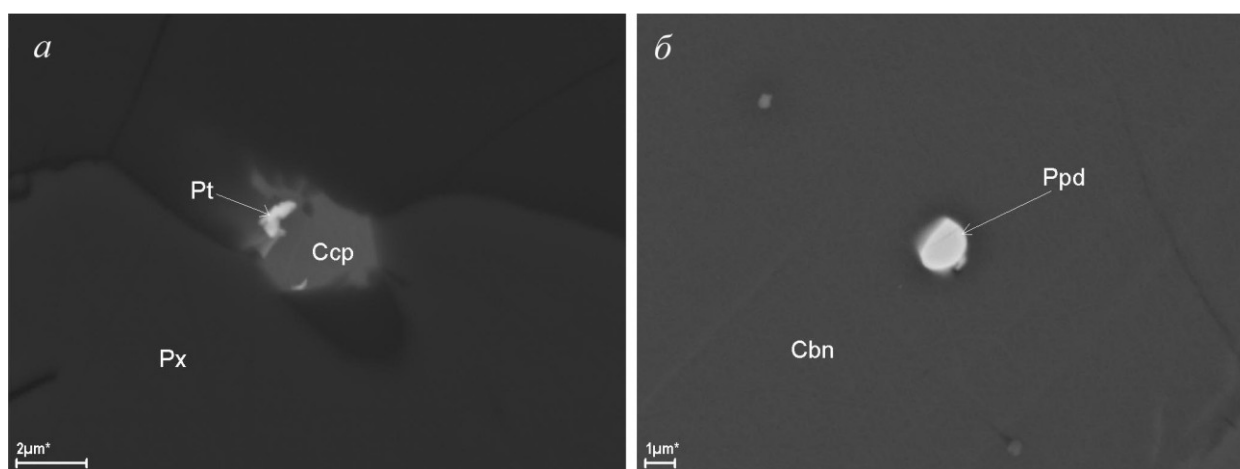


Рис. 10. Форма выделения: а — платины (Pt) с халькопиритом (Ccp) в пироксене (Px); б — плюмбопалладинита (Ppd) в кубаните (Cbn)

Паоловит Pd_2Sn — обнаружен в виде включения в кубаните, являющемся продуктом распада твердого раствора кубанит-халькопирит. Размеры зерна паоловита — 1×3 мкм, форма линзовидная (рис. 11). Химический состав, мас. %: Pd — 64,92; Sn — 35,08 (табл. 1).

Полярит $Pd(Bi, Pb)$ — встречается в жилках по трещинам, секущим титаномагнетитовую руду и вкрапленное сульфидное оруденение (рис. 3, 12), и во включениях в халькопирите. В жилках ассоциирует с поздним халькопиритом, во включениях — со станнопалладинитом. Размеры выделений полярита менее 2 мкм, в жилках — до 8 мкм.

Химический состав приведен в табл. 1, отмечается примесь Pb, Au и Hg.

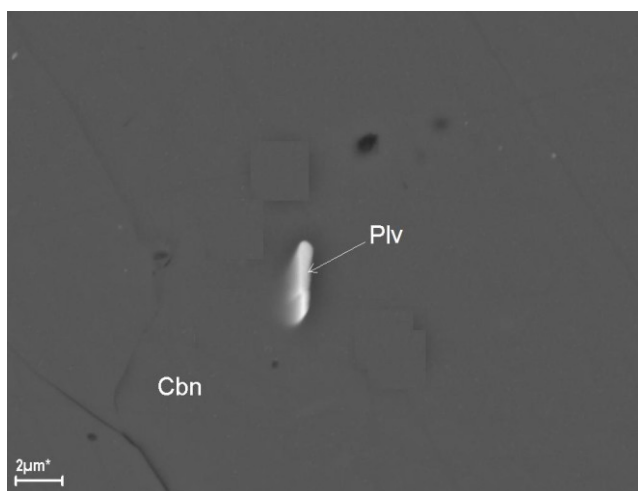


Рис. 11. Включение паоловита (Plv) в кубаните (Cbn)

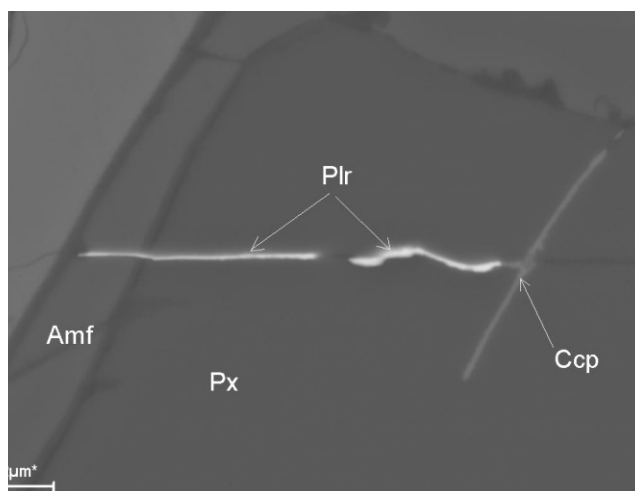


Рис. 12. Пржилки полярита (Plr) и халькопирита (Ccp) в трещинах, секущих пироксен (Px) и амфибол (Amf)

Соболевскит $PdBi$ — встречается часто в разных ассоциациях; образует жилки, секущие пироксен и титаномагнетит, вкрапления в халькопирите, клинопироксене и шпинели (рис. 13). Ассоциирует с купроауридом, звягинцевитом, тетраферроплатиной и фрудитом (рис. 4). Формы зерен в жилах — линзовидные, во вкрапленниках — изометрические неправильные, на отдельных видны плоские поверхности, возможно, грани.

Размеры зерен в основном меньше 1–2 мкм, единичные достигают 15–20 мкм, жилки до 7 мкм. Химический состав дан в табл. 1. Следует отметить большое число примесей Pt, Rh, Pb, Te, Sb, Sn, Hg.

Станнопалладинит Pd_2Sn_2Cu — развит во включениях в халькопирите, где он образует сложные комплексные сростки с звягинцевитом, тетраферроплатиной, соболевскитом (рис. 4) и поляритом (рис. 14). Непосредственные срастания наблюдаются с звягинцевитом и поляритом. Формы зерен изометрические, сложные, частично ограниченные. Размеры выделений — 2–5 мкм. В составе примеси Au и In (табл. 1).

Минеральные фазы (МФ) $(Pd, Pb, Bi)_{3+x}Te-(Pd, Pb, Ag)_{3+x}Te$. Среди минеральных фаз палладия выявлены необычные по составу фазы, в которых при постоянном содержании палладия, теллура и свинца наблюдается периодически висмут (МФ-1) или серебро (МФ-2) (табл. 1). При этом в висмутовой разновидности эпизодически присутствует серебро, а в серебряной — висмут, золото, платина и олово.

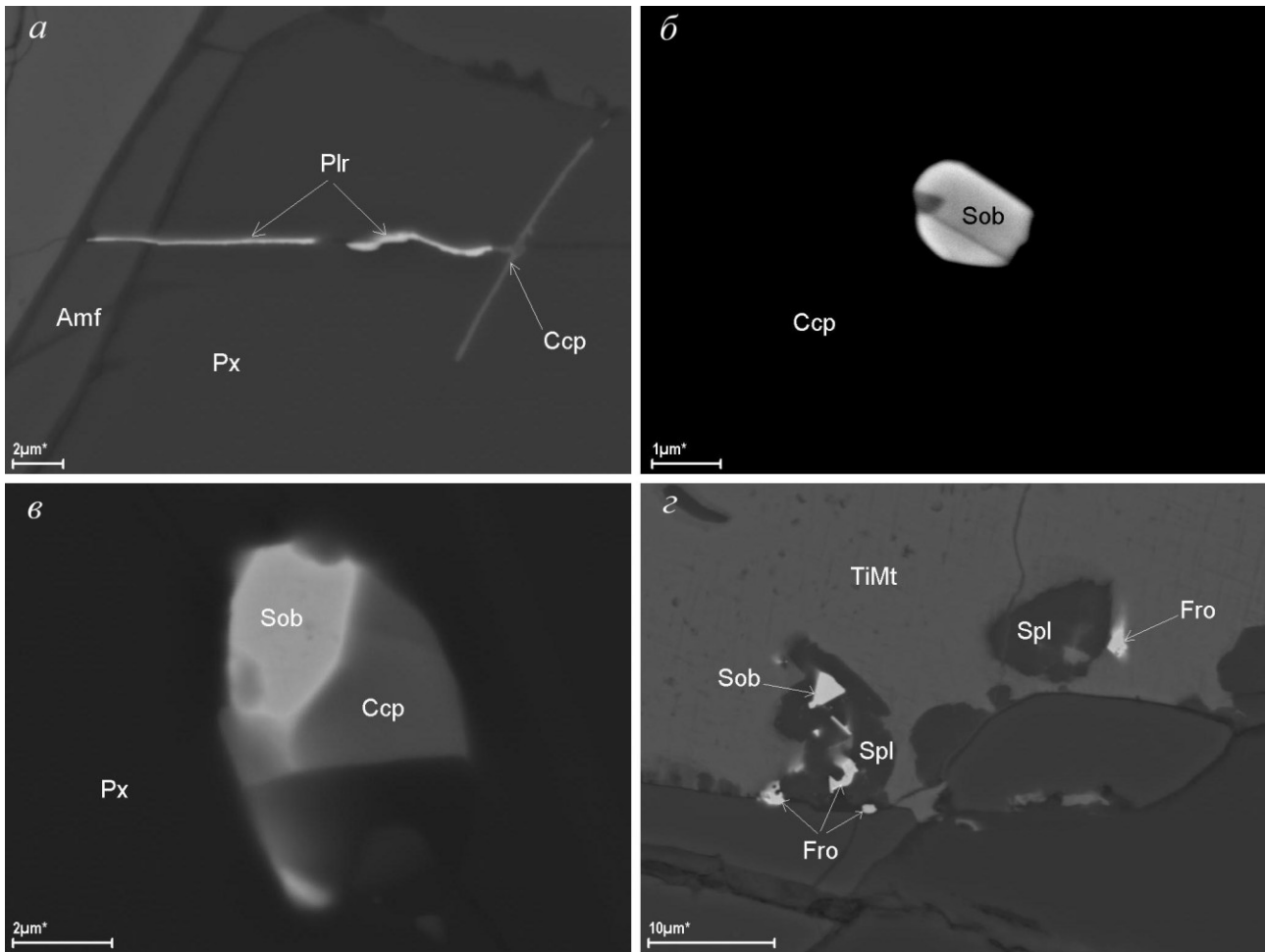


Рис. 13. Формы выделения соболевскита (Sob) в прожилке по титаномагнетиту (TiMt) (а) и во вкрапленниках: б — в халькопирите (Ccp), в — с халькопиритом в пироксене (Px), з — со шпинелью (Spl) и фрудитом (Fro) в титаномагнетите

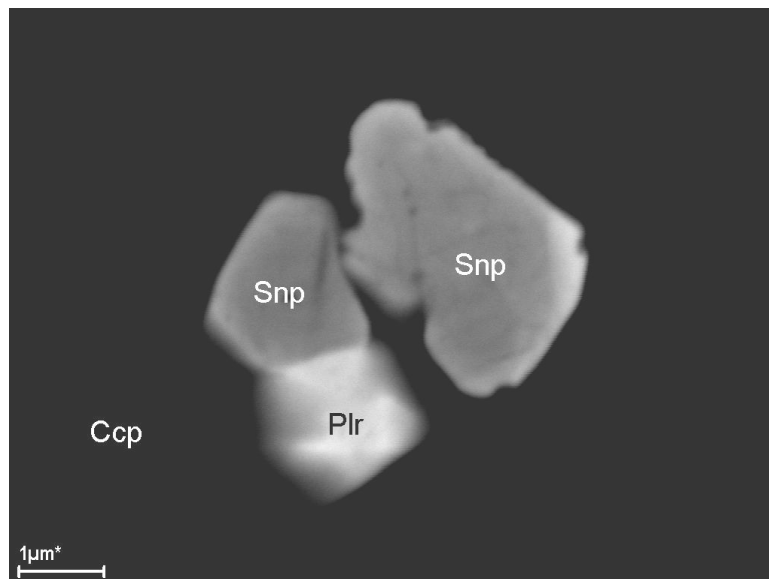


Рис. 14. Сrostок станнопалладинита (Snp) с поляритом (Plr) в халькопирите (Ccp)

Обе фазы встречаются часто и обычно образуют сростки между собой, в которых висмутовая фаза является более ранней. Приближенный расчет химического состава фаз наиболее удовлетворительно отвечает формулам $(Pd,Pb,Bi)_{3+x}Te$ или $(Pd, Pb, Ag)_{3+x}Te$. Выделение рассматриваемых фаз, как правило, контролируется трещинами, секущими силикатные минералы породы (рис. 15), но отложение происходило и в сульфидной вкрапленности. Зерна нередко ограненные, особенно при кристаллизации в сульфидах — халькопирите, кубаните и троилите. Встречаются изометрические (рис. 16) и таблитчатые кристаллы размером до 2–3 мкм. Преобладают сростки фаз в виде неправильных агрегатов, подчиненных структуре вмещающей полости (рис. 17, а). В сростках серебряная фаза нарастает на висмутовую, обрамляет ее (рис. 17, б); в свою очередь, на серебряную фазу нарастает Au-серебро. Рассматриваемые фазы требуют дальнейшего изучения.

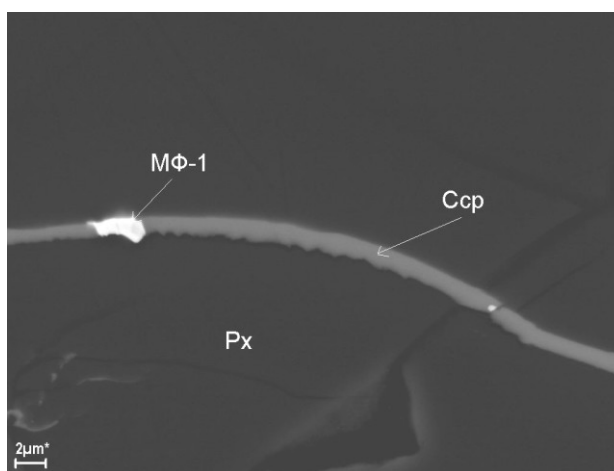


Рис. 15. Выделение минеральной фазы 1 (MФ-1) в жилке с халькопиритом (Ccp), секущей пироксен (Px)

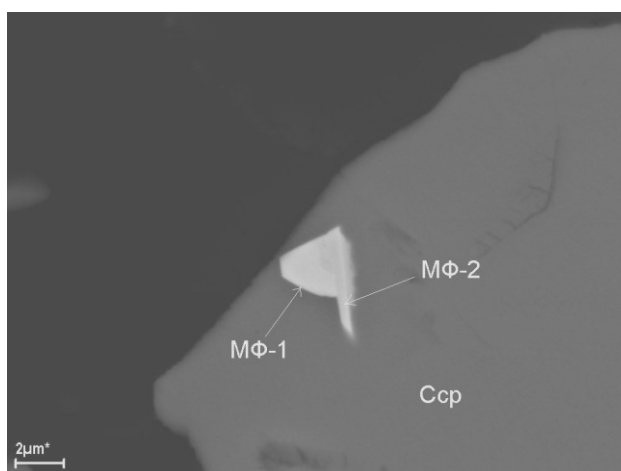


Рис. 16. Сросток минеральных фаз 1 и 2 (MФ-1 и MФ-2) в халькопирите (Ccp), видна огранка кристалла MФ-1

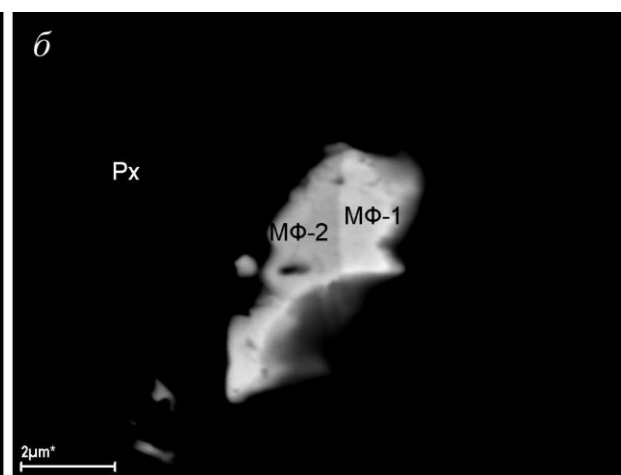
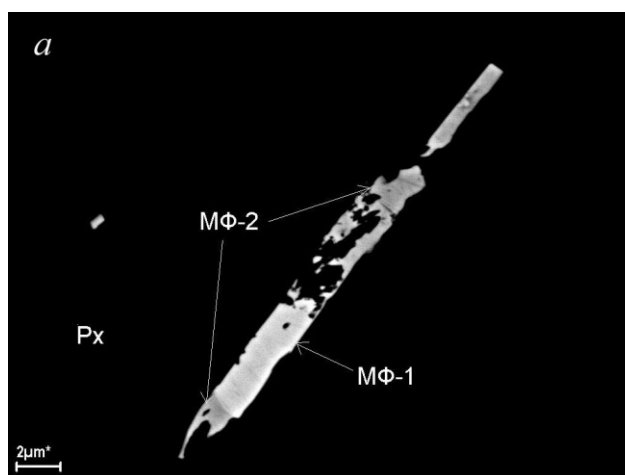


Рис. 17. Сросток минеральных фаз 1 и 2 (MФ-1 и MФ-2): а — в жилке по пироксену (Px); б — в пироксене (Px)

Тетраферроплатина PtFe — встречается в жилках по трещинам и во вкрапленниках сульфидов, в частности в халькопирите. В халькопирите тетраферроплатина присутствует в мономинеральных зернах и в сростках с звягинцевитом, соболевскитом и станнопалладинитом

(рис. 4; 18, *a*). В жилках по пироксену тетраферроплатина образует сростки с Pt-содержащим атоцитом (рис. 18, *б*). Формы зерен тетраферроплатины неправильные. Размеры зерен от 0,5 до 10 мкм. Химический состав приведен в табл. 1.

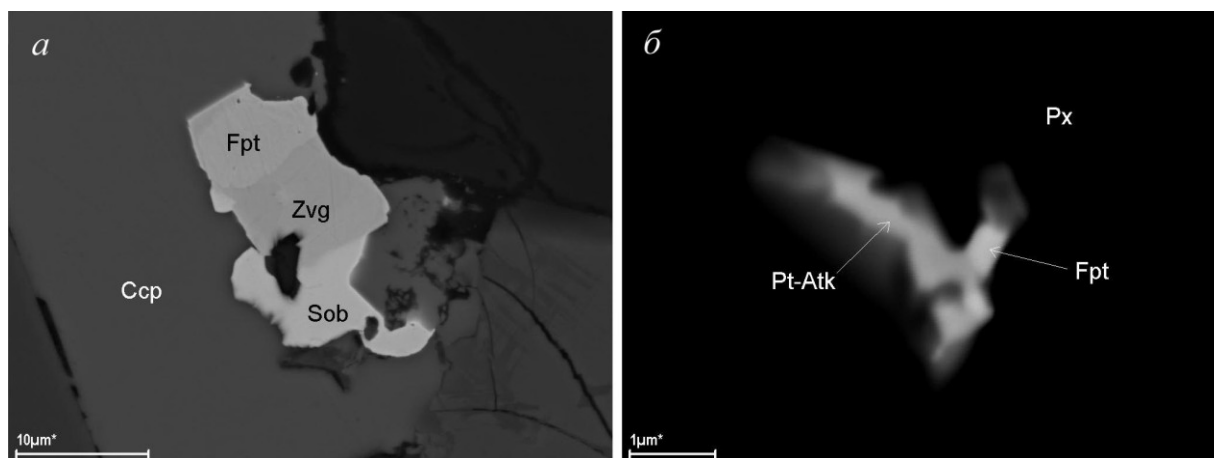


Рис. 18. Сросток тетраферроплатины (Fpt): *a* — с звыгинцевитом (Zvg) и соболевицитом (Sob) в халькопирите (Ccp); *б* — с Pt-содержащим атоцитом (Pt-Atk) в пироксене (Px)

Фрудит $PdBi_2$ — образует мелкие зерна в трещинах, секущих силикаты и титаномagnetит (рис. 19). Размеры зерен — менее 2 мкм, формы — неправильные, угловатые, линзовидные, пластинчатые, частично подчинены форме трещин, но также имеют и собственные формы роста в трещинах с замещением вмещающего минерала. Характерны цепочки зерен вдоль открытых и закрытых трещин. Ассоциирует с самородным висмутом, галенитом и акантитом. Отложение всей ассоциации произошло позднее распада твердого раствора титаномagnetита. Химический состав фрудита стабилен, эпизодически присутствует примесь Rh и Sn (табл. 1).

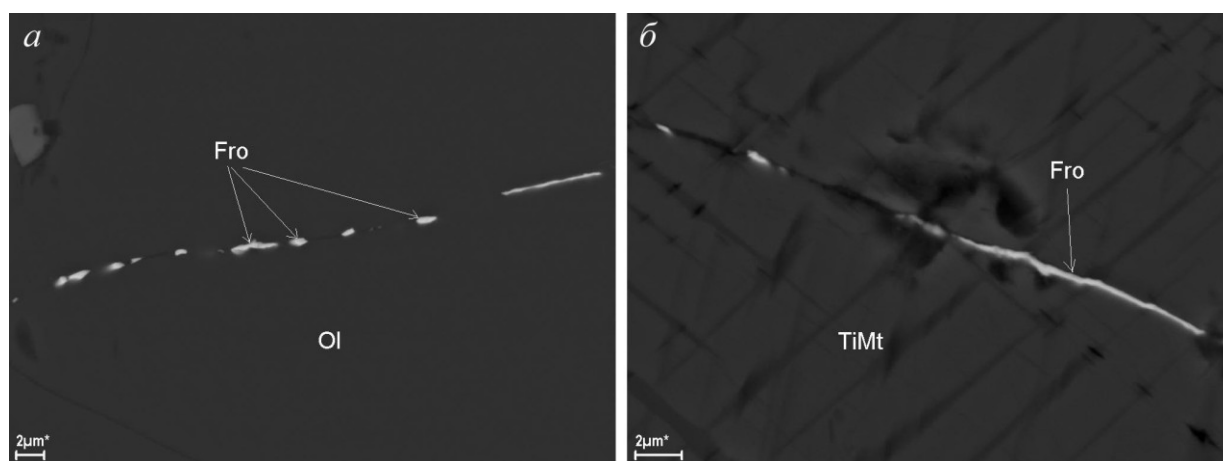


Рис. 19. Цепочки зерен фрудита (Fro) в прожилках по оливину (Ol) (*a*) и титаномagnetиту (TiMt) (*б*)

Минералы Ag и Au

Акантит Ag_2S — обнаружен в виде включения в сульфидном вкрапленнике в ассоциации с пирротинном, пентландитом и халькопиритом (рис. 20). Размеры выделения — до 5 мкм, формы — неправильные, с признаками замещения пирротина и пентландита. Химический состав близок стехиометрическому, мас. %: Ag — 88,39; S — 11,61 (табл. 2).

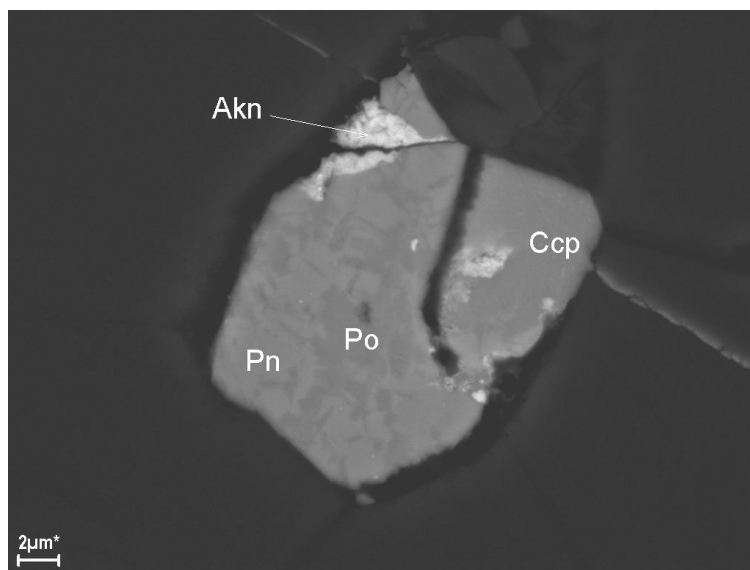


Рис. 20. Выделение акантита (Akn) в сульфидном вкрапленнике в ассоциации с пирротинном (Po), пентландитом (Pn) и халькопиритом (Ccp)

Таблица 2

Результаты исследования химического состава минералов Au и Ag

Минерал	Pd	Ag	Au	Fe	Cu	S	Te	Σ
Акантит	–	88,39	–	–	–	11,61	–	100
Тетрааурикуприд	13,01		57,96	–	29,00	–	–	99,97
Гессит	–	57,47	–	–	–	–	42,53	100
	–	62,64	–	–	–	–	37,36	100
	–	61,90	–	–	–	–	38,10	100
	–	61,12	–	–	–	–	38,88	100
	–	60,89	–	–	–	–	39,11	100
	–	59,57	–	–	–	–	40,43	100
	–	60,41	–	–	–	–	39,59	100
	–	60,22	–	–	–	–	39,78	100
	–	59,33	–	–	–	–	40,67	100
	–	61,31	–	–	–	–	38,69	100
Au-серебро	–	62,50	34,96	–	2,54	–	–	100
	–	73,58	26,42	–	–	–	–	100
	–	71,00	28,44	0,56	–	–	–	100
	0,40	73,55	26,05	–	–	–	–	100
	–	61,26	38,74	–	–	–	–	100
	–	69,97	30,03	–	–	–	–	100
	–	57,45	42,55	–	–	–	–	100
Эмпрессит	–	37,86	–	–	–	–	62,14	100

Купроаурид Cu_3Au — встречается в жилах, секущих пироксен (рис. 21), где ассоциирует с соболевскитом. По составу относится к Pd-содержащему купроауриду [9]). Формы зерен линзовидные, размеры по толщине линз — около 1 мкм, по удлинению — до 3 мкм. Химический состав, мас. %: Pd — 13,01; Au — 57,96; Cu — 29,0 (табл. 2).

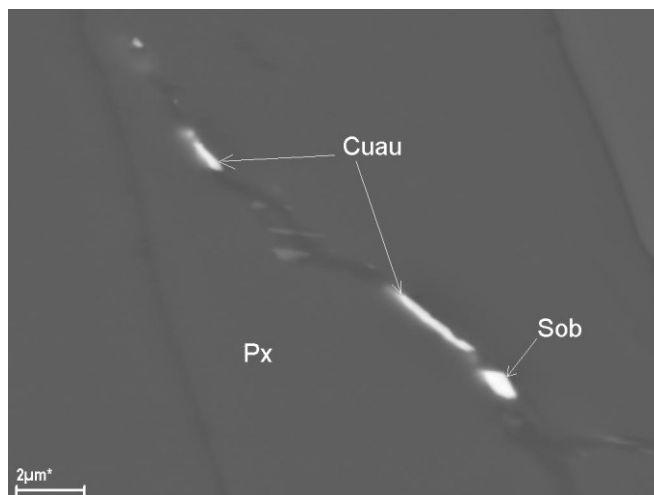


Рис. 21. Выделение купроаурида (Cuau) и соболевскита (Sob) в трещине по пироксену (Px)

Гессит Ag_2Te — один из наиболее часто встречающихся минералов серебра в титаномагнетитовых рудах. Наблюдается в жилах (рис. 22, а) и включениях в сульфидной вкрапленности (рис. 22, б). Часто находится в сростках с мончеитом, реже с Au-серебром и молибденитом. Выделения гессита ассоциируют с поздней генерацией сульфидов. Формы выделения гессита неправильные, округлые, линзовидные, характерны высыпки зерен вдоль трещин. Размеры выделений менее 6 мкм. Химический состав гессита представлен в табл. 2.

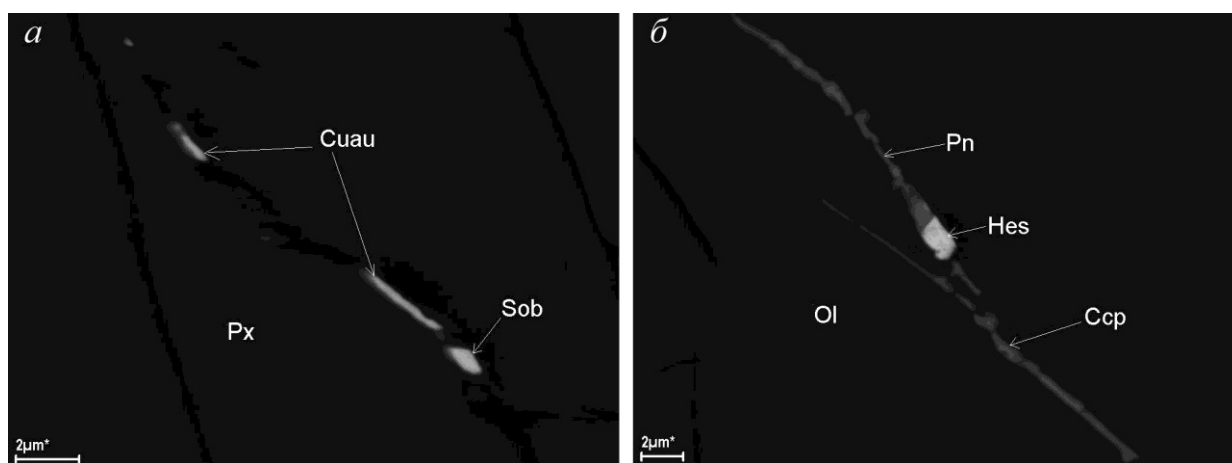


Рис. 22. Выделение гессита (Hes):

а — в жилке с халькопиритом (Ccp) и пентландитом (Pn) по оливину (Ol); б — в кубаните (Cbn)

Серебро Ag_3Au — с примесью золота от 26 до 42,5 % (табл. 2) распространено довольно широко. Выделялось одним из последних. Встречается чаще обособленно (рис. 23), реже в сростании с платиноидами, в частности с минеральной фазой 2, на которую нарастает (рис. 24). Размеры выделений серебра наиболее крупные из минералов БМ, достигают 20 мкм. Формы зерен овальные, эллипсовидные, иногда с признаками огранки. Серебро встречается в жилках по халькопириту и во вкрапленниках в кубаните, титаномагнетите и других минералах.

Эмпрессит AgTe — обнаружен в пироксене (рис. 25), в зоне гидротермального изменения с хлоритом. Размеры зерен эмпрессита — 1–2 мкм, формы — пластинчатые или таблитчатые. Химический состав, мас. %: Ag — 37,86; Te — 62,14 (табл. 2).

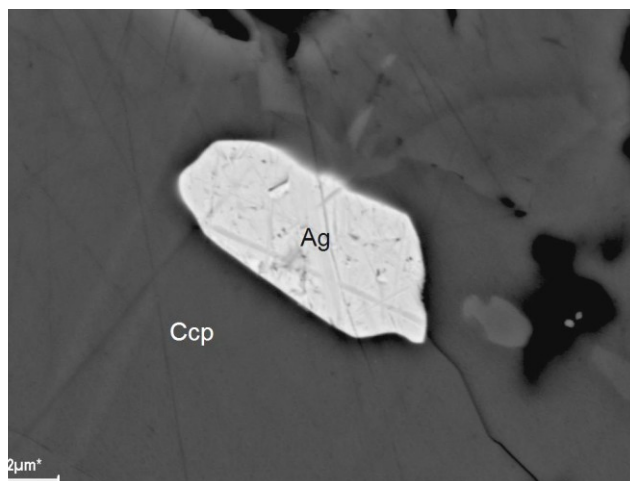


Рис. 23. Выделение серебра (Ag) в халькопирите (Ccp)

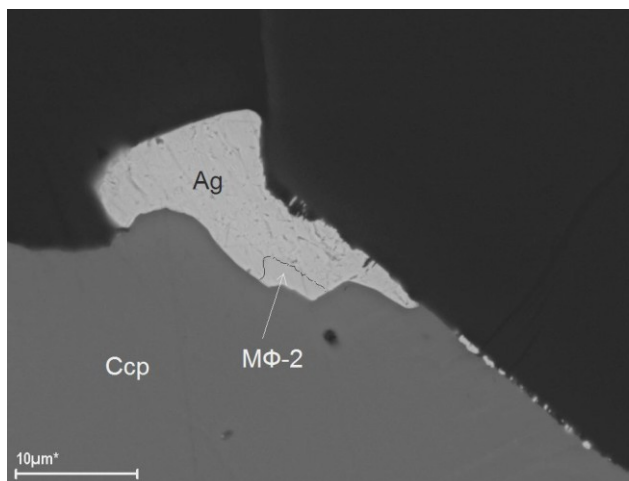


Рис. 24. Сrostок серебра (Ag) с минеральной фазой 2 (MФ-2)

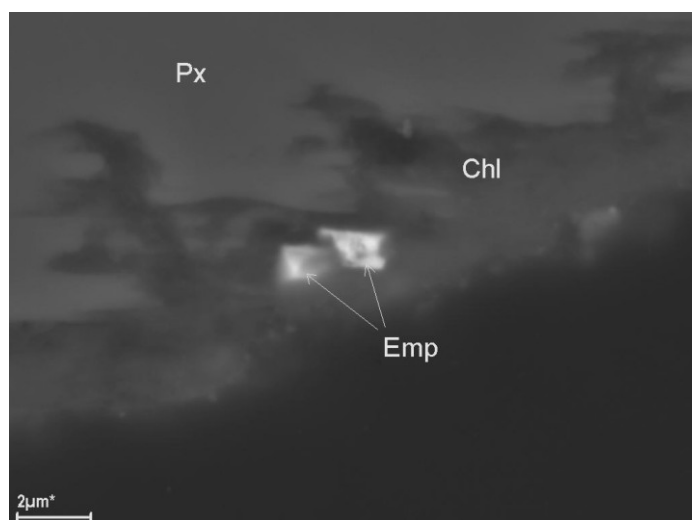


Рис. 25. Выделения эмпрессита (Emp) с хлоритом (Chl) в пироксене (Px)

Минералы с примесью благородных металлов

Примесь БМ обнаружена в двух редких сопутствующих минералах — алтаите PbTe (Pd — 0,81–0,94 мас. %; Pt — 2,91 мас. %) и иодиде свинца PbI₂ (Ag — 2,52 мас. %) (табл. 3).

Таблица 3

Результаты исследования химического состава редких минералов

Минерал	Pt	Pd	Ag	Pb	Se	Te	I	Σ
Алтаит	–	–	–	61,46	–	38,54	–	100
	–	0,94	–	62,54	1,67	34,85	–	100
	2,91	0,81	–	53,70	–	42,57	–	99,99
Иодид свинца	–	–	2,52	44,49	–	1,93	51,06	100
	–	–	–	57,75	–	–	42,25	100

Выводы

1. В титаномагнетитовых рудах Порьереченского комплекса развит необычно широкий спектр минералов благородных металлов, преимущественно Pd, Pt, Au и Ag. Наблюдается развитие разнообразных сочетаний элементов, видов минеральных фаз, высоких содержаний примесей в фазах, развитие парагенетических рядов с последовательным изменением химического состава минералов, присутствие в минералах ртути и иода. Эти особенности геохимии, в совокупности с морфологическими особенностями выделения минералов, свидетельствуют, вероятно, о проявлении гидротермального процесса в образовании наблюдаемой минеральной ассоциации и требуют дальнейшего исследования.

2. Ассоциация минералов платиновых металлов с титаномагнетитовыми рудами, по данным исследований А. Дж. Налдретта [10, 11], не характерна, но в последние годы появляется информация о более тесном сочетании таких минерализаций [6, 12] и выделении комплексных месторождений нового типа. Это позволяет отнести Колвицкое месторождение к таким месторождениям, в которых главный вид сырья — Fe-Ti-V-руды — сопровождается сингенетическим Cu-Ni-Co-оруденением и наложенной Pt-Pd-Au-Ag-минерализацией.

3. Таким образом, полученные данные подтверждают высокий потенциал титаномагнетитовых месторождений как комплексного сырья не только для получения Fe, Ti и V [13] но и цветных — Cu, Ni, Co, редких — Sc, Ga и благородных — Pt, Pd, Rh, Ir, Au, Ag металлов [14].

Благодарности

За помощь в полевых работах авторы благодарят коллег по Геологическому институту КНЦ РАН: А. В. Мокрушина, П. А. Серова, М. Г. Тимофееву.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юдин Б. А. Габбро-лабрадоритовая формация Кольского полуострова и ее металлогения. Л.: Наука, 1980. 169 с.
2. Беляев К. Д., Р. В. Карпов Геологические предпосылки поисковых работ на Кольском полуострове и новые направления их развития // Состояние и перспективы расширения минерально-сырьевой базы Северо-Запада РСФСР. Л.: Недра, 1973. С. 15–29.
3. Комплексные титаномагнетитовые руды Колвицкого месторождения (Кольский полуостров) / Ю. Л. Войтеховский [и др.] // Региональная геология, минералогия и полезные ископаемые Кольского полуострова: труды XIII Всерос. (с междунар. участием) Ферсмановской научной сессии, посвященной 50-летию Дня геолога (Апатиты, 4–5 апреля 2016 г.). Апатиты, 2016. С. 67–69.
4. Сульфидная минерализация в титаномагнетитовых рудах Колвицкого месторождения (Кольский полуостров) / Ю. Н. Нерадовский [и др.] // Наука и образование — 2014: материалы междунар. науч.-техн. конф. (Мурманск, 24–28 марта 2014 г.). 2014. С. 858–863. URL: <http://www.mstu.edu.ru/science/actions/conferences/files/nio-9.pdf>
5. Нерадовский Ю. Н. Исследование фазового состава титаномагнетита (на примере Колвицкого месторождения, Кольский полуостров) // Рациональное недропользование: сб. научн. тр. / под ред. С. Е. Гавришова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2014. С. 158–167.
6. Трофимов Н. Н., Голубев А. И. Пудожгорское благороднометалльное титаномагнетитовое месторождение. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 123 с.
7. Геология и вещественный состав комплексных титано-ванадиевых руд Колвицкого месторождения (Кольский полуостров) / Ю. Л. Войтеховский [и др.] // Месторождения стратегических металлов: закономерности размещения, источники вещества, условия и механизмы образования: материалы докл. Всерос. конф., посвященной 85-летию ИГЕМ РАН (Москва, 25–27 ноября 2015 г.). М.: ИГЕМ РАН, 2015. С. 180–181.
8. Минералы платиновых металлов и серебра в Порьереченском интрузивном комплексе с титаномагнетитовыми рудами (Кольский полуостров) / С. В. Бороздина [и др.] // Минералы: строение, свойства, методы исследования: материалы VII Всерос. молодеж. науч. конф. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2015. С. 14–15.
9. Сульфидные медно-никелевые руды Норильских месторождений / А. Д. Генкин [и др.]. М.: Наука, 1981. 234 с.
10. Налдретт А. Дж. Природа распределения и концентрации элементов платиновой группы в различных геологических средах // Доклады, 27-й МГК. Т. 10, Минералогия. М.: Наука, 1984. С. 10–27.
11. Налдретт А. Дж. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометалльных руд. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2003. 487 с.
12. New insights into the petrogenesis of the Jameson Range layered intrusion and associated Fe-Ti-P-V-PGE-Au mineralisation, West Musgrave Province, Western Australia. Mineralium Deposita / B. T. Karykowski [et al.]. 2016.

13. *Шабалин Л. И.* Титаномагнетитовые месторождения (геология, генезис, перспективы промышленного использования). Новосибирск: СНИИГГИМС, 2010. 174 с. 14. *Быховский Л. З., Пахомов Ф. П., Турлова М. А.* Комплексные руды титаномагнетитовых месторождений России — крупная минерально-сырьевая база черной металлургии // Разведка и охрана недр. 2007. № 6. С. 20–23.

Сведения об авторах

Нерадовский Юрий Николаевич — кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: nerad@geoksc.apatity.ru

Грошев Николай Юрьевич — кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: nikolaygroshev@gmail.com

Войтеховский Юрий Леонидович — доктор геолого-минералогических наук, директор Геологического института КНЦ РАН

E-mail: woyt@geoksc.apatity.ru

Бороздина Светлана Васильевна — аспирант, младший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: borozdina.svetlana@bk.ru

Савченко Евгений Элланович — инженер Геологического института КНЦ РАН

E-mail: evsav@geoksc.apatity.ru

Author Affiliation

Yury N. Neradovsky — PhD (Geology & Mineralogy), Leading Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: nerad@geoksc.apatity.ru

Nikolay Yu. Groshev — PhD (Geology & Mineralogy), Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: nikolaygroshev@gmail.com

Yury L. Voytekhovsky — Dr. Sci. (Mineralogy & Crystallography); Director of Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: woyt@geoksc.apatity.ru

Svetlana V. Borozdina — Post-graduate, Junior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: borozdina.svetlana@bk.ru

Evgeny E. Savchenko — Engineer at the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: evsav@geoksc.apatity.ru

Библиографическое описание статьи

О минералах платины, палладия, серебра и золота в Порьереченском титаноносном комплексе (Кольский полуостров) / *Ю. Н. Нерадовский [и др.]* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 3 (9). — С. 71–87.

Reference

Neradovsky Yury N., Groshev Nikolay Yu., Voytekhovsky Yury L., Borozdina Svetlana V., Savchenko Evgeny E. Minerals of Platinum, Palladium, Argentinum and Gold of the Por'yerechensky Titan-Bearing Complex (Kola Peninsula). *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 3 (9), pp. 71–87. (In Russ.).

УДК 552.08:550.42

НОВЫЕ ДАННЫЕ

О СТРОЕНИИ И СОСТАВЕ АРХЕЙСКОГО КОМПЛЕКСА РАЗРЕЗА СГ-3*

Ю. Н. Яковлев, А. К. Яковлева, П. А. Серов

ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

Аннотация

Предложена новая модель строения архейской части разреза СГ-3 (6,84–12,26 км), включающая шесть различно ориентированных блоков, из которых верхние пять имеют мощность 500–1200 м, а шестой вскрыт только в его верхней части на протяжении 11,70–12,26 км. Дана характеристика двух разновидностей гнейсов, слагающих около 60 % разреза архейского комплекса, и существенно амфиболовых пород, представленных амфиболитами и гипербазитами. Первые сложены биотит-плагиоклаз-роговообманковыми породами с примесью граната, кварца, куммингтонита и других минералов, а вторые — тальк-флогопит-актинолитовыми породами, иногда с антофиллитом и куммингтонитом. Оценена степень рудоносности этих групп пород. Показано, что для гнейсов и амфиболитов существуют два тренда эволюции неодима, причем данные по амфиболитам свидетельствуют о большей гетерогенности их вещества, что коррелирует с их минералогическими особенностями.

Ключевые слова:

Кольская сверхглубокая скважина, архейские гнейсы, амфиболиты, гипербазиты, Sm-Nd-модельный возраст.

NEW DATA ON THE STRUCTURE AND COMPOSITION OF THE SD-3 SECTION ARCHAEOAN COMPLEX

Yury N. Yakovlev, Antonina K. Yakovleva, Paul A. Serov

Geological Institute of the KSC of the RAS

Abstract

A new model of the composition of the Archaean part of the SD-3 section (6,84–12,26 km) has been suggested. It includes six differently oriented blocks, with the top five being as thick as 500–1200 m, and the sixth one being stripped only in its top for 11,70–12,26 km. Two varieties of gneisses have been characterized. They comprise about 60 % of the Archaean section and mostly amphibole rocks, represented by amphibolites and ultrabasic rocks. The former are composed of biotite-plagioclase-hornblende rocks with admixed garnet, quartz, cummingtonite and other minerals; the latter comprise talc-flogopite-actinolite rocks, sometimes with anthophyllite and cummingtonite. The ore-bearing capacity of the rock groups has been estimated. Two trends of the neodymium evolution for gneisses and amphibolites are shown. Data on the amphibolites testify to high heterogeneity of their matter, which corresponds with their mineralogical features.

Keywords:

Kola Superdeep Borehole, Archaean gneisses, amphibolites, ultrabasic rocks, Sm-Nd model age.

Введение

Кольская сверхглубокая скважина (СГ-3) вскрыла большую часть разреза Печенгской протерозойской структуры (0–6842 м) и значительный интервал подстилающего архейского комплекса (6842–12262 м). Расчленение разреза протерозойского комплекса большинством

* Работа выполнена в рамках темы госзадания № 0231-2015-0005.

исследователей рассматривается практически однозначно: в нем выделяются те же свиты вулканогенных и осадочных пород, что и на поверхности структуры, за исключением самых верхних свит, которые не вошли в разрез СГ-3 из-за ее расположения [1–3].

Иначе обстоит дело с расчленением архейской части разреза. Первоначально в ней выделялись семь чередующихся свит гнейсов с высокоглиноземистыми (кианит, силлиманит и др.) и гнейсов с высококальциевыми (амфибол, эпидот и др.) минералами [1]. Но уже в 1991 г. архейская часть разреза была разделена на десять тех же чередующихся толщ гнейсов, образующих пять ритмов [2], что отражено в монографии [3].

По породам архейского комплекса были пройдены четыре ствола СГ-3 из-за аварийных ситуаций, возникавших в процессе бурения. Их проекции на вертикальную плоскость показаны на рис. 1. В целом все стволы СГ-3 ограничивают участок архейского комплекса в виде четырехгранной пирамиды с вершинами на отметках 7,2–7,4 и 9,6–9,8 км и основаниями на отметках 11,9–12,2 км.

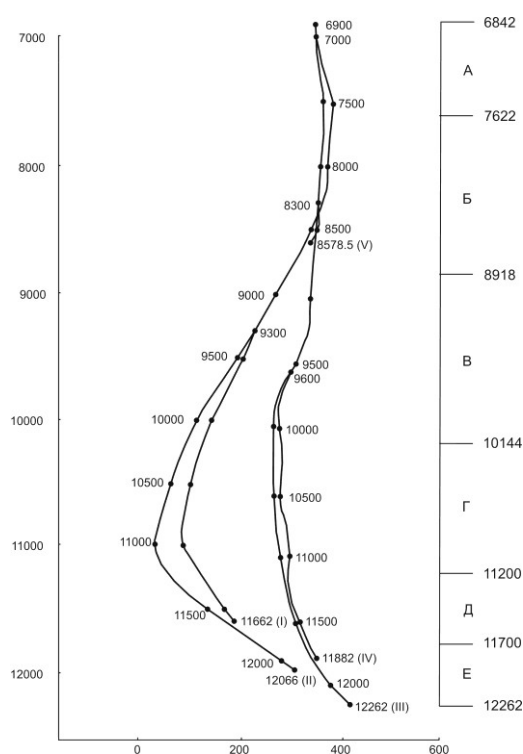


Рис. 1. Проекция основных стволов СГ-3 на вертикальную плоскость (по материалам научно-производственного центра «Кольская сверхглубокая»), азимут 90–270°, А–Е — блоки пород

Новые данные о расчленении архейской части разреза СГ-3

Существующее расчленение архейского комплекса [1, 2], по мнению авторов настоящей статьи, имеет ряд серьезных недостатков, главными из которых являются следующие:

а) принятые подразделения, или толщи, обладают несопоставимой мощностью, варьирующей от 1800 до 117 м: первая, вторая, четвертая, восьмая и десятая имеют соответственно 780, 1834, 671, 810 и 550 м, а третья, пятая, шестая, седьмая и девятая — всего 117, 134, 170, 153 и 297 м. Кроме того, во второй и восьмой толщах, сложенных гнейсами с высококальциевыми минералами, присутствуют интервалы гнейсов с высокоглиноземистыми минералами, мощность которых составляет 80–230 м, а более мелкие (20–30 м) прослои разнородных гнейсов наблюдаются во всех толщах;

б) не учитывается содержание амфиболитов, количество которых на отдельных участках разреза варьирует от 12–15 до 60–80 % их мощности, составляя в среднем по разрезу около 30 %;

в) не принимаются во внимание элементы залегания пород, о чем можно судить по проекциям траектории стволов [4] (рис. 1), на что указывает Ф. Ф. Горбацевич [3, гл. 10].

К сожалению, истинное положение четвертого ствола СГ-3 (т. е. зенитный угол и азимут) измерено только до глубины 11 500 м [5], поэтому его окончание на рис. 1 показано условно. Примечательно, что проекции третьего и четвертого стволов СГ-3, проходившихся с постоянными приемами их стабилизации, принципиально сходны с таковыми первого и второго стволов, но имеют значительно меньшее отклонение от вертикали [4]. Очевидно, что все это свидетельствует о неоднородном, вернее, блоковом строении архейского комплекса разреза.

Как известно, при проходке 1-го и 2-го стволов СГ-3 технические приемы их стабилизации почти не применялись [1], поэтому при разбуривании протерозойского комплекса разреза (0,0–6,8 км) ствол скважины отклонялся в северо-восточном направлении, т. е. по нормали к господствующему залеганию пород (согласно принципу Ж. Кюри [6]). В архейском комплексе ствол скважины неоднократно отклонялся от вертикали, о чем свидетельствуют его проекции на горизонтальную плоскость [4]. Так, проекции 1-го и 2-го стволов имеют почти прямоугольный контур, вытянутый в северо-западном направлении с размерами примерно 460×200 м, характерно, что проекции 4-го и 5-го стволов, проходившихся с постоянными приемами стабилизации, очень сходны с таковыми двух первых стволов, но имеют значительно меньшие размеры.

Во всех предыдущих работах по СГ-3 практически всеми исследователями архейской части ее разреза отмечалось своеобразное строение самой нижней толщи ниже глубины 11 708 м («диоритовый» слой В. С. Ланева, амфиболит-тоналит-плаггиогранитный комплекс (АТПК) В. Р. Ветрина, рудная минерализация Ю. Н. Яковлева и Ю. Н. Нерадовского, изменение упругих характеристик пород Ф. Ф. Горбацевича и др. [3]). Поэтому сейчас авторы статьи пришли к выводу о том, что эту часть разреза (11 708–12 262 м) по 3-му стволу следует выделить в качестве самостоятельного интервала, нижняя граница которого осталась неустановленной. Точная ее проекция на горизонтальную плоскость также не определена, так как полный комплекс измерений траектории проведен только по 1-му стволу до глубины 11 500 м, а далее кавернозность и зенитный угол измерялись по 2- и 3-му стволам. Оба эти параметра в нижней части оказались очень высокими: размеры каверн составили 220–260 × 410–470 мм, а зенитный угол — 8°30'–11°30' [7].

Таким образом, архейский комплекс разреза СГ-3, по нашим, данным состоит из шести блоков (А-Е) (табл. 1). Характеристика первых четырех из них остается прежней [7], пятый блок имеет мощность 500 м, шестой — 562 м (табл. 1). Пятый блок характеризуется отклонением 2-го и 3-го стволов к юго-востоку, преобладающие породы — гнейсы с высококальциевыми минералами, маломощные пласты железистых кварцитов и различных существенно амфиболовых пород (в том числе и апогипербазитовых). Шестой блок сложен комплексом пород АТПК, включающим гранитоиды, биотит-плаггиоклазовые гнейсы, амфиболиты различного состава, формационная принадлежность которых не определена.

В совокупности блоки архейского комплекса образуют две пары: с одной стороны, блоки А и Г, с другой — блоки В и Д. Простираение пород в каждой паре блоков примерно одинаковое, а падение — противоположное. Так, в первой паре блоков простираение пород СЗ-ЮВ, а падение в первом блоке (А) на ЮЗ, в четвертом (Г) — на СВ. Но в первом блоке простираение и падение пород невыдержанные, что связано, вероятно, с неоднородным его строением и нахождением на контакте двух комплексов. В третьем и пятом блоках (В и Д) простираение пород близко

к СВ — субмеридиональному, а падение в третьем блоке ЮВ, в пятом — СЗ (табл. 2). Что же касается второго блока, то он имеет элементы залегания пород, промежуточные между I и III блоками, т. е. простираение пород СВ-ЮЗ, а падение — ЮВ [7]. Своеобразное положение имеет четвертый блок (Г), включающий 5–7-ю и часть 8-й толщи прежнего разделения архейского комплекса [2]: он повернут более чем на 90° по отношению к выше- и нижележащему блокам (В и Д). Элементы залегания пород в нем таковы: простираение ЮВ 110–120°, падение СВ 30–40° (табл. 2).

Таблица 1

Расчленение архейского комплекса в разрезе СГ-3

Ритм	Элемент	Толща	Интервал/ мощность	Блок	Интервал/ мощность	Содержание амфиболитов в блоках, %
I	1	1	6842–7622/780	А (I)	6842–7622/780	12–15
	2	2	7622–9456/1834			
II	1	3	9456–9573/117	Б (II)	7622–8918/1296	25–30
	2	4	9573–10144/671			
III	1	5	10144–10278/134	В (III)	8918–10144/1226	40–42
	2	6	10278–10448/170			
VI	1	7	10448–10601/151	Г (IV)	10144–11200/1056	20–25
	2	8	10601–11411/810			
V	1	9	11411–11708/297	Д (V)	11200–11700/500	35–37
	2	10	11708–12262/554	Е (VI)	11700–12262/562	?

Примечание. Столбцы 1–4 — по [2], 5–7 — настоящая работа.

Таблица 2

Параметры блоков архейской части разреза СГ-3

Блок	Глубина, м	Простираение пород, град.	Падение пород, град
А (I)	6842–7622	ЮВ 120–135	ЮЗ 185–195
Б(II)	7622–8918	СВ 60–70	ЮВ 100–110
В(III)	8918–10144	СВ 35–45	ЮВ 110–130
Г (IV)	10144–11200	ЮВ 110–120	СВ 30–40
Д (V)	11200–11700	СВ 30–40	СЗ 310–315
Е (VI)	11700–12262	?	?

Косвенным свидетельством в пользу нового расчленения архейской части разреза служат ранее известные факты, а именно:

- 1) наличие двух максимумов отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$, соответствующих второму и четвертому блокам;
- 2) наличие зон накопления Au и Ag, а также U в четвертом блоке;
- 3) повышенные концентрации Ni и Co в пирите и пирротине из Cu-Ni-руднения в апогипербазитах второго блока;
- 4) особенности параметров упругой анизотропии пород четвертого блока, свидетельствующие о тектонической природе его границ.

Примечательно, что все эти факты изложены в последней монографии о СГ-3 [3, гл. 2, 4, 10], но там они не нашли своего объяснения.

Основные особенности состава пород архейского комплекса СГ-3

В архейской части разреза СГ-3 (6,84–12,26 км) преобладают гнейсы и мигматиты по ним (60–63 %), значительно меньшую долю составляют амфиболиты различного состава (30–32 %), гипербазиты (1–2 %), а также пегматиты и гранитоиды (не более 1–3 %) [1–3]. В большинстве работ гнейсы и амфиболиты разделяются на несколько разновидностей по минеральному и химическому составу. В начале исследований разреза архейского комплекса мы выделяли около десятка разновидностей амфиболовых пород по их минеральному составу, но вскоре пришли к выводу об излишне детальном их расчленении, так как многие разновидности, являясь фациальными или жильными, слабо распространены в разрезе [2, 4]. В настоящее время существенно амфиболовые породы (апобазитовые) мы разделяем на три группы: биотит-плагиоклаз-, гранат-клинопироксен- и клинопироксен-куммингтонит-роговообманковые. Первые преобладают, составляя до 15–20 % мощности архейского комплекса, и распространены по всему разрезу, но в основном в верхних частях блоков Б-Г. Обладают неотчетливой слоистостью, невыдержанным минеральным составом: часто встречаются эпидот, гранат (табл. 3). Структура гранобластовая и гранонематобластовая, текстура линейно-сланцеватая и гнейсовидная; на контактах слоев часто наблюдаются явления катаклаза и рассланцевания, здесь обычно увеличивается содержание биотита. Содержание рудных минералов обычно невелико (1–2 %); они представлены пирротинном и халькопиритом, которые часто замещаются пиритом и магнетитом [2].

Таблица 3

Минеральный состав амфиболовых пород архейского комплекса СГ-3

Минеральный состав	Амфиболиты	Гипербазиты	Минеральный состав	Амфиболиты	Гипербазиты
Роговая обманка	20–60	–	Биотит	1–20	–
Актинолит	ед. зн. — 5	10–70	Флогопит	–	5–30
Куммингтонит	0–20	1–20	Тальк	–	3–15
Антофиллит	ед. зн.	5–30	Эпидот	ед. зн. — 1	–
Плагиоклаз	10–40	–	Сфен	ед. зн. — 5	–
Кварц	0–10	–	Магнетит	ед. зн. — 5	ед. зн. — 2
Клинопироксен	0–10	–	Ильменит	ед. зн. — 10	ед. зн. — 1
Гранат	ед. зн. — 10	–	Сульфиды	ед. зн. — 2	ед. зн. — 7

Амфиболиты второй группы составляют 7–10 % мощности разреза архейского комплекса и по содержанию рудных минералов разделяются на две разновидности. Первая, наиболее распространенная, образует тела мощностью до 50–60 м с резкими секущими контактами с вмещающими гнейсами. Текстура обычно массивная, структуры — от реликтовых габбро-до бластоофитовых. Рудная минерализация оксидно-сульфидная (1–3 %): пирротин, пирит, халькопирит, иногда встречается борнит и в виде единичных зерен — пентландит; среди оксидов чаще встречается ильменит и иногда магнетит. Вторая разновидность представлена одним телом в третьем блоке (интервал 8 712–8 737 м), содержащим повышенное количество оксидов (5–7 % магнетита и 7–10 % ильменита) и небольшое (3–5 %) — сульфидов (пирротина и халькопирита).

Клинопироксен-куммингтонитовые разновидности распространены в верхних частях архейского комплекса разреза, составляя 2–3 % его мощности. В пятом блоке (Д) они часто мигматизированы, содержат жилы гранитных пегматитов. Содержание рудных минералов обычно невелико — 1–3 %, представлены пирротинном, халькопиритом, иногда замещающими их магнетитом и ильменитом.

Тальк-флогопит-антофиллит-актинолитовыми образованиями, часто зональными, представлены апогипербазиты. Подавляющая их часть сосредоточена в верхней половине разреза, где мощность составляет от 1–2 до 15–18 м; ниже встречаются значительно реже, их мощность там составляет 3–5 м, они часто пересечены жилами гранитных пегматитов. Текстуры пород — сноповидные, радиально-лучистые, структуры — лепидонематобластовые, птигматитовые. Рудная минерализация разнообразная, син- и эпигенетическая, оксидно-сульфидная (1–3, иногда до 7 %). Сульфиды включают: пирротин, пентландит, халькопирит; встречаются и многие редкие минералы (зигенит, миллерит, борнит, галенит, сфалерит, аргентопентландит и др.), магнетит и ильменит (табл. 3). По строению тел и рудоносности эти породы из СГ-3 близки гипербазитовым массивам северного обрамления Печенгской структуры и некоторым телам Аллареченского района (уч. Акким, Хихна и др.). Из всех амфиболовых пород архейского комплекса СГ-3 тальк-флогопит-антофиллит-актинолитовые отличаются наиболее высокой магнезиальностью (более 70 %), низкой титанистостью и низкой глиноземистостью, благодаря чему на всех диаграммах образуют компактные поля, изолированные от других групп пород [2].

Результаты химического анализа (табл. 4) показывают, что амфиболиты по сравнению с гнейсами обладают несколько пониженными содержаниями некоторых элементов, но повышенными Ni, Co, Cr, V. Гипербазиты отличаются низкими содержаниями Sr, Zn, Nb, Th, U и резко повышенными Ni, Cr, отчасти Co.

В целом четкой зависимости содержания элементов от типа амфиболовых пород (за исключением гипербазитов), как это имеет место для гнейсов, в разрезе СГ-3 не наблюдается. Поэтому можно сказать о том, что по содержанию всех элементов в разрезе СГ-3 выделяется только две группы преимущественно амфиболовых пород — собственно амфиболиты и гипербазиты.

Изотопно-геохронологические (возрастные U-Pb, модельные Sm-Nd) характеристики пород архейской части разреза СГ-3

Геохронологическая изученность

Определение возраста архейских пород разреза СГ-3 проводилось неоднократно различными исследователями [3, 8, 9]. Наиболее древний U-Pb-возраст установлен Е. Бибиковой в 1993 г. для гнейсов третьего блока (или 4-й толщи прежнего разделения разреза) — он составил 2933 ± 54 млн лет [8]. Многочисленные определения возраста гнейсов нижней части разреза (глубже 11 км) выполнены В. Р. Ветриным с соавторами [3]. Согласно этим данным, максимальный возраст гнейсов составил 2,80–2,83 млрд лет.

В последние годы детальное изучение возраста архейских пород разреза СГ-3, а также Печенгской структуры и ее обрамления, проводилось в лаборатории геохронологии и геохимии изотопов ГИ КНЦ РАН под руководством Т. Б. Баяновой, основные результаты которого опубликованы в 2007 г. [9]. Согласно полученным данным, U-Pb- и Pb-Pb-возрасты гнейсов архейской части разреза СГ-3 находятся в диапазоне 2,56–2,81 млрд лет, а для амфиболитов получены U-Pb-возраста, близкие 2,7 млрд лет.

Таблица 4

Химический состав пород архейского комплекса СГ-3

Компонент	Номер пробы																						
	Гнейсы										Амфиболиты										Гипербазиты		
	СГ/41	СГ/31	СГ/33	СГ/16	СГ/13	СГ/14	СГ/14	СГ/34	СГ/33	СГ/21	СГ/15	СГ/18	СГ/17	СГ/12	СГ/39	СГ/38	СГ/36	СГ/40	СГ/36а	СГ/27			
SiO ₂	62,40	54,63	51,83	51,0	51,36	55,87	48,19	55,36	52,29	49,09	47,31	47,90	50,82	48,34	48,54	46,88	49,32	52,68	53,69				
TiO ₂	0,62	1,56	2,24	0,32	0,51	1,29	0,87	0,86	1,85	1,83	3,64	2,85	1,62	1,41	2,58	1,98	0,30	0,21	0,25				
Al ₂ O ₃	14,62	13,25	12,75	17,71	17,16	13,40	7,98	14,58	13,71	13,54	8,74	8,72	13,69	14,65	12,50	6,75	6,60	3,50	5,59				
Fe ₂ O ₃	0,97	2,73	1,96	1,64	2,09	2,74	1,97	1,69	2,07	4,38	3,34	2,92	3,45	2,77	5,51	3,30	2,03	1,87	1,50				
FeO	5,42	11,88	12,38	6,68	7,71	9,47	9,91	8,24	9,45	10,28	11,87	11,36	9,56	10,46	10,12	10,92	7,28	9,96	6,43				
MgO	0,12	0,32	0,22	0,16	0,17	0,19	0,19	0,16	0,23	0,23	0,20	0,27	0,23	0,22	0,24	0,21	0,18	0,23	0,17				
MnO	3,46	4,22	5,27	7,78	7,42	4,52	17,31	6,25	5,81	5,78	9,51	10,29	5,83	5,43	4,03	17,75	20,44	23,78	21,00				
CaO	5,88	5,82	9,49	9,05	8,60	7,35	6,98	5,91	9,10	9,84	9,53	9,57	8,69	9,90	8,79	6,02	6,82	2,78	4,37				
Na ₂ O	3,85	0,78	0,72	1,97	1,93	1,83	0,41	1,26	2,46	1,88	1,67	0,68	2,19	1,94	1,74	0,49	0,21	0,23	0,26				
K ₂ O	1,18	1,86	0,45	0,49	1,03	0,81	2,55	2,24	1,17	0,45	0,75	1,61	1,01	1,13	1,48	2,74	3,67	1,37	2,03				
H ₂ O	0,08	0,06	0,04	0,02	0,08	0,04	0,14	0,10	0,08	0,06	0,04	0,10	0,02	0,14	0,10	0,10	0,21	0,12	0,13				
H ₂ O ⁺	1,20	1,54	1,47	1,29	0,86	1,16	2,41	1,88	1,46	1,46	1,78	2,26	0,51	1,88	2,30	1,17	2,02	2,58	3,37				
P ₂ O ₅	0,06	0,21	0,16	0,07	0,10	0,18	0,08	0,41	0,15	0,12	0,26	0,23	0,16	0,10	0,27	0,17	0,06	0,00	0,03				
S _{общ}	<0,01	0,10	0,06	0,05	0,02	0,09	0,01	0,04	0,01	0,12	0,16	0,11	0,06	<0,01	0,17	0,24	0,06	0,25	0,06				
F	0,08	0,070	0,062	0,016	0,025	0,055	0,110	0,310	0,068	0,037	0,082	0,130	0,053	0,015	0,089	0,057	0,130	0,034	0,110				
Cl	0,02	0,005	0,030	0,009	0,020	0,037	0,021	0,022	0,004	0,018	0,009	0,008	0,012	0,019	0,050	0,004	0,012	0,004	0,007				
Ni	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,01	0,01	0,11	0,01	0,01	<0,01	0,03	0,04	<0,01	<0,01	<0,01	0,11	0,10	0,12	0,12				
Co	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01				
Cu	<0,01	0,02	0,02	<0,01	0,01	0,01	0,012	0,01	0,02	0,016	0,02	0,019	0,019	0,022	0,032	0,027	0,012	0,01	0,00				
Zn	0,01	<0,01	0,01	0,01	0,011	0,013	0,021	0,014	0,01	0,015	0,015	0,02	0,015	0,015	0,016	0,016	0,015	0,015	0,01				
Li ₂ O	0,006	0,010	0,001	0,0025	0,0037	0,0025	0,0110	0,032	0,0041	0,0014	0,0036	0,0033	0,0040	0,0033	0,013	0,0082	0,0049	0,0059	0,0036				
Rb ₂ O	0,007	0,011	0,0007	0,0020	0,0057	0,0031	0,019	0,025	0,0044	0,0010	0,0036	0,0087	0,0042	0,0047	0,0070	0,015	0,015	0,0080	0,0079				
CO ₂	—	0,19	0,10	0,15	0,20	0,35	0,39	0,27	0,11	0,09	0,30	0,00	1,28	0,00	0,77	0,24	0,09	0,09	0,14				
StrO	0,18	0,28	0,27	0,32	0,30	0,33	0,18	0,18	0,30	0,28	0,31	0,29	0,30	0,17	0,19	0,16	0,22	0,17	0,26				
Cr ₂ O ₃	0,11	<0,05	0,007	0,018	0,018	<0,005	0,28	0,006	0,018	0,017	0,11	0,16	0,019	0,015	0,010	0,23	0,28	0,34	0,21				
V ₂ O ₅	<0,008	0,071	0,049	<0,025	0,028	0,000	<0,025	0,037	0,053	0,080	0,063	0,072	0,052	0,057	0,055	0,035	0,025	<0,025	0,042				
Сумма	99,67	100,02	99,59	99,56	99,67	99,81	99,69	99,90	100,24	99,61	99,75	99,62	99,60	99,69	99,60	99,62	100,08	100,19	99,70				

Аналитические методы

Измерения изотопного состава неодима и концентраций Sm и Nd проводились на 7-канальном твердофазном масс-спектрометре Finnigan-MAT 262 (RPQ) в статическом двухленточном режиме с использованием рениевых и танталовых лент [10]. Погрешность изотопного состава неодима в стандарте La Jolla, равная $0,511851 \pm 17$ ($N = 20$), за период измерений не превышала 0,004 % (2σ), а в индивидуальном анализе — до 0,006 %. Ошибка в $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ -отношениях составляет 0,3 % (2σ). Холостое внутрилабораторное загрязнение по Nd равно 0,3 нг, по Sm — 0,06 нг. Изотопные отношения были нормализованы по отношению $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,7219$, а затем пересчитаны на принятое отношение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в стандарте La Jolla = 0,511860. При расчете величин $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ и модельных возрастов $T_{(\text{DM})}$ использованы современные значения CHUR по [11] ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,512638$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0,1967$) и DM по [12] ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,513151$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0,2136$).

Результаты Sm-Nd-исследований

По разрезу архейского комплекса СГ-3 было исследовано 15 проб гнейсов, 17 проб амфиболитов различного состава и 1 проба гипербазитов из наиболее крупного блока (табл. 5). Этими пробами охарактеризован весь разрез архейского комплекса до глубины 12 198 м. Максимальный модельный Sm-Nd-возраст для гнейсов первого типа составляет 2 880–2 937 млн лет, второго типа — 2893–3002 млн лет, для амфиболитов — 2894–2938 млн лет, для гипербазитов — 3148 млн лет.

Таблица 5

Изотопные Sm-Nd данные для гнейсов, амфиболитов и гипербазитов разреза СГ-3

Образец	Глубина, м	Содержание, мкг/г		Изотопные отношения		U-Pb-возраст, млн лет [9]	$\epsilon_{\text{Nd}}(T)$	$T_{(\text{DM})}$, млн лет	Блок
		Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Гнейсы									
СГ-3/1	8969-8989	2,480	18,430	0,0813	0,510965±12	1900	-4,5	2382	А
СГ-3/3	9480-9509	3,520	20,700	0,1028	0,510942±8	2600	-1,7	2890	В
СГ-3/5	10148-10150	3,880	22,800	0,1026	0,510942±26	2500	-2,8	2885	В
СГ-3/7	10477-10494	3,300	18,810	0,1060	0,511019±11	2570	-1,6	2866	Г
СГ-3/9 ^а	11413-11416	1,090	5,860	0,1126	0,511099±9	2400	-4,1	2937	Д
СГ-3/9 ^б	11562-11568	3,840	22,90	0,1014	0,510932±28	2400	-3,9	2866	Д
СГ-3/2 ^а	8008-8009	2,660	18,340	0,0859	0,510618±22	2705	-0,2	2893	Б
СГ-3/2 ^б	8230,4	1,360	7,870	0,1043	0,510938±15	2705	-1,1	2938	Б
СГ-3/2 ^в	9013	0,510	2,950	0,1039	0,511020±9	2705	+0,7	2809	В
СГ-3/4	10002-10007	1,420	9,110	0,0943	0,510778±13	2750	0,0	2893	В
СГ-3/6	10287-10290	1,960	13,500	0,0873	0,510560±18	2724	-2,2	3002	Г
СГ-3/8 ^а	10615-10620	1,930	11,060	0,1064	0,510952±10	2550	-3,3	2982	Г
СГ-3/8 ^б	10939-10945	0,880	5,170	0,1026	0,510894±8	2550	-3,2	2952	Г
СГ-3/10 ^а	11916-11917	1,670	13,130	0,0768	0,510445±18	2766	+0,1	2891	Д
СГ-3/10 ^б	12180-12193	13,300	92,600	0,0868	0,510369±24	2766	-5,2	2887	Е

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Амфиболиты									
СГ-19	6950-6956	4,260	19,440	0,1327	0,511807±9	1900	-0,6	2315	А
СГ-20	7499-7529	3,090	15,450	0,1210	0,511399±11	1900	-5,7	2703	А
СГ-15	7638-7656	4,850	19,420	0,1529	0,512015±5	2814	+3,7	2499	Б
СГ-16	7957-7967	1,230	6,530	0,1139	0,511152±14	2814	+0,9	2894	Б
СГ-13	8440-8452	1,260	5,910	0,1294	0,511554±8	2814	+3,1	2702	Б
СГ-11	8755-8767	3,760	18,640	0,1220	0,511453±5	2814	+1,9	2648	В
СГ-26	8864-8881	3,270	12,280	0,1609	0,512133±3	2814	+2,2	2631	В
СГ-21	9133-9145	4,160	18,950	0,1327	0,511743±16	2814	+4,0	2440	В
СГ-22	9167-9174	2,710	11,170	0,1465	0,511968±6	2814	+3,8	2431	В
СГ-17	9265-9271	6,550	30,600	0,1295	0,511793±5	2370	-1,3	2250	В
СГ-18	9524-9535	7,720	36,100	0,1293	0,511759±6	2700	-1,9	2307	В
СГ-12	10098-10120	4,400	21,300	0,1253	0,511630±3	2700	-2,8	2434	Г
СГ-24	11323-11337	2,920	12,430	0,1418	0,511893±6	2500	+3,1	2432	Г
СГ-23	11337-11351	2,660	12,740	0,1263	0,511444±7	2490	-0,7	2793	Д
СГ-28	11424-11433	5,510	23,400	0,1425	0,511883±11	2490	-1,9	2477	Д
СГ-14	11474-11499	4,460	21,200	0,1272	0,511385±7	2737	-0,3	2938	Д
СГ-25	11708-11752	5,830	27,400	0,1284	0,511688±12	2771	-2,4	2414	Е
Гипербазиты									
СГ-27	8021-8035	1,530	7,060	0,1312	0,511352±11	2814	-1,5	3148	Б

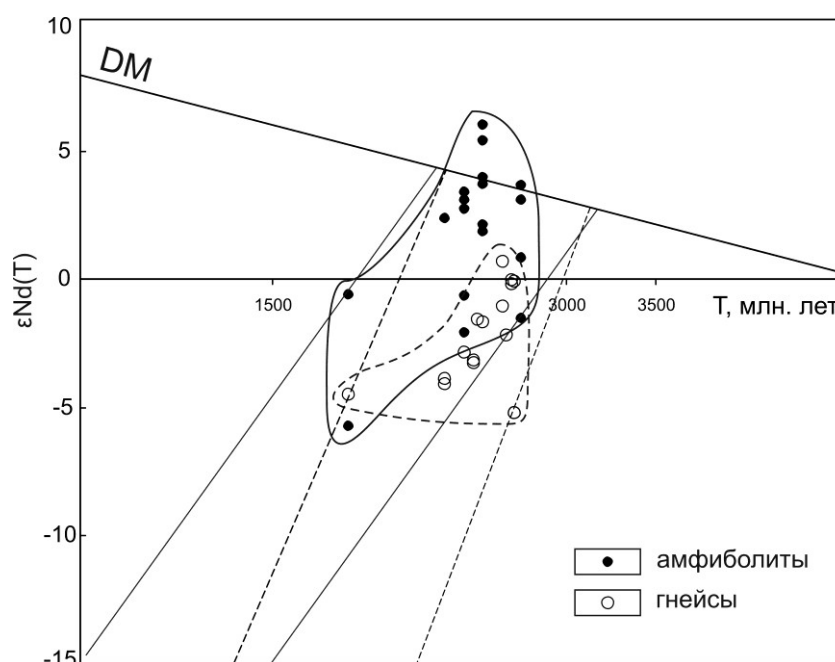


Рис. 2. Диаграмма $\epsilon Nd-T$ для амфиболитов и гнейсов архейской части разреза СГ-3

Анализ диаграммы $\epsilon Nd-T$ показывает (рис. 2), что амфиболиты и гнейсы СГ-3 образуют две перекрывающиеся области изотопного состава неодима. При этом величины $\epsilon Nd(T)$ для гнейсов образуют более компактное облако и варьируют от +0,7 до -5,2. Это может свидетельствовать о большей гетерогенности вещества амфиболитов СГ-3 в результате метаморфической переработки. Однако диапазон модельных возрастных характеристик

для амфиболитов и гипербазитов значительно шире (2,0–3,1 млрд лет), и не исключено, что амфиболиты с модельным возрастом менее 2,7 млрд лет относятся к дайковым образованиям, о чем свидетельствует и более «свежий» облик многих из них.

Заключение

1. Предложена новая модель строения архейской части разреза СГ-3 (6842–12262 м), включающая шесть различно ориентированных блоков мощностью 500–1200 м. Блоки первый и четвертый, а также третий и пятый попарно имеют близкое простирание пород, но отличаются их противоположным падением. Параметры шестого блока не определены.

2. Выделены минералогические разновидности амфиболовых пород, слагающих более 30 % мощности архейского комплекса; показано, что по химическому составу они различаются очень слабо.

3. Гипербазиты разреза существенно различаются от амфиболитов как по минеральному, так и по химическому составам.

4. Показаны различные тренды эволюции изотопного состава неодима для гнейсов и амфиболитов, свидетельствующие о большей изотопной неоднородности вещества последних.

Авторы благодарят рецензента за замечания к рукописи, позволившие улучшить структуру статьи, устранить существенные недоработки и тем самым повысить качество представляемого к опубликованию материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козловский Е. А. Кольская сверхглубокая. Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины. М.: Недра, 1984. 373 с. 2. Архейский комплекс в разрезе СГ-3 / ред. Ф. П. Митрофанов. Апатиты, 1991. 186 с. 3. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований / Н. П. Лаверов, В. П. Орлов. М., 1998. 257 с. 4. Яковлев Ю. Н., Скуфьин П. К., Чвыков О. С. Влияние природных факторов на траекторию и форму стволов Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) // Вестник Кольского научного центра РАН. 2014. № 3. С. 8–15. 5. Интрузивное тело риодацитовых порфиров в разрезе пород раннепротерозойского Печенгского комплекса Кольской сверхглубокой скважины / Ф. П. Митрофанов [и др.] // ДАН. 2001. Т. 380, № 4. С. 540–544. 6. Шафрановский И. И. Симметрия в природе. Л.: Недра, 1968. 184 с. 7. Геолого-геохронологическое расчленение архейского комплекса в разрезе Кольской сверхглубокой скважины / Ю. Н. Яковлев [и др.] // Общие вопросы расчленения докембрия: материалы III Всерос. совещания. Апатиты, 2000. С. 284–287. 8. Геохронология и корреляция нижней части разреза Кольской сверхглубокой скважины / Е. В. Бибикина [и др.] // ДАН. 1993. Т. 332, № 3. С. 360–363. 9. Изотопные исследования возраста пород архейской части разреза Кольской сверхглубокой скважины, протерозойской Печенгской структуры и ее обрамления / Т. Б. Баянова [и др.] // Отечественная геология. 2007. № 4. С. 23–33. 10. Серов П. А. Возрастные рубежи формирования платинометалльного оруденения Федорово-Панского расслоенного интрузива по Sm-Nd и Rb-Sr изотопным характеристикам: дис. ... канд. геол.-мин. наук. Воронеж, 2008. 130 с.

Сведения об авторах

Яковлев Юрий Николаевич — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

Яковлева Антонина Константиновна — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

Серов Павел Александрович — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: serov@geoksc.apatity.ru

Author Affiliation

Yuri N. Yakovlev—PhD (Geology & Mineralogy), Senior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

Antonina K. Yakovleva — PhD (Geology & Mineralogy), Senior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

Paul A. Serov — PhD (Geology & Mineralogy), Senior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS
E-mail: serov@geoksc.apatity.ru

Библиографическое описание статьи

Яковлев, Ю. Н. Новые данные о строении и составе архейского комплекса разреза СГ-3 / *Ю. Н. Яковлев, А. К. Яковлева, П. А. Серов* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 3 (9) — С. 88–98.

Reference

Yakovlev Yuri. N., Yakovleva Antonina K., Serov Paul A. New Data on the Structure and Composition of the SD-3 Section Archaean Complex. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 3 (9), pp. 88–98. (In Russ.).

УДК 551.464

**КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СВОЙСТВ
ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ПОДКИСЛЕНИЯ
ОКЕАНИЧЕСКИХ ВОД ИЗ-ЗА РОСТА ПРОЦЕНТНОГО СОДЕРЖАНИЯ CO₂
В АТМОСФЕРЕ**

Х. Г. Асадов, С. А. Аскерова

Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика

Аннотация

Хорошо известно, что в результате поглощения антропогенного CO₂ океаническими водами снижается pH океанических вод, концентрация карбонатных ионов, а также уменьшается насыщенное состояние биологически важных минералов — кальцита и арагонита, что представляется как окисление океанических вод. Анализ соответствующей научно-технической литературы позволил обнаружить противоречие в качественной характеристике зависимости pH поверхностных океанических вод от географической широты. В результате выполненного модельного исследования получена обратная нелинейная зависимость между pH и географической широтой. Проведенное теоретико-модельное исследование показало наличие минимума в функциональной зависимости линейно-взвешенной суммы теоретических и полученной модельной величин pH от географической широты. Приведено экспериментальное подтверждение этого вывода.

Ключевые слова:

поглощение, окисление, океанические воды, географическая широта, модель, функционал, оптимизация.

**QUALITATIVE ANALYSIS OF EXTREME FEATURES OF SPATIAL DISTRIBUTION OF LEVEL
OF OCEANS WATER ACIDIFICATION DUE TO INCREASE OF PERCENTAGE OF CO₂
IN ATMOSPHERE**

Hikmet H. Asadov, Sima A. Askerova

National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic

Abstract

It is well known that due to absorption of anthropogenic CO₂ by ocean water the PH of ocean water decreases. At the same time the concentration of carbonate ions, the saturated condition of biologically significant minerals calcite and aragonite which in total is presented as acidification of oceans water. The carried out analysis of scientific-technical literature make it possible to reveal the contradiction in qualitative characteristics of dependence of PH of ocean water on geographic latitude. As a result of held model research the inverse non-linear dependence between pH and geographical latitude is derived. The carried out model research does show the presence of minimum in functional dependence of linearly weighted sum of model values of PH on geographic latitude. The experimental confirmation of this regularity is given.

Keywords:

absorption, acidification, ocean water, geographic latitude, model, functional, optimization.

Согласно работе [1], антропогенная деятельность начиная с промышленной революции в XVIII в. привела к увеличению концентрации CO_2 в атмосфере от 280 до 387 ppm. При этом половина этого роста произошла в последние три десятилетия. Увеличение концентрации CO_2 в атмосфере сопровождается ростом температуры атмосферы. Океан в течение индустриальной эры поглотил почти четверть суммарной антропогенной эмиссии углекислого газа, что позволило несколько снизить его концентрацию в атмосфере [2]. Вместе с тем, при поглощении антропогенного CO_2 океаническими водами происходят определенные химические реакции, вследствие чего уменьшается:

а) pH океанических вод;

б) концентрация карбонатных ионов (CO_3^{2-});

в) насыщенное состояние биологически важных минералов CaCO_3 — кальцита (Ω_{Ca}) и арагонита (Ω_{Ar}), что в сумме обозначается как «подкисление океанических вод» [3].

К настоящему времени показатель pH океанических поверхностных вод уже уменьшился на 0,1 и продолжает снижаться со скоростью $0,0018 \text{ год}^{-1}$ [4]. Ожидается, что к концу XXI в. концентрация CO_2 в атмосфере достигнет 200 ppm [5], в результате чего pH поверхностных вод снизится еще на 0,3. Согласно работе [1], процесс увеличения концентрации CO_2 в атмосфере может быть описан регрессионным уравнением:

$$y = 1,811x - 3252,4,$$

где y — концентрация CO_2 в атмосфере (ppm); x — годы.

При этом уменьшение pH соответствует регрессионному уравнению

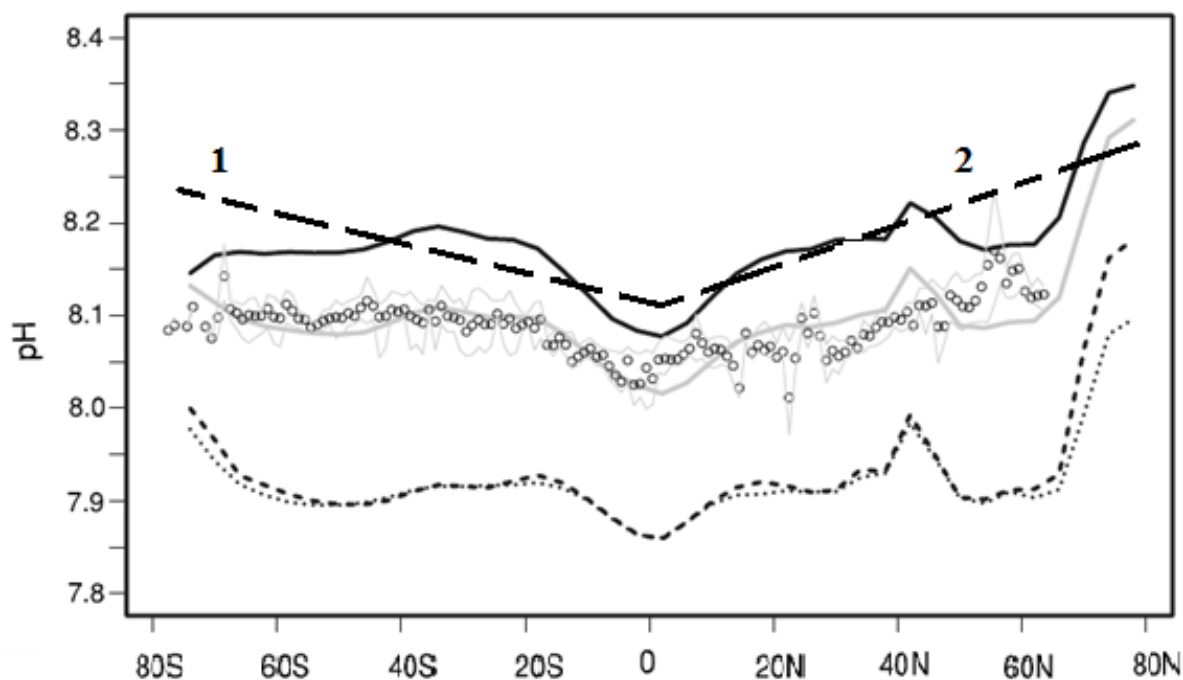
$$y = -0,00188x + 11,842.$$

Таким образом, согласно работам [1–5], а также многочисленным источникам по окислению поверхностных океанических вод из-за воздействия атмосферного CO_2 , факт снижения pH океанических вод из-за поглощения углекислого газа можно считать вполне доказанным явлением. Вместе с тем, закономерности пространственного распределения этого явления изучены недостаточно. Следует отметить, что с учетом цели настоящей статьи — проведение качественного анализа экстремальных свойств пространственного распределения степени подкисления океанических вод — достаточно выработать методику для одной координаты (например, для широты), так как для другой координаты методика почти не изменяется. В ряде работ (см., например, [6]) говорится о наличии роста pH по географической широте, в то время как в других работах [7] утверждается противоположное.

В настоящей статье авторы рассматривают указанную проблему путем сравнения теоретически полученных результатов с итогами известных экспериментальных исследований. Прежде всего, детально проанализируем результаты экспериментально-модельных исследований [6]. Так, согласно работе [6], значения зонально усредненных величин pH поверхностных вод растут по географической широте и в то же время уменьшаются по годам в течение 1880–1995 гг. (рис.).

Далее рассмотрим вопрос о пространственном (широтном) распределении атмосферного CO_2 . Согласно данным, приведенным в работе [7], по годам наблюдается устойчивый рост концентрации CO_2 по географической широте, что подтверждают следующие процессы:

- очевидный факт, заключающийся в том, что CO_2 в основном генерируется в Северном полушарии;
- транспортировка CO_2 в Южное полушарие.



Распределение значений pH поверхностных океанических вод по географической широте и по годам [6].

Вверху: сплошная линия соответствует 1880 г.; пунктирная показывает тренды за 1880 г. (1, 2 — тренды увеличения по южной и северной широте соответственно). Внизу: прогнозные кривые на 2100 г., полученные на базе контрольного эксперимента (полужирный пунктир) и эксперимента по изменению климата светлый пунктир). Кружочки показывают усредненные за 1991–1998 гг. значения pH

Далее рассмотрим известные результаты исследований зависимости pH от парциального давления атмосферного CO_2 . Согласно работе [8], для открытых систем, в частности для поверхностных океанических вод, имеет место следующее приблизительно равенство:

$$\text{pH} \approx 3,9 - \frac{1}{2} \log P_{\text{CO}_2} \quad (1)$$

где P_{CO_2} — парциальное давление углекислого газа.

Как было отмечено выше, согласно работе [6], pH поверхностных океанических вод имеет общий тренд роста с увеличением географической широты. Математически эта зависимость может быть представлена в виде многочлена:

$$\text{pH}_1 = \text{pH}_0 + k_1 L, \quad (2)$$

где pH_0 — const; L — географическая широта; k_1 — const.

Согласно работе [7], концентрация CO_2 в атмосфере растет с увеличением географической широты, т. е. в первом приближении имеет место зависимость:

$$\text{CO}_2 = \text{CO}_{2,0} + k_2 L, \quad (3)$$

где $\text{CO}_{2,0}$ — const; k_2 — const.

Покажем, что соотношения (1)–(3) позволяют вычислить точную качественную характеристику зависимости pH от L .

С учетом выражений (1) и (3) и исходя из следующего соотношения P_{CO_2} и CO_2 :

$$P_{\text{CO}_2} = k_3(\text{CO}_{2,0} + k_2L), \quad (4)$$

где k_3 — const, получим:

$$\text{pH} \approx 3,9 - \frac{1}{2} \log[k_3(\text{CO}_{2,0} + k_2L)]. \quad (5)$$

Отметим, что выражения (2) и (5) показывают качественно разные зависимости pH от географической широты. При этом выражение (2) в основном имеет экспериментальный характер, так как основывается на результатах измерений, изложенных в работе [6].

При этом выражение (5) получено на основе модели, синтезированной на базе результатов, полученных в [8] и [7]. С учетом качественных различий происхождения выражений (2) и (5) можно предложить новый показатель — экспериментально-модельное значение pH_0 , определяемое в качестве линейно-взвешенной суммы:

$$\text{pH}_0 = \alpha_1 \text{pH} + \alpha_2 \text{pH}_1, \quad (6)$$

где $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$.

С учетом выражений (2), (5), (6) получим:

$$\text{pH}_0 = \alpha_1 [3,9 - \frac{1}{2} \log[k_3(\text{CO}_{2,0} + k_2L)]] + \alpha_2 [\text{pH}_0 + k_1L]. \quad (7)$$

Далее исследуем pH_0 на экстремум от географической широты. Имеем:

$$\frac{d(\text{pH}_0)}{dL} = -\frac{\alpha_1 k_2 k_3}{2k_3(\text{CO}_{2,0} + k_2L)} + \alpha_2 k_1.$$

Приравнявая $\frac{d(\text{pH}_0)}{dL}$ к нулю из (7), получим:

$$L = \frac{\alpha_1}{2\alpha_2 k_1} - \frac{\text{CO}_{2,0}}{k_2}. \quad (8)$$

Таким образом, при географической широте, определяемой выражением (8), pH_0 достигает экстремальной величины. Для определения типа экстремума вычислим знак $\frac{d^2(\text{pH}_0)}{dL^2}$. Имеем:

$$\frac{d^2(\text{pH}_0)}{dL^2} = \frac{\alpha_1 k_2^2}{2(\text{CO}_{2,0} + k_2L)^2}. \quad (9)$$

Как видно из выражения (9), $\frac{d^2(\text{pH}_0)}{dL^2}$ всегда положительна, т. е. pH_0 , определяемое выражением (7), в точке, определяемой выражением (8), достигает минимума.

Для проверки теоретически полученного результата о наличии минимума в зависимости $\text{pH}_0 = f(L)$ полезно проанализировать экспериментальные кривые, приведенные на рисунке. Как видно из кривых (см. рис.), здесь имеется, по меньшей мере, два минимума в области северной географической широты. Таким образом, можно заключить, что проведенное теоретико-модельное исследование позволяет пояснить наличие минимума в зависимости pH_0 от географической широты.

Выводы

1. Обзор соответствующей научно-технической литературы позволил обнаружить противоречие в качественной характеристике зависимости рН поверхностных океанических вод от географической широты.

2. В результате проведенного модельного исследования получена обратная нелинейная зависимость между рН и географической широтой.

3. В результате проведенного теоретико-модельного исследования показано наличие минимума в функциональной зависимости линейно-взвешенной суммы теоретических и полученных модельных величин рН от географической широты. Приведено экспериментальное подтверждение этого вывода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Feely R. A., Doney S. C., Cooley S. R. Acidification. *Oceanography*. 2009. Vol. 22, No. 4. P. 37–47. 2. Sabine C. L., Feely R. A. The oceanic sink for carbon dioxide // *Greenhouse Gas Sinks*. 2007. P. 31–49. 3. Broecker W., Clarke E. A dramatic Atlantic dissolution event at the last glaciations. *Geochemistry Geophysics Geosystems* // Paper number. 2001. 2(11). 4. Bates N. R. Interannual variability of the oceanic CO₂ sink in the subtropical gyre of the North Atlantic Ocean over the last 2 decades // *J. Geophys. Res.* 2007. 112. P. 1–26. 5. Climate — carbon cycle feedback analysis: Results from the C*MIP model intercomparison / P. Friedlingstein [et al.] // *J. Climate*. 2006. 19(14). P. 3337–3353. 6. Mcneil B. I., Matear R. J. Climate change feedbacks on future oceanic acidification // *Tellus*. 2007. 59 B. P. 191–198. 7. Ruzmaikin A., Vyalko A. Om the Relationship between Atmospheric Carbon Dioxide and Global Temperature // *American J. Climate Change*, 2015. 4. P. 181–186. URL: <http://www.scrip.org/journal/ajcc>. 8. Chem A., Lower S. K. Carbonate equilibria in natural waters. URL: www.chem1.com/acad/webtext/pdf/c3carb.pdf.

Сведения об авторах

Асадов Хикмет Гамидович — доктор технических наук, профессор Национального аэрокосмического агентства, г. Баку, Азербайджанская Республика

E-mail: asadzade@rambler.ru

Аскерова Сима Аждар гызы — диссертант Национального аэрокосмического агентства, г. Баку, Азербайджанская Республика

E-mail: abiyeva_s@mail.ru

Author Affiliation

Hikmet G. Asadov — Dr. Sci. (Engineering), Professor at the National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic

E-mail: asadzade@rambler.ru

Sima A. Askerova — Dissertator of the National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic

E-mail: abiyeva_s@mail.ru

Библиографическое описание статьи

Асадов, Х. Г. Качественный анализ экстремальных свойств пространственного распределения степени подкисления океанических вод из-за роста процентного содержания CO₂ в атмосфере / Х. Г. Асадов, С. А. Аскерова // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 3 (9). — С. 99–103.

Reference

Asadov Hikmet H., Askerova Sima A. Qualitative Analysis of Extreme Features of Spatial Distribution of Level of Oceans Water Acidification Due to Increase of Percentage of CO₂ in Atmosphere. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 3 (9), pp. 99–103. (In Russ.).

УДК 537(874.37+877), 621(3.029.42+372.81.09)

НЕМОНОТОННАЯ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ КОНТРОЛИРУЕМОГО НАЗЕМНОГО КНЧ-ИСТОЧНИКА В ДНЕВНОЕ ВРЕМЯ*

Е. Д. Терешенко, А. Е. Сидоренко, В. Ф. Григорьев, П. Е. Терешенко
ФГБНУ Полярный геофизический институт

Аннотация

Представлены результаты эксперимента по генерации электромагнитных полей крайне низкочастотного диапазона и их синхронному приему в двух удаленных пунктах — на расстояниях 760 и 900 км от источника. Обнаружена немонотонная зависимость амплитуды поля от частоты в дневных условиях. Это не согласуется с существующими теориями распространения волн данного диапазона, допускающими возможность возникновения осцилляций амплитуды поля как функции частоты на расстояниях от источника, не превышающих 1000 км, только для ночных моделей ионосферы.

Ключевые слова:

крайне низкие частоты, ионосфера, контролируемый источник.

NON-MONOTONIC AMPLITUDE-FREQUENCY DEPENDENCE OF ELF MAGNETIC FIELD EXCITED BY GROUND-BASED CONTROLLED SOURCE IN DAYLIGHT CONDITIONS

Eugene D. Tereshchenko, Anton E. Sidorenko, Valery F. Grigoriev, Paul E. Tereshchenko
Polar Geophysical Institute

Abstract

The paper presents new empirical results on the ELF electromagnetic waves propagation. The experimental work was carried out by using the ground-based transmitter/receivers equipment designed at PGI of the KSC of the RAS. The simultaneously field measurements were accomplished in daylight conditions at two points on distances of about 750 km and 900 km from the source respectively. At both of these in the frequency range 3–33 Hz the similar substantially non-monotonic field amplitude was found. For relatively small distances from the source (~1000 km) the ELF propagation theory and existing ionospheric models predict the presence of amplitude oscillations in the nighttime. In addition, they forecast a simpler monotonic frequency dependence in daylight conditions. New results obtained in the narrow frequency mesh showed the presence of oscillations of the field in the daytime, which is inconsistent with existing understandings.

Keywords:

extremely low frequencies, ionosphere; controlled electromagnetic source.

Введение

Основные теоретические и экспериментальные сведения о распространении электромагнитных волн в диапазоне частот 3–300 Гц в полости Земля-ионосфера отражены в монографиях [1–3] и многочисленных статьях, вышедших в течение последних десятилетий, в числе которых можно привести работы [2–8].

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 15-05-02437-«А»).

В связи с глубоким проникновением волн крайне низкочастотного диапазона (КНЧ, 3–30 Гц) в толщу земли и ионосферу эти среды, как правило, уже нельзя считать однородными и изотропными (в особенности ионосферу, приобретающую гиротропию), что обуславливает многие специфические особенности данного диапазона частот.

Для исследования распространения радиоволн в данном диапазоне очевидные преимущества имеет использование контролируемых источников поля. При этом в настоящее время экспериментальных работ с использованием таких источников было проведено мало, они носили эпизодический характер, что позволило лишь качественно подтвердить основные теоретические особенности поведения КНЧ-поля в волноводе Земля-ионосфера. Для получения новых экспериментальных данных в КНЧ-диапазоне в мае 2014 г. был проведен эксперимент по генерации и приему квазимонохроматических полей на 18 частотах от 3 до 33 Гц приемно-передающим комплексом, разработанным в ПГИ.

Аппаратура и методика эксперимента

Формирование сигнала в диапазоне 3–30 Гц производилось мобильным генератором мощностью 200 кВт, разработанным в ПГИ на базе повышающего преобразователя и системы энергопередачи генератора «Энергия-2» для электромагнитных зондирований [9]. Антенна в виде горизонтального заземленного электрического диполя имела длину 60 км и была ориентирована вдоль географической широты [10]. Амплитуда силы тока в антенне составляла 100–110 А. Структурная схема источника излучения представлена на рис. 1.

Необходимая величина тока в антенне на частотах выше единиц герц обеспечивалась согласующим устройством, которое компенсирует индуктивную составляющую полного сопротивления линии на частотах, когда реактивное сопротивление линии начинает ограничивать силу тока в антенне [11].

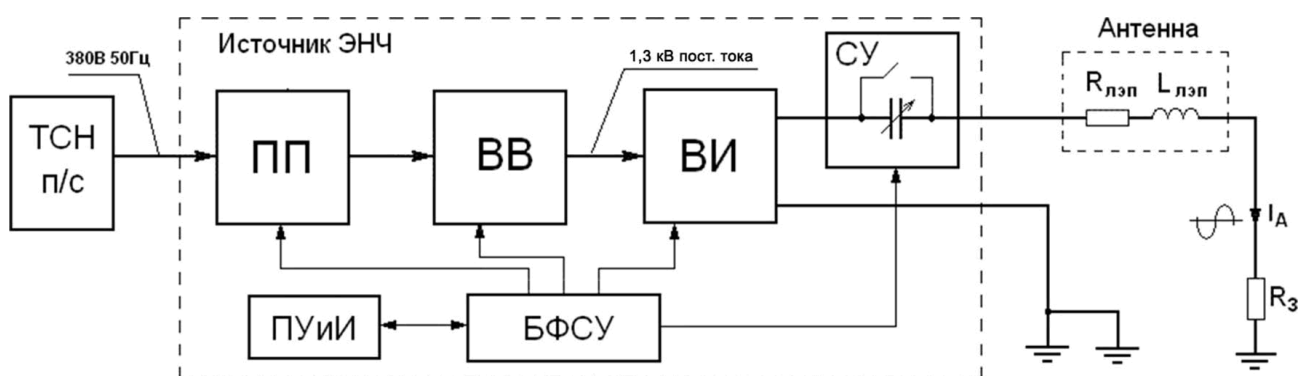


Рис. 1. Структурная схема источника излучения.

Условные обозначения: ТСН п/с — трансформатор собственных нужд подстанции; ПП — повышающий преобразователь; ВВ — высоковольтный выпрямитель; ВИ — высоковольтный инвертор; СУ — согласующее устройство; БФСУ — блок формирования сигналов управления; ПУИИ — пульт управления и индикации

Сетевое напряжение промышленной трехфазной сети напряжением 380 В и частотой 50 Гц подается на повышающий преобразователь, который обеспечивает гальваническую развязку от промышленной сети и повышает напряжение до 920 В. Далее это переменное напряжение поступает на высоковольтный выпрямитель, формирующий на выходе постоянное

напряжение величиной 1,3 кВ. Это напряжение поступает на высоковольтный инвертор, который методом широтно-импульсной модуляции формирует в антенне ток необходимой формы, амплитуды и частоты.

Формирование необходимых управляющих сигналов для всех блоков источника экстремально низкочастотного диапазона (ЭНЧ), анализ информации, поступающей с различных датчиков и цепей контроля, а также управление различными устройствами автоматики и защит осуществляются блоком формирования сигналов управления. Для управления режимами работы источника ЭНЧ, задания выходных параметров сигнала и визуального контроля этих параметров оператором служит выносной пульт управления и индикации.

Для обеспечения мобильности передающей установки генератор и согласующее устройство размещены в фургоне ГАЗ-33081.

Прием электромагнитного поля осуществляется разработанными в ПГИ индукционными датчиками с сердечником из аморфного железа длиной 490 мм и диаметром 66 мм, с количеством витков медного провода $6 \cdot 10^5$. Собственный шум датчика составляет не более $50 \text{ фТл/Гц}^{1/2}$ — на частоте 1 Гц и не более $10 \text{ фТл/Гц}^{1/2}$ — на частоте 100 Гц. Идентичность амплитудных и фазовых характеристик датчиков достигается единой технологией их изготовления и применением одинаковых деталей. Для достижения максимальной точности измерений магнитного поля датчики калибруются в одинаковых внешних условиях до и после проведения эксперимента.

Точность установки индукционных магнитометров в точках измерения достигается размещением датчиков в разработанных в ПГИ обоймах, которые обеспечивают ортогональность датчиков и задают их ориентацию в пространстве, а также устраняют взаимное воздействие магнитного поля [12]. Обойма в точке измерений устанавливается в горизонтальной плоскости по встроенным уровням и ориентируется по буссоли. Для учета локальных аномалий геомагнитного поля, влияющих на ориентацию датчиков при установке, в точке измерений определяется магнитное склонение. Побочные факторы неэлектрического происхождения в точках измерения (ветер, дождь, сейсмические возмущения и др.) устраняются размещением обоймы с датчиками в закрытой яме.

Синхронность цифровых измерений тока в антенне и магнитного поля обеспечивалась привязкой данных ко времени UT по сигналам СНС ГЛОНАСС/GPS с погрешностью не более 1 мкс [13]. Аналоговые сигналы оцифровывались 22-битным АЦП с частотой дискретизации 512 Гц.

В ходе эксперимента 22 мая 2014 г. было проведено два сеанса генерации сигналов на 18 частотах от 3 до 33 Гц — по 15 мин на каждой частоте: 8:30–13:00 UT и 13:20–17:50 UT. Измерения магнитного поля выполнялись в двух пунктах: в пригороде г. Петрозаводска (Республика Карелия) — на удалении 765 км от источника и в д. Сторожно (Ленинградская обл.) — на удалении 915 км. Прием сигнала осуществлялся с помощью аналогичных 3-компонентных индукционных магнитометров. Два горизонтальных датчика ориентировались ортогонально по стрелке магнитной буссоли: H_{S-N} — в направлении на магнитный север, H_{W-E} — на запад, третий датчик H_Z — устанавливался вертикально.

В полярной системе координат, связанной с излучающим диполем (рис. 2), угловые координаты обоих приемных пунктов оказались близки по модулю к $\pi/2$, поэтому поле в этих точках имеет фактически только радиальную составляющую, образующую угол приблизительно 10° с осью индукционного датчика H_{S-N} . В связи с этим измеряемое поле практически совпадает с единственной измеренной компонентой H_{S-N} ($\cos 10^\circ \approx 0,98$). Из-за объективно низкого соотношения сигнал/шум не удалось надежно выделить составляющую поля H_{W-E} .

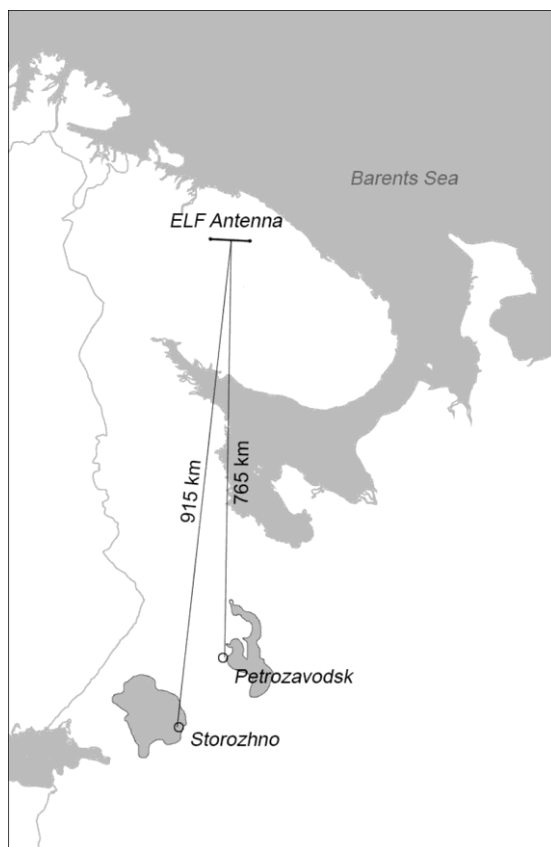


Рис. 2. Карта-схема области проведения эксперимента

Обработка данных

Амплитуда полезного монохроматического сигнала определялась на основе оценки средней спектральной плотности мощности (СПМ) в окрестности рабочей частоты. Поскольку полезный сигнал измеряется в присутствии естественного фоновой шума, то при статистической независимости их мощности складываются. Оценка измеряемой СПМ выполнялась методом усредненных пересекающихся периодограмм Уэлча с окном Хэмминга, дополненного определением границ доверительных интервалов [14].

Продолжительность каждого временного промежутка T_0 , содержащего полезный сигнал, составляла 900 с. В зависимости от частоты сигнала при обработке по методу Уэлча задавалась различная длительность временных окон (с перекрытием 50 %): от $T_0/4$ — на низких частотах до $T_0/16$ — на высоких. Таким образом, каждое отдельное временное окно содержало не менее нескольких сотен периодов полезного монохроматического сигнала.

В полученной СПМ симметрично относительно рабочей частоты выбирались две области шириной 0,5–2 Гц, внутри которых производилось усреднение СПМ фоновой шума и определялись доверительные интервалы. Определив таким образом среднюю мощность аддитивной смеси полезного сигнала с шумом и интервальную оценку средней мощности шума вблизи рабочей частоты, мы оценивали мощность полезного сигнала. Доверительная вероятность в статистических расчетах была принята равной 0,8. На заключительном этапе обработки полученные оценки мощности полезного сигнала пересчитывались в соответствующие значения амплитуды с учетом коэффициентов, определенных при калибровке.

Результаты и обсуждение

Полученные после обработки результаты измерений нормировались на ток в антенне. Результаты измерений горизонтальной компоненты H_{S-N} в приемных пунктах Петрозаводск и Сторожно, приведенные к силе тока 1 А, представлены на рис. 3. Измерения в Сторожно во время второго сеанса (рис. 3, d) на частотах ниже 5 Гц по техническим причинам провести не удалось.

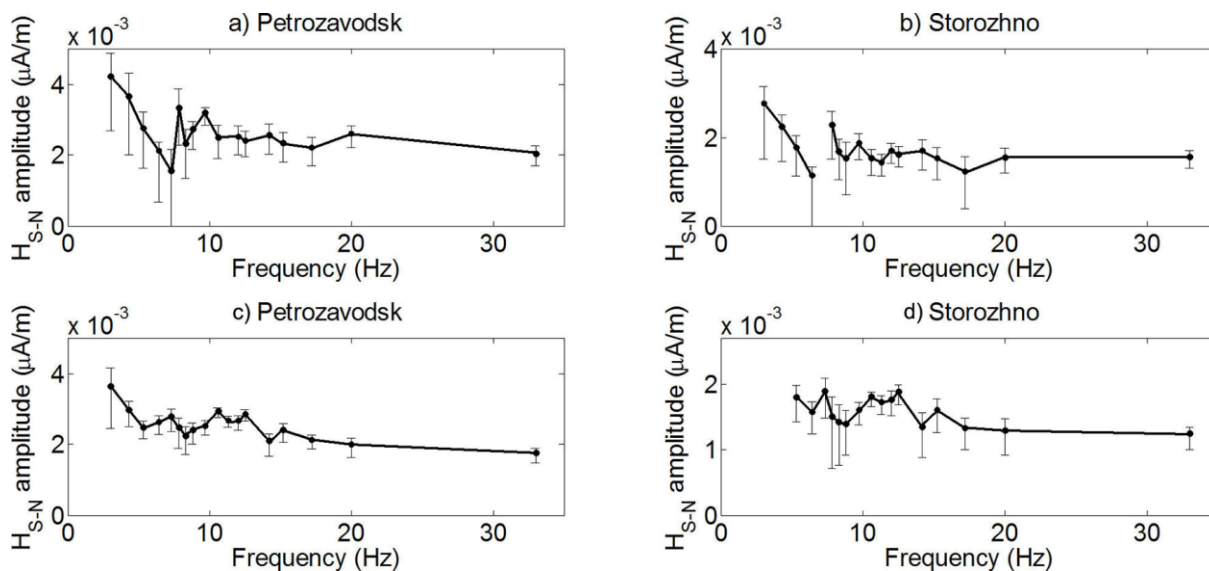


Рис. 3. Измеренные в эксперименте амплитуды компоненты H_{S-N} магнитного поля

Как видно на приведенных графиках, в среднем поведение поля имеет убывающий тренд. Учитывая величины полученных доверительных интервалов на рис. 3, а и b, можно утверждать, что наблюдаемая в первом (дневном) сеансе немонотонная зависимость амплитуды поля от частоты в области 5–8 Гц является значимой на фоне общего хода кривой. Немонотонный характер зависимости полностью повторяется в измерениях в двух удаленных точках Сторожно и Петрозаводск, что повышает надежность обнаружения этой особенности. Вторым (вечерний) сеанс измерений представлен на рис. 3, с и d. Видно, что в вечерние часы доверительные интервалы измеряемых амплитуд уменьшились, при этом в обоих пунктах наблюдаются сходные значимые осцилляции амплитуды принятого сигнала. По величине и структуре эти вариации отличаются от тех, что наблюдались в дневном сеансе, и могут быть объяснены существующими представлениями о влиянии ионосферы на распространение КНЧ в ночное время.

Во время проведения эксперимента геомагнитная обстановка оставалась достаточно спокойной: планетарный индекс K_p не превышал 3 единиц. В таких условиях появление нерегулярных ионосферных неоднородностей маловероятно. Учитывая также, что удаление точек измерений от источника до приемника не превышает 1000 км, наблюдаемая существенная вариация амплитуды не может быть вызвана интерференцией прямой и обратной волн по типу шумановского резонанса.

Вероятный механизм возникновения вариаций амплитуды может быть связан с влиянием внешней ионосферы. В средних широтах дневная нижняя ионосфера на высотах 40–100 км, как показывает модель IRI-2007, непрозрачна для КНЧ-волн. Вследствие этого получается монотонная зависимость ионосферного импеданса и амплитуды поля в волноводе от частоты.

В высоких широтах, где располагался источник излучения и частично проходила трасса распространения волн, даже в дневное время, согласно данным спутниковой томографии, наблюдается пониженная концентрация электронов — главный ионосферный провал. Это создает условия для просачивания волн во внешнюю ионосферу, участвующую в формировании импеданса, и приводит к немонотонной зависимости амплитуды тангенциального поля от частоты.

Выводы

В представленном эксперименте впервые было обнаружено отличное от теоретических представлений поведение КНЧ-поля искусственного контролируемого источника в дневных условиях. Установлено, что в дневное время возможен немонотонный характер зависимости амплитуды от частоты. В ночное время аналогичные осцилляции объясняются специфической структурой профиля электронной концентрации во внешней ионосфере. Просачивание КНЧ-волн во внешнюю ионосферу днем возможно в высоких широтах благодаря наличию главного ионосферного провала, который не описывается имеющимися эмпирическими моделями среднеширотной ионосферы. Поэтому при высокоширотном расположении источника или трассы распространения осцилляции импеданса ионосферы и амплитуды, поля с частотой могут возникать и в дневное время. Более высокая чувствительность КНЧ-волн (по сравнению с СНЧ) к изменениям во внешней ионосфере открывает хорошие возможности использования этого диапазона в исследованиях околоземного пространства.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН (г. Апатиты) В. В. Колобову и В. Н. Селиванову.

ЛИТЕРАТУРА

1. Galejs J. Terrestrial Propagation of Long Electromagnetic Waves // Pergamon Press. New York, 1972.
2. Nickolaenko A., Hayakawa M. Resonances in the Earth-Ionosphere Cavity // Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, 2002.
3. Pan W. Y., Li K. Propagation of SLF/ELF Electromagnetic Waves. Zhejiang University Press, Hangzhou and Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014.
4. Wait J. R. Earth-ionosphere cavity resonances and the propagation of ELF radio waves // Radio Sci. J. Res. NBS 69D. 1965. No. 8. P. 1057-1070.
5. Кириллов В. В., Копейкин В. Н. Решение двумерного телеграфного уравнения с анизотропными параметрами. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45, № 12. С. 1011.
6. Собчаков Л. А., Поляков С. В., Астахова Н. Л. Возбуждение электромагнитных волн в плоском волноводе с анизотропной верхней стенкой // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 12. С. 1503–1510.
7. Greifinger P. S., Mushtak V. C., Williams E. R. On modeling the lower characteristic ELF altitude from aeronautical data // Radio Sci. 2007. 42. RS2S12.
8. Первые эксперименты по генерации и приему искусственных УНЧ-излучений (0,3–12) Гц на дистанции 1500 км / П. П. Беляев [и др.] // Изв. вузов, Радиофизика. 2002. Т. 45, № 2. С. 151.
9. Повышающий преобразователь и система энергопередачи генератора «Энергия-2» для электромагнитных зондирований и мониторинга очаговых зон землетрясений / Е. Д. Терещенко [и др.] // Сейсмические приборы. 2008, Т. 44, № 4. С. 43–66.
10. Использование мощных стационарных источников экстремально низкочастотного электромагнитного поля в задаче дистанционного зондирования / Е. Д. Терещенко [и др.] // Инновационные электромагнитные методы геофизики / под ред. Е. П. Велихова. М., 2009. С. 10–21.
11. Разработка согласующего устройства стационарного источника электромагнитного излучения экстремально низкочастотного диапазона / Е. Д. Терещенко [и др.] // Труды КНЦ РАН. 2012. № 1 (4). С. 68–78.
12. Скородумов С. А., Обошнев И. И. Помехоустойчивая магнито-измерительная аппаратура. Л., 1981. С. 24.
13. Изменения фазы магнитного поля в СНЧ-диапазоне на разломной тектонике / Е. Д. Терещенко [и др.] // Физика Земли. 2012. № 9-10. С. 96–102.
14. Blanchet G., Charbit M. Digital Signal and Image Processing using MATLAB // ISTE Ltd, London and John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2006. P. 327.

Сведения об авторах

Терещенко Евгений Дмитриевич — доктор физико-математических наук, научный руководитель Полярного геофизического института (г. Мурманск)

E-mail: evgteres@pgi.ru

Сидоренко Антон Евгеньевич — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Полярного геофизического института (г. Мурманск)

E-mail: anton@pgi.ru

Григорьев Валерий Федосеевич — помощник директора Полярного геофизического института (г. Мурманск)

E-mail: valgri@pgi.ru

Терещенко Павел Евгеньевич — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Полярного геофизического института (г. Мурманск)

E-mail: tereshchenko@gmail.com

Author Affiliation

Eugene D. Tereshchenko — Dr. Sci. (Physics & Mathematics), Scientific Adviser of the Polar Geophysical Institute (Murmansk)

E-mail: evgteres@pgi.ru

Anton E. Sidorenko — PhD (Physics & Mathematics), Researcher of the Polar Geophysical Institute (Murmansk)

E-mail: anton@pgi.ru

Valery F. Grigoriev — Assistant Director of the Polar Geophysical Institute (Murmansk)

E-mail: valgri@pgi.ru

Paul E. Tereshchenko — PhD (Physics & Mathematics), Researcher of the Polar Geophysical Institute (Murmansk)

Библиографическое описание статьи

Немонотонная амплитудно-частотная зависимость магнитного поля контролируемого наземного КНЧ-источника в дневное время / *Е. Д. Терещенко [и др.]* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 3 (9). — С. 104–110.

Reference

Tereshchenko Eugene D., Sidorenko Anton E., Grigoriev Valery F., Tereshchenko Paul E. Non-Monotonic Amplitude-Frequency Dependence of ELF Magnetic Field Excited by Ground-Based Controlled Source in Daylight Conditions. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 3 (9), pp. 104–110. (In Russ.).

УДК 551.41(268.45)

**ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ПРЕКАДАСТРОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИБРЕЖНО-МОРСКОЙ ЗОНЫ
ЗАПАДНОГО МУРМАНА В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ
(НА ПРИМЕРЕ АКВАКУЛЬТУРЫ В ГУБАХ ПЕЧЕНГА И УРА)**

В. В. Денисов, А. П. Жичкин

ФГБУН Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН

Аннотация

Рассмотрен один из сложнейших вопросов современного морского природопользования — прекадастровая экологическая паспортизация прибрежных морских районов. Обсуждены требования к эколого-географическому описанию морских губ, предназначенных для развития морской аквакультуры в Баренцевом море. Изложены основные проблемы подготовки прекадастровой информации, связанные с необходимостью разумного выбора масштаба пространственной дискретизации и комплексностью эколого-географического материала для выстраивания природопользовательских кадастров.

Ключевые слова:

морское природопользование, аквакультура, экологическая паспортизация, прекадастровые исследования, Баренцево море.

**ECOLOGICAL AND GEOGRAPHICAL SUBSTANTIATION OF PRE-CADASTRAL RESEARCHES
OF THE COASTAL-MARINE ZONE OF WEST MURMAN IN THE BARENTS SEA
(USING THE AQUACULTURE IN PECHENGA AND URA LIPS AS AN EXAMPLE)**

Vladimir V. Denisov, Alexander P. Zhichkin

Murmansk Marine Biological Institute of the KSC of the RAS

Abstract

The article considers one of the most complicated issues of modern marine environmental management — pre-cadastral ecological passportization of coastal marine areas. Actual requirements for ecological and geographical description of sea lips intended for development of marine aquaculture in the Barents Sea were discussed using the experience of similar studies in the Far East. One of West Murman regions is used as an example — the Pechenga and Ura lips, where the necessary research has been carried out over the past 10 years and the experience of domestic aquaculture development is accumulating. Main problems of pre-cadastral information preparation connected with the need for a reasonable choice of the spatial discretization scale and complexity of eco-geographical material for the construction of environmental management cadastres, are discussed.

Keywords:

marine environmental management, aquaculture, ecological passportization, pre-cadastral researches, the Barents Sea.



Введение

Рациональное природопользование в береговой зоне представляет собой одну из пока не решенных проблем современной физической и экологической географии моря, так как оно фокусирует в себе комплекс эколого-географических, эколого-экономических, юридических и административных геопространственных аспектов управления. Одной из главных особенностей береговой зоны является ее

специфичность, которая требует нахождения адекватных способов описания ресурсного потенциала, причем как общестратегических, так и тактических аспектов рационального природопользования. Баренцево море неоднократно постулировалось как интегральный морской район, где ведущую роль всегда играло рыболовство и использование биоресурсов. Помимо традиционного промышленного рыболовства, в последнее время актуальным становится искусственное разведение рыбы, причем наиболее перспективным аквакультурным районом становится Западный Мурман Баренцева моря, где по пути теплых атлантических вод расположены удобные для этого бизнеса незамерзающие бухты, заливы и т. п. На морскую аквакультуру, как перспективный вид морского природопользования, исследователи обращали внимание с середины 1990-х гг., когда появились первые публикации на эту тему [1, 2], а в 2013 г. был утвержден очередной вариант «Стратегии социально-экономического развития Мурманской области до 2020 года и на период до 2025 года» [3]. В ней записано, что одним из важнейших направлений развития рыбохозяйственного комплекса региона должно стать развитие аквакультуры и марикультуры (п. 3.8 Стратегии). Согласно принятому документу, рост объемов выращенной рыбы предприятиями рыбоводства к 2025 г. должен быть доведен до почти 100 тыс. т (98,9 тыс. т). Решение этой задачи требует последовательных, согласованных, грамотных и финансово обеспеченных действий со стороны бизнеса, ученых и администрации [4, 5].

Развитие аквакультуры (марикультуры) в прибрежье Баренцева моря в XXI в.

Современная ситуация с марикультурными предприятиями на Кольском п-ове выглядит следующим образом. В начале XXI в. выращиванием рыбы (атлантического лосося) занималась только одна компания — совместная российско-норвежская фирма «Гиганте Печенга» [6–8]. В 2003 г. на этом предприятии было выращено около 300 т товарной продукции, а по планам развития объем аквакультурной продукции предполагалось довести до 20 тыс. т. Однако эти планы оказались невыполненными в силу целого ряда причин [7].

В 2009 г. появилась новая компания «Русский лосось» как подразделение группы компаний «Русский берег». В 2012 г. эта компания выиграла у «Гиганте Печенга» конкурс на использование пяти рыбоводных участков в губах Печенга и Амбарная [9]. Компания «Русский лосось» стала активно развиваться и планировала к 2015 г. занять 4 % рынка выращенного лосося в России [10, 11].

Немного позже, в 2012 г., на аквакультурном рынке появилась еще одна компания, «Русское море — аквакультура». В 2014 г. начаты первые выловы и реализация атлантического лосося, а в феврале 2015 г. компания изменила свое название на ПАО «Русская аквакультура», сосредоточившись на создании первой в России вертикально-интегрированной компании в секторе морской аквакультуры [12–14]. Однако в 2015–2016 гг. обе компании — «Русский лосось» и «Русская аквакультура» понесли значительные убытки из-за заболеваний атлантического лосося. Так, у компании «Русская аквакультура» заболеваниями было поражено более 70 % рыбы в губе Титовка. Аналогичные трудности возникли и в компании «Русский лосось» [15]. Однако результаты деятельности у этих двух компаний оказались разными. Если «Русская аквакультура» в результате диверсификации сумела высадить более 4 млн шт. смолта (молоди лосося) в Ура-Губе (три участка) с контролируемым уровнем риска в расчете получить в 2016–2017 гг. свыше 10 тыс. т готовой продукции, то «Русский лосось» в 2015 г. оказался в убытке порядка 1,7 млн руб., в компании было введено конкурсное управление.

В июле 2016 г. советом директоров утверждена долгосрочная стратегия развития компании «Русская аквакультура» до 2025 г., предполагающая постепенный рост объемов продаж свыше 25 тыс. т в год [14]. В конце августа 2016 г. «Русская аквакультура» начала съем и реализацию товарной продукции с ферм компании в Ура-Губе, который должен завершиться осенью 2017 г. рекордными в истории компании результатами.

Таким образом, развитие аквакультуры на Мурмане протекает по-разному: от ухода с рынка «Гиганте-Печенга», через временные затруднения (кризисные управленческие действия фирмы «Русский лосось», которая надеется преодолеть возникшие сложности и возобновить производство во второй половине 2017 г.), и, наконец, до рекордных поставок выращенного лосося с участков в Ура-Губе фирмой «Русская аквакультура».

Существующая на середину 2017 г. ситуация с аквакультурными фирмами на западе Кольского п-ова выглядит следующим образом: компания «Русский лосось» в губах Печенга и Амбарная владеет для производственной деятельности пятью участками; компания «Русская аквакультура» — тремя участками в Ура-Губе. Физико-географическое положение этих губ и местоположение аквакультурных участков в их пределах показано на рис. 1 и 2.

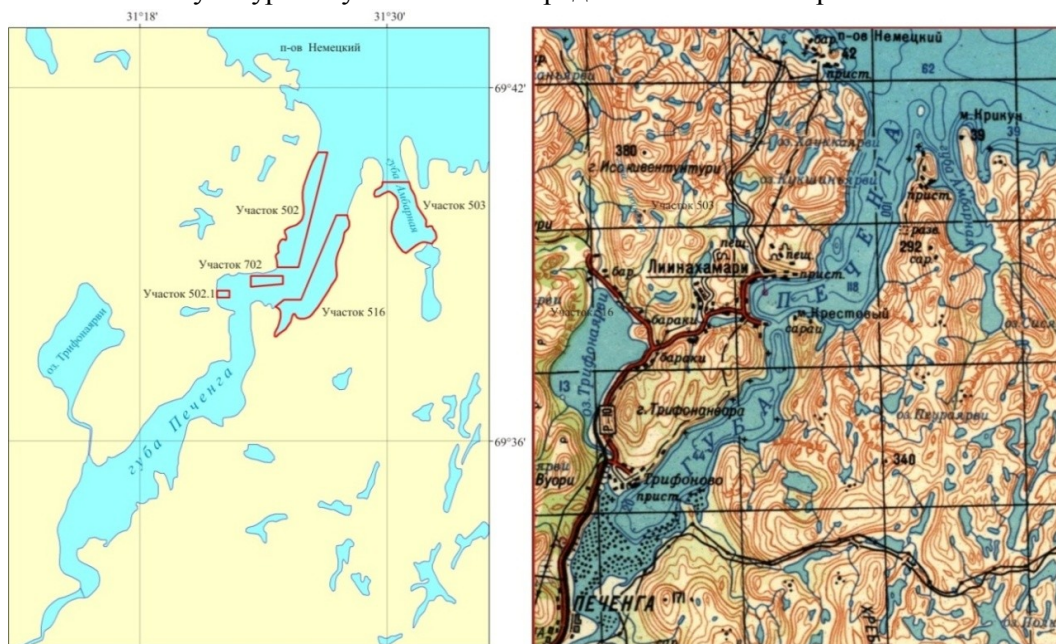


Рис. 1. Расположение рыбоводных участков в губах Печенга и Амбарная (по состоянию на 19.04.2017) [16–18]

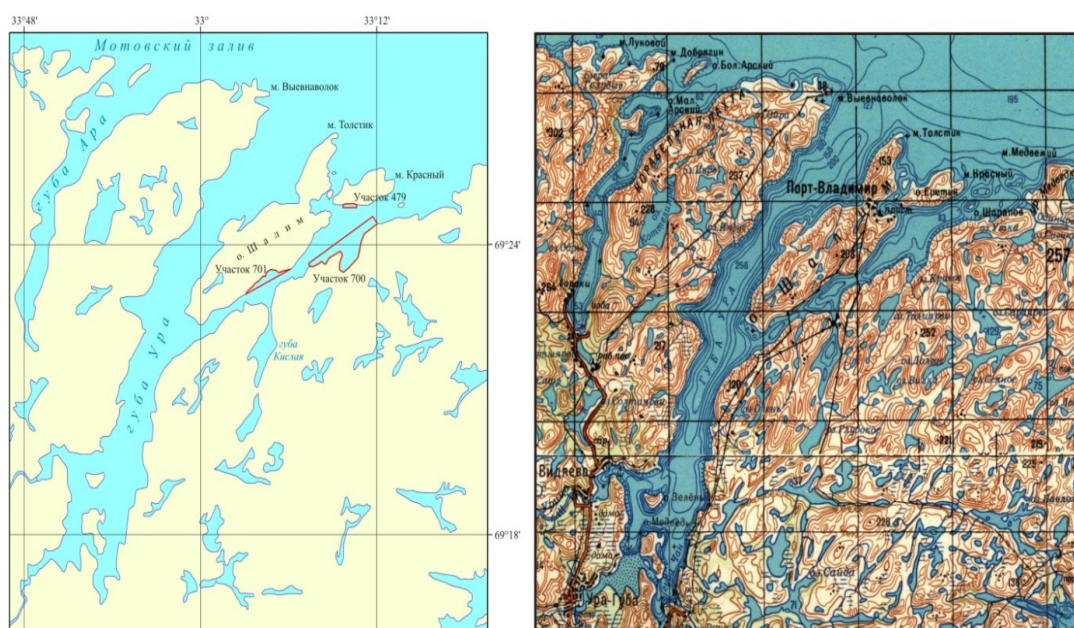


Рис. 2. Расположение рыбоводных участков в Ура-Губе (по состоянию на 19.04.2017) [16–18]

Предкадастровая экологическая паспортизация прибрежных морских районов

Для последующей разработки кадастровой документации обе фирмы должны пройти предварительный уровень подготовки документации или так называемой экологической паспортизации рассматриваемых участков акваторий вышеназванных губ. Перечень требований к этому виду документации приводится в работе [19] (применительно к экологическим паспортам отдельных акваторий Приморского края). Результат паспортизации мог бы служить основой для деятельности по практическому освоению выделяемых для аквакультуры участков акваторий вышеназванных губ. Требования, изложенные в работе [19], ориентированы на освоение морского дна и соответствуют требованиям к кадастровой документации в ее изначальной формулировке, то есть оценке природно-ресурсного потенциала территории. Для того чтобы сделать возможным проведение расчетов всей комбинации пространственных, минеральных и биологических ресурсов береговой зоны, определяемой как акваториальный ресурс (по аналогии с территориальным ресурсом), необходимо провести работу по составлению подводных ландшафтных карт на все прибрежные участки [19]. При этом следует осуществить сотни подводных натурных измерений по всем типам подводных ландшафтов для каждого гидроклиматического района. Такое всеобъемлющее описание подводных ландшафтов представляется избыточным по отношению к экологическому описанию аквакультурных объектов, поскольку в этом случае основной формой предоставления морских акваторий является аренда морских пространств (губ, заливов и т. д.). Методологическим путем расчета арендной платы на основе стоимости компенсационных мероприятий становится цепочка преобразований экологической стоимости угодий в экономическую, некий процент от которой составляет исчисляемая арендная плата. В таком случае продукционные показатели экосистемы в денежном отношении можно оценить как затраты на замещающую аквакультуру. Исходя из стоимости всего процесса организации замещающей аквакультуры можно посчитать цену компенсационных мероприятий при условии изъятия органической составляющей морской экосистемы в любом заданном районе. Кадастровые оценки подводных территорий и акваторий добавляют к базовым оценкам примерные запасы и суммарную цену высокоценных рыночно дорогих объектов, присутствующих на данном участке.

Кроме того, под экологической паспортизацией морской экосистемы как предкадастровыми исследованиями понимается фиксация ее статической картины на некий условный момент времени, принятый за начало отсчета, а результат паспортизации может служить основой для начала деятельности по практическому освоению акваторий, по мониторингу и эколого-географической экспертизе проектов, связанных с развитием деятельности на прибрежных морских акваториях [20].

Предкадастровые оценки (экологическая паспортизация) есть первый и обязательный этап составления кадастра участков акватории, предусмотренных для информационного обеспечения управленческих решений и контроля за последствия их реализации. При этом обязательным признаком кадастра выступает стандартизация методов сбора, оформления и хранения кадастровой информации. Для этого необходимо решить две основные проблемы, а именно:

- 1) определить пространственно-временные масштабы дискретизации наблюдаемых явлений (процессов);
- 2) создать соответствующие административные структуры и придать им определенную организационно-правовую форму.

Поскольку в настоящее время прибрежные акватории и их ресурсы в России находятся в федеральной собственности, то часть полномочий по управлению могут делегироваться с федерального на региональный уровень путем специального соглашения между федеральным и региональным правительствами. Эта проблема затрагивалась нами в предыдущих публикациях,

но пока не решена [7]. Что касается пространственно-временного масштаба дискретизации исходного материала для подготовки кадастровой документации, то в настоящее время такая дискретизация данных либо касается только генерализованной информации, либо требует специальных детальных обследований, так как конкретная информация по отдельным губам Баренцева моря отсутствует. Мурманский морской биологический институт дважды выполнял описание участков для развития аквакультуры. В первом случае это было в 2004–2005 гг. и предназначалось под будущее развитие компании «Гиганте Печенга». Занимаясь в те годы проблемами комплексного управления прибрежными зонами и отталкиваясь от того, что большинство экспертов из разных стран (от 85 до 93 %), по статистике, поставили аквакультуру на первое место среди претендентов на применение методов комплексного управления прибрежными зонами (КУПЗ), мы рассматривали также конфликтность берегопользователей в губе Печенга (рис. 3) [21].



Рис. 3. Конфликтность берегопользователей в губе Печенга (2003 г.)

В те годы (начало XXI в.) этот регион рассматривался как одно из перспективных мест для реализации объектов Штокмановского газоконденсатного месторождения. В то же время губа Печенга считалась весьма перспективной для реализации аквакультурных проектов. Собственно, в 2001 г. и была создана и начала свою деятельность российско-норвежская компания «Гиганте Печенга». Однако, как уже выше сказано, в 2012–2013 гг. она проиграла свои конкурсные заявки компании «Русский лосось», а затем прекратила свою активность в сфере аквакультуры. Одной из причин неудачи этой первой на Мурмане попытки в области морской аквакультуры следует назвать высокую капиталоемкость аквакультурных проектов (окупаемость — 10 лет) и высокие риски подверженности выращиваемых в искусственных условиях (садках) объектов аквакультурной продукции различным болезням [15]. Этот риск имеет обоюдоострое значение, поскольку рыба, выращиваемая в искусственной среде, может служить распространителем болезней и для дикой рыбы, и наоборот. Обе эти причины сыграли свою роль и в нашем случае [15].

В 2005 г. в главе 4 «Биотехнологии искусственного выращивания морских гидробионтов» монографии «Современные информационные и биологические технологии в освоении ресурсов шельфовых морей» (издание ММБИ) был опубликован материал Н. Г. Журавлевой «Биологическое обоснование на товарное выращивание семги (*Salmo Salar*) садковым способом в губе Печенга, бухте Долгая, щель Баренцева моря» [22], содержание которого может служить примером предкадастровой документации (экологического паспорта).

В 2015 г., то есть 10 лет спустя, ММБИ выполнил по заказу ПАО «Русский лосось» НИР «Разработка мер по сохранению биологических ресурсов и среды их обитания в процессе установки и эксплуатации плавпричалов ПАО «Русский лосось», расположенных в бухте Девкина заводь губы Печенга Баренцева моря» [23]. По оценке ММБИ, натуральный ущерб водным биоресурсам Баренцева моря составит меньше 1 т (~ 866 кг), или примерно 8,5 млн руб., а в качестве компенсационных мероприятий рекомендовано искусственное воспроизводство атлантического лосося. Промвозврат сеголеток (молодь лосося) в количестве 130 тыс. экземпляров позволяет ПАО «Русский лосось» возместить возможный ущерб, причиняемый натурным рыбным запасам региона в результате деятельности компании. Этот ожидаемый вывод, сделанный сотрудниками ММБИ, лишней раз подтвердил общее позитивное мнение об искусственном разведении рыбы в губах и заливах Западного Мурмана. Для реализации мероприятий по возмещению вреда (компенсации ущерба) заказчику было рекомендовано заключить договор об искусственном воспроизведении водных биоресурсов в водных объектах рыбохозяйственного значения с Баренцево-Беломорским территориальным управлением Федерального агентства по рыболовству в размере компенсационной суммы, которая сравнительно мала. Но, учитывая, что по итогам 2015 г. ПАО «Русский лосось» оказалось в убытке (сумма ~ 1,8 млн руб.) и в управление компании был введен конкурсный управляющий, сумма компенсации (достаточно незначительная) вряд ли сыграла решающую роль в принятии решения о приостановке деятельности компании именно по этой причине.

Заключение

Анализ требований к экологической паспортизации прибрежных зон применительно к воспроизведению рыбных ресурсов позволяет сделать следующие выводы. Из перечня исходных данных, предлагаемых в работе [19] и имеющих отношение к нашей задаче, выделим следующие: карту рельефа в изолиниях; гидрометеорологическую и гидрохимическую характеристики; карту (схему) морских течений; карту распределения (описание) важнейших

объектов промысла; сведения о загрязнениях акватории, осадков и наиболее представительных группировок морских организмов различного рода загрязнителями; сведения о вирусно-бактериологическом загрязнении массовых гидробионтов, сведения об опасных природных явлениях и объектах.

Вышеизложенные соображения даже в таком ограниченном виде открывают перспективы для формирования цивилизованного подхода к прибрежному природопользованию. Но выполнение этих требований для экологической паспортизации выходит за рамки настоящей статьи, назначение которой — дать общие соображения по поводу сути излагаемой проблемы, выделив главное: черты эколого-географических паспортов двух перспективных для аквакультуры регионов Западного Мурмана. Во-первых, принципиальной чертой обоих локальных районов побережья выступает открытость аквакультурных участков, которая обеспечивает хороший водообмен с морем. Во-вторых, уровень первоначального химического загрязнения в обеих губах мал, оценка биологического загрязнения требует более длительной эксплуатации аквакультурных участков. В-третьих, успешность получения искусственно выращенной рыбы у обеих компаний дает оптимистическую надежду на успешность выбора тех участков, которые практически доказали свою эколого-географическую пригодность для выбранного бизнеса. Косвенно это подтвердили исследования специалистов ММБИ, которые показали, что вмешательства в природу губ нет. Более детальные выводы можно будет сделать в том случае, если «Русская аквакультура» закажет у специалистов детальное описание последствий своей деятельности, в состав которого неизбежно войдет и фоновое описание текущей эколого-географической обстановки. Предкадастровая информация по участкам «Русского лосося» в литературе имеется [23].

ЛИТЕРАТУРА

1. Анохина В. С. Этапы становления лососевой аквакультуры на Европейском Севере России // Проблемы товарного выращивания лососевых рыб России. Мурманск: ПИНРО, 1995. С. 5–16.
2. Несветов В. А. Развитие аквакультуры на северо-западе России // Развитие прибрежного промысла и аквакультуры в Баренцевом море. Мурманск: ПИНРО, 1994. С. 121–124.
3. Стратегия социально-экономического развития Мурманской области до 2020 года и на период до 2025 года. URL: http://minec.gov-murman.ru/activities/strat_plan/sub02/.
4. Совершенствование экономических механизмов, обеспечивающих развитие ресурсной базы, повышение эффективности распоряжения недрами арктического континентального шельфа Российской Федерации и энергетической эффективности работ в Арктической зоне Российской Федерации: отчет о НИР (заключ.). М.: ГОИН, 2013. 388 с.
5. Рыбохозяйственный комплекс / М-во рыбного и сельского хоз-ва Мурманской области. URL: <http://mrcx.gov-murman.ru/activities/RHK/>.
6. Денисов В. В. Комплексное управление прибрежными зонами // Основные концепции современного берегопользования. СПб.: РГГМУ, 2010. Т. II. С. 224–286.
7. Денисов В. В., Жичкин А. П. Прибрежное рыболовство и аквакультура в Норвегии и России: сравнительный анализ эколого-географической ситуации на региональном уровне // Рыбное хоз-во. 2013. № 6. С. 22–26.
8. Исследование вопросов комплексного управления прибрежной зоной района Печенгской губы, Мурманская область: отчет о НИР (заключ.). Мурманск: ММБИ КНЦ РАН, 2003. 87 с.
9. Протокол № 5 Заседания комиссии по проведению конкурса на право заключения договора о предоставлении рыбопромыслового участка для осуществления товарного рыбоводства на водных объектах Мурманской области, 23 декабря 2011 г. URL: http://mrcx.gov-murman.ru/files/2011BVTU_akva-1_itogi.pdf.
10. ПАО «Русский лосось». URL: <http://www.list-org.com/company/3809013>.
11. Рыбалка под Мурманском / Федер. агентство по рыболовству. URL: http://fish.gov.ru/presscentre/smi_review/Pages/011100.aspx.
12. «Русская аквакультура» впервые за три года получила прибыль. URL: <http://sfera.fm/news/18424>.
13. «Русское море — Аквакультура» вырастит 7 тысяч тонн семги. URL: <http://nord-news.ru/news/2017/04/27/?newsid=92204>.
14. ПАО «Русская аквакультура»: офиц. сайт компании. URL: <http://russaquaculture.ru/>.
15. Чаюн Ю. «Балтийский берег» лихорадит из-за валютных кредитов и рыбьих болезней // Коммерсантъ С-Петербург. № 203. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/2846923>.
16. Лоция Баренцева моря. СПб.: ГУНиО, 1995. Ч. II (№ 1112). 462 с.
17. Кольские карты. URL: <http://www.kolamap.ru/topo.html>.
18. Об утверждении Перечня рыбопромысловых участков Мурманской области (с изменениями на 19.04.2017). URL: <http://docs.cntd.ru/document/913513010>.
19. Концепция кадастра береговой зоны как основы комплексного управления прибрежными зонами // Природопользование в прибрежной зоне: (Проблемы управления на Дальнем Востоке России) / отв. ред. И. С. Арзамасцев. Владивосток: Дальнаука, 2003. С. 198–214.
20. Реймерс Н. Ф. Природопользование: словарь-справочник. М.: Мысль, 1990. 637 с.
21. Исследование вопросов комплексного

управления прибрежной зоной района Печенгской губы, Мурманская область / В. В. Денисов [и др.] // Теория и практика морской деятельности. 2004. Вып. 3. С. 79–101. 22. Журавлева Н. Г. Биологическое обоснование на товарное выращивание семги (*Salmo Salar*) садковым способом в губе Печенга, бухте Долгая, щель Баренцева моря // Современные информационные и биологические технологии в освоении ресурсов шельфовых морей. М.: Наука, 2005. С. 287–295. 23. Разработка мер по сохранению биологических ресурсов и среды их обитания в процессе установки и эксплуатации плавпричалов ПАО «Русский лосось» (ПМ-61 и ПЖ-61), расположенных в бухте Девкина заводь губы Печенга Баренцева моря: отчет о НИР. Мурманск: ММБИ КНЦ РАН, 2015. 85 с.

Сведения об авторах

Денисов Владимир Васильевич — доктор географических наук, главный научный сотрудник Мурманского морского биологического института КНЦ РАН

E-mail: denisov@mmbi.info

Жичкин Александр Павлович — кандидат географических наук, старший научный сотрудник Мурманского морского биологического института КНЦ РАН

E-mail: zhichkin@mmbi.info

Author Affiliation

Vladimir V. Denisov — Dr. Sci. (Geography), Chief Researcher of the Murmansk Marine Biological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: denisov@mmbi.info

Alexander P. Zhichkin — PhD (Geography), Senior Researcher of the Murmansk Marine Biological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: zhichkin@mmbi.info

Библиографическое описание статьи

Денисов В. В. Эколого-географическое обоснование прекадастровых исследований прибрежно-морской зоны Западного Мурмана в Баренцевом море (на примере аквакультуры в губах Печенга и Ура) / В. В. Денисов, А. П. Жичкин // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 3 (9). — С. 111–118.

Reference

Denisov Vladimir V., Zhichkin Alexander P. Ecological and Geographical Substantiation of Pre-Cadastral Researches of the Coastal-Marine Zone of West Murman in the Barents Sea (Using the Aquaculture in Pechenga and Ura Lips as an Example). *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 3 (9), pp. 111–118. (In Russ.).

УДК 581.526.426.2(470.21)

СОСТАВ, СТРУКТУРА И СОСТОЯНИЕ ЛЕСОВ В СРЕДНЕМ ТЕЧЕНИИ РЕКИ УМБА (МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Н. Е. Королёва¹, Л. Г. Исаева², Е. А. Боровичёв^{2,3}

¹ФБГУН Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина КНЦ РАН

²ФБГУН Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

³ФБГУН Институт леса Карельского научного центра РАН

Аннотация

Приведены результаты геоботанического и лесопатологического обследования территории на левом берегу р. Умба в среднем течении, а также таблица геоботанических описаний ельника кустарничкового сфагново-зеленомошного и сосняка брусничного лишайниково-зеленомошного, приручьевого ивняка и верхового болота. Оценено видовое богатство и состояние популяций видов из Красной книги Мурманской области и Красной книги РФ. Дана оценка состояния лесного участка и обзор основных факторов поражения подроста.

Ключевые слова:

сосновые леса, верховые болота, лесопатологическое обследование, река Умба, Мурманская обл.

COMPOSITION, STRUCTURE AND STATE OF THE FORESTS IN THE MIDDLE FLOW OF UMBA RIVER (MURMANSK PROVINCE)

Natalia E. Koroleva¹, Lyudmila G. Isaeva², Eugene A. Borovichev^{2,3}

¹N. A. Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden-Institute of the KSC of the RAS

²Institute of Industrial North Ecology Problems of the KSC of the RAS

³Forest Research Institute, Karelian Research Centre of the RAS

Abstract

The article presents geobotanical and phytopathological survey of the territory on the left bank of the Uмба river in the middle flow, with the table of geobotanical descriptions of pine forest and bog complex. Pine forests prevail in the investigated area on the washed moraine alluvial sands and belong to the association *Cladonio arbusculae — Pinetum sylvestris* (Cajander 1921) K.-Lund 1967. Zonal vegetation is presented by spruce forest with dwarf shrubs, sphagnum and green mosses in ground layer, ass. *Empetro — Piceetum obovatae* (Sambuk 1921) Morozova 2008. Intrazonal types include willow shrubs near springs (ass. *Vaccinio uliginosi — Betuletum pubescentis* Libbert 1933) and raised bog complexes, with some pine trees, which include oligotrophic sedge-cotton grass fen (ass. *Calliargo sarmentosii — Eriophoretum angustifolii* Nordh. 1928) and dwarf shrubs-sphagnum hummocks (ass. *Empetro — Sphagnetum fusci* (Du Rietz (1921) 1926) Dierssen 1982). Both zonal and intrazonal types are characterized by typical species composition and structure. Species number on sampling plot was minimal on oligotrophic fen (5 species), the largest diversity was on willow scrubs near spring (37 species) and on the raised bog (32 species). The average number of species was in the pine forest (21–22 species on the sampling plot). There were found three species from the Red Data Book of the Murmansk Region, one species of them was included in the Red Data Book of the Russian Federation, the state of coenopopulations of these species in the studied community is sufficiently well. Phytopathological survey of the pine forest in the study area revealed that state of the forest was weakened and stable, the number of viable undergrowth was inadequate for natural regeneration of the forest, because of the damage of the pine undergrowth by needle diseases. Among the undergrowth damaging factors predominate the following: fungal diseases, including Spruce needle rust, *Chrysomyxa abietis* (Wallr.) Ung. — 45 %, damage from insect *Evetria resinella* L. — 8 %, White snow blight, *Phacidium infestans* Karst. — 5 %, pine canker — 5 % and growth suppression.

Keywords:

pine forests, raised bogs, phytopathological investigation, Uмба River, Murmansk Province.



Введение

Леса Мурманской обл. достаточно хорошо изучены, существует несколько общих обзоров для региона [1–7 и др.], в то же время фактических данных для отдельных ее территорий значительно меньше [8–12 и др.]. Отсутствуют опубликованные результаты совместного

геоботанического и лесопатологического обследования, по которым можно было бы оценить современные состав, структуру и состояние лесов. Данная статья приводит такие результаты для участка левого берега реки Умба в 7 км выше по течению оз. Канозеро.

Материалы и методы

Исследованная территория расположена на левом берегу реки Умба и относится к Апатитско-Кировскому административному району Мурманской обл. (рис. 1). В соответствии с геоботаническим районированием Нечерноземья [13] район исследований находится в северотаежной полосе (или подзоне) зоны тайги, в Умбском геоботаническом округе Кольско-Карельской подпровинции Североевропейской таежной провинции. Особенность растительного покрова округа — чередование сосновых, еловых лесов и кустарничково-сфагновых (иногда с разреженным древесным ярусом) верховых олиготрофных болот и олигомезотрофных аапа-болот [11]. Во флоре отмечается преобладание бореальных видов, при большом участии гипоарктических [14].

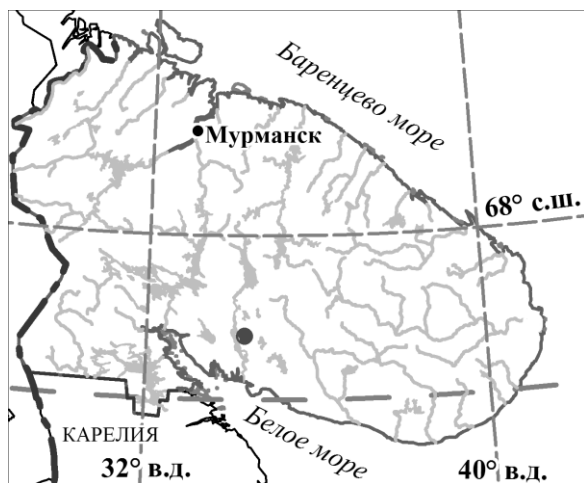


Рис. 1. Местоположение исследованной территории

Река Умба берет начало из оз. Умбозеро и впадает в Кандалакшский залив Белого моря у с. Умба. Обследованная территория полностью расположена в зоне ценных лесов — нерестоохранной полосы, ширина которой по берегам реки Умба составляет 1 км. Бассейн реки Умба с притоками и системой озер является местом расположения нерестилищ массового нагула и зимовки ценных промысловых рыб (атлантического лосося, горбуши, хариуса, сига, окуня и др.). В результате молевого сплава леса часть главного русла реки и высокопродуктивные протоки стали малопригодны для нереста лосося и обитания молоди [15–18]. Основную роль в воспроизводстве лосося в р. Умба играют участки, расположенные в среднем и нижнем течении реки [18].

Описание растительности проводили на пробных площадках 10×10 и 25×25 м — в лесных фитоценозах, 2×2 м — на болотах, 2×4 м — в приручьевом ивняке. Была использована 7-балльная шкала оценки покрытия-обилия Браун-Бланке. Покрытию менее 1 % соответствует балл "+", от 1 до 5 % — "1", от 6 до 10 % — "2a", от 11 до 25 % — "2b", от 26 до 50 % — "3", от 51 до 75 % — "4", от 76 до 100 % — "5".

В ходе полевых исследований собирали образцы сосудистых растений, мохообразных, лишайников и грибов. Координаты мест сбора определялись с помощью GPS. Определение образцов проводилось по стандартным методикам. Виды печеночников, для точной идентификации которых требуются данные о числе, размерах и структуре быстро разлагающихся

масляных тел, исследовали под микроскопом в течение нескольких дней после сбора. Названия видов сосудистых растений даны по списку С. К. Черепанова [19], листостебельных мхов в соответствии со сводкой М. С. Игнатова и О. М. Афоной [20], лишайников — по сводке Сантессона с соавторами [21], названия видов печеночников в основном приведены по мировому списку [22] с некоторыми поправками [23], названия синтаксонов — в соответствии с последним обзором растительности Европы [24].

Детальное лесопатологическое обследование проводили в сосняке брусничном лишайниково-зеленомошном на пробной площади (ПП) размером 20×50 м, где выполняли сплошной пересчет деревьев и подроста по ступеням толщины (диаметру) и категориям состояния [25]. Диаметр дерева измеряли на высоте 1,3 м мерной вилкой. К подросту относили деревья диаметром менее 5 см.

Категории жизненного состояния дерева устанавливали по совокупности признаков с учетом региональных рекомендаций [26], всего выделяли 7 категорий: 1 — здоровое, 2 — ослабленное, 3 — сильно ослабленное, 4 — усыхающее, 5 — сухостой текущего года, 6 — сухостой прошлых лет, 7 — бурелом, валеж, ветровал [27–30].

Степень усыхания, или размер усыхания, определяли по формуле

$$\text{Ст. ус.} = (IV + V + VI)/n \quad [31],$$

где IV, V и VI — количество деревьев 4-, 5- и 6-й категории состояния, n — общее количество деревьев.

Степень повреждения, или индекс состояния, рассчитывали по наличию в древостое деревьев разных категорий состояния. Использовали индекс состояния I_n , который определяли по формуле

$$I_n = (n_1 \cdot K_1 + n_2 \cdot K_2 + \dots + n_6 \cdot K_6)/N,$$

где $n_1 \dots n_6$ — количество деревьев 1-, 2...6-й категорий, $K_1 \dots K_6$ — баллы жизненного состояния категорий деревьев, соответствующие номеру категории; N — общее количество учтенных деревьев на пробной площади.

В смешанных по составу древостоях индекс повреждения рассчитывали отдельно по каждой породе, а затем вычисляли общий, средневзвешенный по представленности каждой из них.

Оценку состояния насаждений по классам биологической устойчивости определяли по методике, предложенной А. А. Воронцовым с соавторами [32].

Результаты

Растительные сообщества. На обследованной территории преобладают сосновые и еловые леса с большим участием березы пушистой, а также верховые болота, в долинах ручьев встречаются травяные ивняки.

Сосняк брусничный лишайниково-зеленомошный (табл. 1, описание КП1) расположен в сухом, олиготрофном местообитании, на дренированных аллювиальных и моренных песчаных отложениях.

Сомкнутость древостоя — 0,5, высота деревьев — 13–15 м, состав древостоя 6СЗЕ1Б, имеется подрост сосны, ели и березы. Травяно-кустарничковый ярус сплошной, покрытие 75 %, в нем обычны кустарнички брусника (*Vaccinium vitis-idaea*), голубика (*V. uliginosum*), черника (*V. myrtillus*), вороника (*Empetrum hermaphroditum*). В мохово-лишайниковом ярусе преобладают лишайники рода кладония (*Cladonia stellaris*, *C. mitis*, *C. rangiferina*, *C. gracilis* и др.), которые создают характерный белый аспект. В напочвенном покрове доминируют мхи плеурозиум Шребера (*Pleurozium schreberi*), гилокомиум (*Hylocomium splendens*) и виды рода дикранум (*Dicranum* sp.). Нередко встречаются печеночники барбилофозия плауновидная (*Barbilophozia lycopodioides*) и птилидиум реснитчатый (*Ptilidium ciliare*), под корнями на почве поселяется калипогея цельнолисточковая (*Calypogeia integristipula*). На ветвях обильны эпифитные лишайники, в том числе вид бриория Фремонта (*Bryoria fremontii*), включенный в Красные книги России [33] и Мурманской обл. [34].

Геоботанические описания растительных сообществ
в районе базы «Карельские пороги» в среднем течении р. Умба

Ассоциация	Clad-Pinet	Emp-Piceet	Vacc-Bet	Emp-Sph	Emp-Sph	Call sarm-Eri
Номер описания	КП1	КП6	КП2	КП5	КП3	КП4
Размер учетной площади, м	25×25	10×10	2×4	2×2	2×2	2×2
Общее проективное покрытие, %	100	100	100	100	100	100
Сухостой, %	1	<1	–	–	<1	–
Валеж, пни, %	1	<1	–	–	–	–
Древостой, сомкнутость, доли от единицы	0,5	0,5	–	0,01	0,01	–
<i>Betula pubescens</i>	0,01	0,05	–	–	0,01	–
<i>Picea obovata</i>	0,01	0,4	–	–	–	–
<i>Pinus sylvestris</i>	0,5	0,1	–	0,01	0,01	–
Подрост и кустарниковый ярус покрытие, %	1	10	75	1	15	–
<i>Betula pubescens</i>	+	1	2a	+	+	–
<i>Picea obovata</i>	+	–	–	–	+	–
<i>Pinus sylvestris</i>	+	1	–	+	+	–
<i>Salix phylicifolia</i>	–	–	2b	–	+	–
<i>S. lapponum</i>	–	–	2b	–	1	–
<i>Betula nana</i>	–	–	1	+	1	–
Травы и кустарнички, покрытие, %	75	75	75	75	75	100
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	4	1	+	–	–	–
<i>V. myrtillus</i>	2b	2a	1	–	–	–
<i>V. uliginosum</i>	1	4	+	+	–	–
<i>Empetrum hermaphroditum</i>	1	1	+	+	–	–
<i>Ledum palustre</i>	–	+	–	+	1	–
<i>Andromeda polifolia</i>	–	–	–	2b	2b	–
<i>Calluna vulgaris</i>	–	–	–	1	+	–
<i>Chamaepericlymenum suecicum</i>	–	+	2a	–	–	–
<i>Oxycoccus microcarpus</i>	–	–	–	1	+	–
<i>Chamaedaphne calyculata</i>	–	–	1	–	–	–
<i>Rubus chamaemorus</i>	–	–	1	1	1	–
<i>Drosera rotundifolia</i>	–	–	–	1	+	–
<i>Carex rostrata</i>	–	–	1	–	3	5
<i>C. dioica</i>	–	–	–	–	1	–
<i>C. globularis</i>	–	–	–	2a	2a	–
<i>C. pauciflora</i>	–	–	–	1	1	–
<i>C. cinerea</i>	–	–	+	+	–	–
<i>Eriophorum vaginatum</i>	–	–	–	1	1	–
<i>E. scheuchzeri</i>	–	–	–	–	1	–
<i>E. polystachion</i>	–	–	+	–	–	2b
<i>Equisetum sylvaticum</i>	–	+	1	+	1	–
<i>E. fluviatile</i>	–	–	+	–	1	–
<i>Calamagrostis langsdorffii</i>	–	–	2b	–	–	–
<i>Avenella flexuosa</i>	+	+	–	+	–	–
<i>Equisetum sylvaticum</i>	+	+	–	–	–	–

Ассоциация	Clad-Pinet	Emp-Piceet	Vacc-Bet	Emp-Sph	Emp-Sph	Call sarm-Eri
Мхи, покрытие, %	50	75	100	75	100	35
<i>Pleurozium schreberi</i>	4	3	–	3	–	–
<i>Hylocomium splendens</i>	1	3	–	3	–	–
<i>Sphagnum fuscum</i>	–	–	–	3	5	–
<i>S. russowii</i>	–	–	3	–	3	–
<i>S. girgensohnii</i>	–	2a	+	2a	–	–
<i>S. fallax</i>	–	–	–	–	–	2b
<i>S. magellanicum</i>	–	–	–	2a	–	–
<i>Warnstorfia exannulata</i>	–	–	–	–	–	2b
<i>Oncophorus wahlenbergii</i>	–	–	1	–	–	–
<i>Polytrichum commune</i>	–	+	+	+	–	–
<i>Mylia anomala</i>	–	–	–	1	–	–
<i>Aulacomnium palustre</i>	–	–	–	–	1	–
<i>Polytrichum strictum</i>	–	–	–	–	1	–
<i>Pleurozium schreberi</i>	–	–	–	–	1	–
<i>Pohlia</i> sp.	–	–	–	+	+	–
Лишайники, покрытие, %	50	–	–	–	–	–
<i>Cladonia stellaris</i>	3	–	–	–	–	–
<i>C. rangiferina</i>	2b	–	–	–	–	–

Примечание. Встречены в одном описании с покрытием «+»: *Alnus incana* КП6, *Aneura pinguis* КП2, *Bryum* sp. КП2, *Carex juncella* КП2, *Chamaenerion angustifolium* КП2, *Cladonia arbuscula* КП1, *C. gracilis* КП1, *C. coccifera* КП1, *Cladonia* sp. КП1, *Comarum palustre* КП2, *Corallorrhiza trifida* КП2, *Dicranum* sp. КП1, *Diphasiastrum complanatum* КП1, *Festuca rubra* КП2, *Linnaea borealis* КП6, *Populus tremula* КП6, *Pedicularis sceptrum-carolinum* КП2, *Rhizomnium pseudopunctatum* КП2, *Trientalis europaea* КП6.

Сокращения. **Clad-Pinet** — асс. *Cladonio arbusculae* — *Pinetum sylvestris* (Cajander 1921) K.-Lund 1967, **Emp-Piceet** — асс. *Empetro* — *Piceetum obovatae* (Sambuk 1921) Morozova 2008, **Vacc-Bet** — асс. *Vaccinio uliginosi* — *Betuletum pubescentis* Libbert 1933, **Call sarm-Eri** — асс. *Calli ergo sarmentosi* — *Eriophoretum angustifolii* Nordhagen 1928, **Emp-Sph** — асс. *Empetro* — *Sphagnetum fusci* (Du Rietz (1921) 1926) Dierssen 1982.

Ельник с сосной кустарничковый сфагново-зеленомошный (табл. 1, описание КП6, асс. *Empetro* — *Piceetum obovatae* (Sambuk 1921) Morozova 2008) располагается в понижениях рельефа к реке Умба. Сомкнутость древостоя — 0,5, высота древесного яруса — 1012 м, состав древостоя 7Е2С1Б, имеется подрост сосны, березы, осины, в подлеске присутствует ольха. В сплошном травяно-кустарничковом ярусе преобладают голубика, черника, брусника, вороника, местами — хвощ лесной (*Equisetum sylvaticum*). Моховой покров состоит в основном из зеленых мхов гилокомиума и плеурозиума Шребера, в более влажных местах крупными куртинами встречается сфагнум Гиргензона (*Sphagnum girgensohnii*), на повышениях — политрихум обыкновенный (*Polytrichum commune*), отмечены печеночники — барбилофозия бородатая (*Barbilophozia barbata*), на обнаженных участках встречается лофозия вздутая, разновидность длинноцветковая (*Lophozia ventricosa* var. *longiflora*). На ветвях ели и сосны обильны эпифитные лишайники — *Parmelia ambigua*, *Bryoria capillaris*, *B. fuscescens*.

В условиях избыточного увлажнения располагаются заболоченные сосняки и кустарничково-сфагновые верховые болота с разреженным ярусом сосны (табл. 1, описание КП3, асс. *Empetro* — *Sphagnetum fusci* (Du Rietz (1921) 1926) Dierssen 1982). Сомкнутость древостоя

невысока — 0,01–0,1, средняя высота деревьев — 3–6 м. В кустарниковом ярусе — ерник (*Betula nana*), ивы (*Salix lapponum*, *S. phylicifolia*), в травяно-кустарничковом покрове — голубика, вереск (*Calluna vulgaris*), багульник (*Ledum palustre*), подбел (*Andromeda polifolia*), росянка круглолистная (*Drosera rotundifolia*). Моховой покров представлен сфагновыми (*Sphagnum fuscum*, *S. magellanicum*, *S. russowii*) и зелеными (аулокомниум болотный (*Aulacomnium palustre*), политрихум сжатый (*Polytrichum strictum*)) мхами. Печеночники поселяются на поверхности или среди сфагновых мхов, это блефаростома волосовидная (*Blepharostoma trichophyllum*), калипогея (*Calypogeia integristipula*), одонтошизмы удлинённая и плавающая (*Odontoschisma elongatum*, *O. fluitans*), цефалозия двузаостренная (*Cephalozia bicuspidata*), яркий желтоватый аспект дает крупный печеночник милия необычная (*Mylia anomala*).

Болота на исследованной территории большей частью кустарничково-осоковые сфагновые, верховые олиготрофного питания (табл. 1, описание КП5, асс. *Empetro — Sphagnetum fusci* (Du Rietz (1921) 1926) Dierssen 1982). Выражен микрорельеф (кочки), вода находится ниже на 10 см от поверхности. Есть отдельные сосны болотной жизненной формы, в кустарничковом покрове преобладают подбел, багульник, морошка (*Rubus chamaemorus*), клюква (*Oxycoccus microcarpus*), осоки (*Carex rostrata*, *C. dioica*, *C. globularis*, *C. pauciflora*). В сплошном моховом покрове доминируют сфагновые мхи (*Sphagnum fuscum*, *S. russowii*), из печеночников — *Mylia anomala*, *Odontoschisma fluitans* и фускоцефалозиопсис белоцветковый (*Fuscocephaloziosis leucantha*).

Олиготрофные осоково-сфагновые болота (топи) (табл. 1, описание КП4, асс. *Calliervo sarmentosii — Eriophoretum angustifolii* Nordhagen 1928) располагались в наиболее обводненных участках, с уровнем воды на поверхности, со сплошным покровом из осоки вздутой (*Carex rostrata*) и пушицы многоколосковой (*Eriophorum polystachion*), ковром сфагнов (*Sphagnum fallax*) с участием варнсторфии (*Warnstorfia exannulata*), в понижениях — печеночника аневры тучной (*Aneura pinguis*).

В долине ручья, втекающего в Умбу, описан ивняк вейниково-травяной сфагновый (табл 1, описание КП2 асс. *Vaccinio uliginosi — Betuletum pubescentis* Libbert 1933), с кустарниковым ярусом из ив лопарской (*Salix lapponum*), филиколистной (*S. phylicifolia*), северной (*S. borealis*), с примесью карликовой березки и березы пушистой. Кустарничково-травяной ярус образован мезофитным разнотравьем, злаками и осоками, встречены дерен шведский (*Chamaepericlymenum suecicum*), морошка, вейник Лангсдорфа (*Calamagrostis langsdorffii*), осока вздутая и др. В моховом покрове преобладает сфагнум Гиргензона, повышенные более сухие участки занимают политрихум (*Polytrichum commune*), виды рода *Bryum*, в понижениях почти у самой воды обилён ризомниум ложноточечный (*Rhizomnium pseudopunctatum*). Среди печеночников наиболее обычна барбифозия бородастая (*Barbilophozia barbata*), на повышениях поселяется *Lophozia ventricosa* var. *longiflora*, по берегу ручья формирует обширные ковры маршанция обыкновенная (*Marchantia polymorpha*) с вкраплениями хилосцифуса многоцветкового (*Chiloscyphus polyanthus*), во влажных западинах развиваются ковры аневры тучной, на почве под корнями и возле них растёт *Calypogeia integristipula*.

При обследовании территории были выявлены три вида, включенные в Красные книги РФ [33] и Мурманской области [34]. Лишайник бриория Фремонта — *Bryoria fremontii* (Tuck.) Brodo & D. Hawksw, который занесен в Красную книгу РФ [33] с категорией «редкий вид» (3б) и Красную книгу Мурманской области [34] с особым статусом, как не требующий специальных мер охраны в регионе. Встречается на ветвях и стволах деревьев по всей исследованной территории. Печеночник скапания тeneвая — *Scapania umbrosa* (Schrad.) Dumort. включен в Красную книгу Мурманской области [34] с категорией «редкий вид» (3), в Мурманской обл. он известен с территории заповедника «Пасвик», окрестностей пос. Кола, низовьев реки Тулома, Нывка-

тундры, островов и побережья Кандалакшского залива Белого моря. На обследованной территории единственное местонахождение — обочина дороги перед мостом через ручей, впадающий в реку Умба, 67°08'47,8" с. ш. 34°05'53,3" в. д., 85 м над ур. м., на почве. Из сосудистых растений отмечена кассандра прицветничковая *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench, которая внесена в Красную книгу Мурманской области [34] как вид, нуждающийся в особом внимании к состоянию в природной среде Мурманской обл. (бионадзор). Кассандра образует обширные ценопопуляции (более 300 экз.) в вейниково-травяном сфагновом ивняке в долине ручья, впадающего в Умбу и на соседнем участке кустарничково-сфагнового верхового болота.

Лесопатологическое обследование. Состав древостоя в разновозрастном сосновом брусничном лишайниково-зеленомошном лесу 8С1Е1Б, максимальный возраст сосны и ели — 270 лет, березы — 90 лет. На пробной площади было учтено 65 живых деревьев (сосны — 53, ели — 5, и 7 — березы), 2 сухостойных сосны и 7 буреломных и ветровальных (сосна — 6 и береза — 1), практически почти полностью заросших кустарничками и мхами. Произрастает 258 штук подроста (сосна — 238, ель — 20, береза — единично). Средний диаметр живых деревьев сосны составляет 25,6 см, ели — 13,3 см и березы — 9,2 см, средняя высота сосны — 14,0 м, ели — 8,4 м, березы — 6,1 м.

Размер усыхания составляет 3 %. Массового повреждения деревьев вредителями и болезнями не выявлено, имеется поражение еловой хвои текущего года ржавчинным грибом *Chrysomyxa abietis* (Wallr.) Ung., который не приносит значительного вреда деревьям, хотя может вызвать усыхание верхушечного побега. Пожарные раны ствола (следствие давнего лесного пожара) имеют 7,5 % сосен.

Насаждение по классам биологической устойчивости относится к I классу состояния — «устойчивое». Преобладают деревья здоровой и ослабленной категорий состояния (табл. 2).

Таблица 2

Распределение деревьев по категориям состояния на пробной площади

Порода	Категории жизненного состояния						Бурелом, ветровал, валеж	Всего живых деревьев	
	1	2	3	4	5	6		на ПП	на 1 га
Сосна	19	23	11	0	0	2	6	53	530
Ель	4	0	1	0	0	0	0	5	50
Береза	6	1	0	0	0	0	1	7	70
Всего	29	24	12	0	0	2	7	65	650

В соответствии с оценкой жизненного состояния древостоев и индексу состояния I_n обследованный сосняк является ослабленным, в основном по состоянию сосны, так как большинство сосен имеет высокий возраст и следы пожара (табл. 3).

Таблица 3

Индекс состояния насаждения на пробной площади

Насаждение/древостой	Индекс состояния I_n	Состояние
Сосняк бруснично-лишайниково-зеленомошный	1,87	Ослабленное (слабо поврежденное)
Сосновый древостой	2,00	Ослабленный (слабо поврежденный)
Еловый древостой	1,40	Здоровый (неповрежденный)
Березовый древостой	1,15	То же

На пробной площади учтено 238 шт. соснового подростка и 20 шт. елового, большая часть подростка относится к здоровой и ослабленной категориям жизненного состояния (табл. 4). Преобладает хвойный подрост по высоте от 0,5 до 1,5 м (табл. 5). По густоте естественное возобновление сосновым подростом на исследуемой территории определяется как среднее (более 2000 шт/га). Практически считают, что количество благонадежного подростка хозяйственно ценной породы к моменту его смыкания и началу самоизреживания должно быть не менее 2 тыс. шт/га. В более ранних возрастах минимальное количество здорового самосева должно быть не менее 5 тыс. шт/га.

Таблица 4

Распределение хвойного подростка по категориям состояния

Порода	Категории жизненного состояния						Всего подростка на ПП		Индекс состояния I_n
	1	2	3	4	5	6	живой	сухостойный	
Сосна	123	86	13	6	4	6	228	10	1,74
Ель	7	8	5	0	0	0	20	0	1,90
Всего	130	94	18	6	4	6	248	10	1,76

Таблица 5

Распределение хвойного подростка по высоте

Подрост	Высота подростка, м			Всего	
	до 0,5	0,6–1,5	более 1,5	шт/ПП	шт/га
Живой подросток					
Сосна	43	130	56	228	2290
Ель	3	14	3	20	200
Всего	64	155	60	249	2490
Погибший подросток					
Сосна	2	8	0	10	100

Состояние подростка оценивается как ослабленное (слабо поврежденный подрост), имеются различные повреждения насекомыми (смолевщиком *Evetria resinella* L. — 8 %), грибными болезнями (ржавчиной хвои ели — возбудитель *Chrysomyxa abietis* (Wallr.) Ung. — 45 %, рис. 1, снежным шютте хвои сосны — возбудитель аскомицет *Phacidium infestans* Karst. — 5 %, рис. 2, язвенным раком — 5 %), частично подрост угнетен. Сосновый подрост высотой до 1,0 м на территории региона ежегодно поражается «снежным шютте» по северным склонам и в местах скопления и медленного таяния снега до 75 % [35, 36]. Эта болезнь является основной причиной изреживания молодняков сосны и стоит на первом месте по встречаемости [37].

На исследуемом участке сосняка брусничного лишайниково-зеленомошного сосновый подрост, у которого высокая степень вероятности поражения болезнями типа шютте, составляет примерно 60 %. Побеговыюн-смолевщик вызывает усыхание верхушки соснового подростка, и происходит замена верхушки ростом бокового побега, при этом подрост не усыхает; выявленные болезни (ржавчина хвои ели, снежное шютте хвои сосны) могут вызвать незначительное усыхание подростка лишь до высоты 0,5–1,0 м, язвенный рак ствола приведет в дальнейшем к усыханию.

Таким образом, типичный для данной территории сосняк брусничный лишайниково-зеленомошный в соответствии с оценкой жизненного состояния древостоев и индекса состояния является ослабленным по причине высокого возраста сосны и пройденного по территории более 200 лет назад лесного пожара. Состояние насаждений устойчивое; благонадежного и жизнеспособного подростка сосны недостаточно для естественного возобновления леса.



Рис. 2. Подрост ели, пораженный ржавчиной ели (возбудитель *Chrysomyxa abietis* (Wallr.) Ung.), автор фото Л. Г. Исаева



Рис. 3. Сосновый подрост, хвоя которого поражена шютте снежным (возбудитель *Phacidium infestans*), автор фото Л. Г. Исаева

Заключение

Растительный покров исследованного района включает типичные для северной тайги типы сообществ. Зональными типами являются еловые леса (ельник кустарничковый сфагново-зеленомошный). На бедных моренных и аллювиальных песках распространены азональные сообщества — сосновые леса (сосняк брусничный лишайниково-зеленомошный). Интразональные типы — приручьевые ивняки и верховые болотные комплексы, с отдельными соснами, включают олиготрофные осоково-пушицевые топи и кустарничково-сфагновые кочковатые участки. Как для зональных, так и для интразональных сообществ обследованной территории характерны типичный видовой состав и структура. Видовое богатство минимально на олиготрофных топях верховых болот (5 видов на пробную площадь), максимально в приручьевом вейниково-травяном ивняке (37 видов) и на верховом болоте (32 вида). В лесных сообществах отмечено среднее видовое разнообразие, 21–22 вида на пробную площадь. На обследованной территории выявлено 3 вида из Красной книги Мурманской области, из них 1 вид внесен и в Красную книгу РФ, состояние популяций этих видов в изученных сообществах не вызывает опасений.

Детальное лесопатологическое обследование не выявило существенных изменений в состоянии старовозрастных сосновых лесов. Состояние насаждений устойчивое, количество жизнеспособного подроста сосны недостаточно для естественного возобновления леса в связи с поражением мелкого подроста болезнями хвои сосны, вызывающими его гибель.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цветков В. Ф., Семенов Б. А. Сосняки Крайнего Севера. М.: Агропромиздат, 1985. 116 с.
2. Чертовской В. Г., Семенов Б. А., Цветков В. Ф. Предтундровые леса. М.: Агропромиздат, 1987. 168 с.
3. Коренные (старовозрастные) леса Мурманской области / В. В. Никонов [и др.] // Лесоведение. 2002. № 2. С. 15–23.
4. Классификация бореальных лесов севера Европейской России. I: Олиготрофные хвойные леса / О. В. Морозова [и др.] // Растительность России. 2008. № 13. С. 61–81.
5. Королева Н. Е. Основные биотопы северотаежных лесов и береговых криволесий Мурманской области: ландшафтное и ботаническое разнообразие, необходимость охраны // Вестник МГТУ. 2011. Т. 11, № 4. С. 819–832.
6. Кучеров И. Б. Лишайниково-зеленомошные и зеленомошные сосняки средней и северной тайги Европейской России // Комаровские чтения. Владивосток: Дальнаука, 2013. Вып. 61. С. 159–217.
7. Кучеров И. Б., Зеверев А. А. Лишайниковые сосняки средней и северной тайги Европейской России // Вестник Томского гос. ун-та. Биология. 2012. № 3 (19). С. 46–80.
8. Некрасова Т. П. Растительность альпийского и субальпийского поясов Чуна-тудры // Труды Лапландского государственного заповедника. 1938. Вып. 1. С. 1–176.
9. Салазкин А. С. Очерк растительности бассейна р. Умбы // Тр. БИН АН СССР. Сер. 3: Геоботаника. 1936. Вып. 3. С. 69–139.
10. Аврорин Н. А., Качурин М. Х., Коровкин А. А. Материалы по растительности Хибинских гор // Труды СОПС АН СССР, сер. Кольская. М.-Л., 1936. Вып. 2. 93 с.
11. Паянская-Гвоздева И. И. Структура растительного покрова северной тайги Кольского полуострова. Л.: Изд-во Ботан. ин-та, 1990. 182 с.
12. Нешатаев В. Ю., Нешатаева В. Ю. Синтаксономическое разнообразие сосновых лесов Лапландского заповедника // Бот. журн. 2002. Т. 87, № 1. С. 99–106.
13. Геоботаническое районирование Нечерноземья европейской части РСФСР / ред. В. Д. Александрова, Т. К. Юрковская. Л.: Наука, 1989. 64 с.
14. Раменская М. Л. Анализ флоры Мурманской области и Карелии. Л.: Наука, 1983. 216 с.
15. Влияние лесосплава на условия обитания молоди семги в реках / В. В. Хренников [и др.] // Современное состояние исследований лососевидных рыб: тез. III Всесоюз. совещ. по лососевидным рыбам. Тольятти, 1988. С. 351–352.
16. Семга *Salmo salar* реки Умба / О. Г. Кузьмин [и др.]. Петрозаводск, 1989. С. 37–40.
17. Зубченко А. В., Кузьмин О. Г. Репродуктивный потенциал и состояние запасов атлантического лосося реки Умбы // Систематика, биология и биотехника: материалы 5-го Всерос. совещ. СПб., 1994. С. 78–81.
18. Красовский В. В. Особенности воспроизводства атлантического лосося (*Salmo salar* L.) в озерно-речных экосистемах реки Умба (Кольский полуостров): автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2006. 25 с.
19. Черепанов С. К. Сосудистые растения России и сопредельных государств. СПб., 1995. 990 с.
20. Игнатов М. С., Афонина О. М. Список мхов территории бывшего СССР // Arctoa. 1992. Т. 1, № 1–2. С. 1–87.
21. Lichen-forming and lichenicolous fungi of Fennoscandia / R. Santesson [et al.]. Uppsala, 2004. 359 p.
22. World checklist of hornworts and liverworts / L. Söderström [et al.] // PhytoKeys. 2016. Vol. 59. P. 1–828. doi: 10.3897/phytokeys.59.6261.
23. Checklist of liverworts (Marchantiophyta) of Russia / N. A. Konstantinova [et al.] // Arctoa. 2009. Vol. 18. P. 1–63.
24. Vegetation of Europe: hierarchical floristic classification system of vascular plant, bryophyte, lichen, and algal communities / L. Mucina [et al.] // Applied Vegetation Science. 2016. Vol. 19. 264 p.
25. Методы изучения лесных сообществ. СПб.: НИИХимии СПбГУ, 2002. 240 с.
26. Карпенко А. Д. Влияние промышленного загрязнения на еловые фитоценозы Кольского полуострова: автореф. дис. ... канд. наук. Тарту, 1984.

23 с. **27.** Методические рекомендации по оценке существующего и прогнозируемого состояния лесных насаждений в зоне влияния промышленных предприятий Мурманской области. Архангельск, 1990. 17 с. **28.** Влияние промышленного атмосферного загрязнения на сосновые леса Кольского полуострова. Л.: БИН АН СССР, 1990. 195 с. **29.** Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Л.: Наука, 1990. 200 с. **30.** Санитарные правила в лесах Российской Федерации (в ред. приказа МПР РФ от 05.04.2006 № 72). М., 2006. 23 с. **31.** *Цветков В. Ф.* Методические рекомендации по оценке существующего и прогнозируемого состояния лесных насаждений в зоне влияния промышленных предприятий Мурманской области. Архангельск, 1990. 18 с. **32.** *Воронцов А. А., Мозолевская Е. Г., Соколова Э. С.* Технология защиты леса. М.: Экология, 1991. 304 с. **33.** Красная книга Мурманской области. Изд. 2-е. Кемерово: Азия-принт, 2014. 584 с. **34.** *Крутов В. И., Волкова И. П.* Лесопатологическое состояние естественного возобновления и культур хвойных пород // Лесовосстановление в Карельской АССР и Мурманской области. Петрозаводск, 1975. С. 122–179. **35.** *Исаева Л. Г.* Болезни древесных растений и кустарников Мурманской области // Проблемы лесной фитопатологии и микологии: материалы IX Междунар. конф., посвященной 90-летию со дня рождения проф. Н. И. Федорова. Минск; М.; Петрозаводск, 2015. С. 94–96. **36.** *Крутов В. И.* О паразитной микрофлоре искусственных фитоценозов сосны на вырубках Карельской АССР и Мурманской области // Микология и фитопатология. 1979. Т. 13, вып. 4. С. 68–70.

Сведения об авторах

Королёва Наталья Евгеньевна — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н. А. Аврорина КНЦ РАН
E-mail: flora012011@yandex.ru

Исаева Людмила Георгиевна — кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН
E-mail: isaeva@inep.ksc.ru

Боровичёв Евгений Александрович — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН; Институт леса КарНЦ РАН
E-mail: borovichyok@mail.ru

Author Affiliation

Natalia E. Koroleva — PhD (Biology), Senior Researcher of the Polar-Alpine Botanical Garden-Institute of the KSC of the RAS
E-mail: flora012011@yandex.ru

Lyudmila G. Isaeva — PhD (Agriculture), Head of Laboratory of the Institute of Industrial North Ecology Problems of the KSC of the RAS
E-mail: isaeva@inep.ksc.ru

Eugene A. Borovichev — PhD (Biology), Senior Researcher of the Institute of Industrial North Ecology Problems of the KSC of the RAS; Senior Researcher of the Forest Research Institute, Karelian Research Centre of the RAS
E-mail: borovichyok@mail.ru

Библиографическое описание статьи

Королёва, Н. Е. Состав, структура и состояние лесов в среднем течении р. Умба (Мурманская область) / *Н. Е. Королёва, Л. Г. Исаева, Е. А. Боровичёв* // Вестник Кольского научного центра РАН. 2017. № 3 (9). С. 119–129.

Reference

Koroleva Natalia E., Isaeva Lyudmila G., Borovichev Eugene A. Composition, Structure and State of the Forests in the Middle Flow of Uмба River (Murmansk Province). *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 3 (9), pp. 119–129. (In Russ.).

Указом Президента Российской Федерации В. В. Путина от 25 сентября 2017 г. ведущему научному сотруднику лаборатории 30 Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В.Тананаева КНЦ РАН **Басе Израильевне Гуревич** за заслуги в области строительства, в разработке и внедрении новых строительных технологий присвоено почетное звание «Заслуженный строитель Российской Федерации».

Б. И. Гуревич после окончания в 1954 г. Московского химико-технологического института им. Д. И. Менделеева по распределению приехала работать в Кольский филиал АН СССР, где беспрерывно продолжает трудиться уже более 60 лет. За это время она прошла путь от старшего лаборанта до ведущего научного сотрудника лаборатории минерального сырья и силикатного синтеза отдела технологии строительных материалов ИХТРЭМС КНЦ РАН. В 1968 г. защитила кандидатскую диссертацию на тему «Высокопрочные минеральные вяжущие из магнезиально-железистых шлаков и растворимого стекла». Б. И. Гуревич — высококвалифицированный специалист в области физикохимии силикатов и технологии вяжущих материалов, известный не только в нашей стране, но и за рубежом. Ею разработаны составы целого ряда вяжущих специального и общестроительного назначения.

Научная деятельность Баси Израильевны связана с физико-химическим обоснованием технологий вяжущих веществ на основе техногенного и природного сырья и их внедрением на предприятиях стройиндустрии. Например, технология производства глазурованных бетонных панелей, разработанная Б. И. Гуревич, была внедрена на Мурманском домостроительном комбинате. Даже через сорок лет внешний вид таких панелей почти не изменился, и они продолжают украшать здания в городах Мурманск и Апатиты.

Не менее успешно был решен Б. И. Гуревич такой важный вопрос, как закладочные материалы для отработанных подземных пространств при добыче минерального сырья: гранулированные шлаки комбината «Печенганикель» и Норильского горно-металлургического комбината используются более 40 лет как мелкий заполнитель для бетонов строительного назначения при проведении закладочных работ на рудниках этих предприятий.

Среди других внедренных ее разработок следует отметить мелкозернистые бетоны для твердеющей закладки (Ловозерский горно-обогащительный комбинат) и особо тяжелые бетоны (Смоленская и Южно-Украинская АЭС). Кроме того, при строительстве Серебрянской ГЭС-1 на р. Воронья в Мурманской обл. также не обошлись без ее технологии наливных полов с использованием щебня на основе шлака комбината «Североникель». Шлак комбината «Печенганикель» в качестве мелкозернистого заполнителя в технологии, разработанной Б. И. Гуревич, применялся при изготовлении стеновых блоков для строительства пятиэтажных домов в пос. Никель Мурманской обл.

Б. И. Гуревич является автором более 270 научных трудов, в том числе 7 монографий, 9 патентов и авторских свидетельств.

Большое внимание Бася Израильевна уделяет подготовке своих молодых коллег, щедро помогая и делясь с ними глубокими знаниями в области строительного материаловедения.

Коллектив Института химии КНЦ РАН горячо поздравляет Басю Израильевну Гуревич с присвоением почетного звания «Заслуженный строитель Российской Федерации» и желает ей крепкого здоровья, счастья и дальнейших творческих успехов!

Крапивин Д. С. Формирование региональной экономической политики по снижению износа основных фондов / Д. С. Крапивин — Апатиты: КНЦ РАН, 2017. — 101 с.

Монография посвящена исследованию проблем формирования экономической политики, направленной на снижение износа основных фондов и поиску возможностей проведения модернизации и технического перевооружения предприятий, осуществляющих свою деятельность на территории Мурманской области. Экономика региона имеет сильную зависимость от предприятий, осуществляющих деятельность по добыче и переработке полезных ископаемых, что в совокупности с суровыми климатическими условиями накладывает особые требования на качественную составляющую основных производственных фондов. В работе рассмотрены вопросы региональной экономической политики, затрагивающие сферу обновления основных фондов, и даны рекомендации по повышению ее эффективности.

Монография включает результаты работ над госзаданием ФГБУН ИЭП КНЦ РАН (параграфы 1.4, 2.1-2.3), а также результаты научно-исследовательской работы, поддержанной грантом РФФИ № 16-32-00019 «Новые проблемы и перспективы социально-экономического развития регионов российской Арктики в условиях кризиса» (параграф 2.4 и глава 3). Издание рассчитано на широкий круг специалистов, включая научных работников, преподавателей высших и средних специальных учебных заведений, а также рекомендовано к ознакомлению аспирантам по специальностям 08.00.01, 08.00.05, 08.00.10.

Мелконян Р. Г. Экологические проблемы использования техногенного сырья в производстве стекла и керамики / Р. Г. Мелконян, Д. В. Макаров, О. В. Суворова. — Апатиты: КНЦ РАН, 2017. — 224 с.

Представлен обзор зарубежных и отечественных исследований по утилизации различных промышленных отходов в производстве стекла и керамики. Показано, что в ряде случаев использование отходов приводит к улучшению свойств материалов. Утилизация крупнотоннажных промышленных отходов, прежде всего горно-металлургического и топливно-энергетического комплексов, в керамические строительные материалы экономически эффективна и направлена на решение экологических и социальных проблем.

Представляет интерес для специалистов, работающих в области охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов, химиков-технологов, специалистов в области строительного материаловедения, геоэкологов, а также студентов вузов, обучающихся соответствующим специальностям.

Палатников, М. Н. Фундаментальные аспекты технологии сильно легированных кристаллов ниобата лития: монография / М. Н. Палатников, Н. В. Сидоров, О. В. Макарова, И. В. Бирюкова. — Апатиты: КНЦ РАН, 2017. — 241 с.

В монографии рассмотрены фундаментальные вопросы технологии получения шихты и выращивания методом Чохральского из расплава номинально чистых и сильно легированных цинком кристаллов ниобата лития (LiNbO_3). Определены критерии оценки качества шихты, рассмотрены способы получения легированной шихты и способы легирования, оптимальные тепловые условия роста монокристаллов, и исследованы способы формирования осевого температурного градиента в установках индукционного типа. Особое внимание уделено выявлению роли пороговых эффектов в формировании физических характеристик и эволюции структуры сильно легированных нефоторефрактивными примесями монокристаллов с высокой оптической однородностью и стойкостью к оптическому повреждению.

Методами спектроскопии комбинационного рассеяния света, фотоиндуцированного рассеяния света, лазерной коноскопии в сильно расходящихся пучках лазерного излучения и полнопрофильного рентгеноструктурного анализа изучена концентрационная эволюция кристаллической структуры,

структурной однородности и дефектов монокристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$. Исследованы аномалии диэлектрических, пьезоэлектрических свойств и проводимости сильно легированных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{ZnO}$.

Книга представляет интерес для научных и инженерно-технических работников, технологов, студентов старших курсов физических и химических специальностей вузов, магистрантов, аспирантов, специализирующихся в области выращивания монокристаллов, физико-химического материаловедения, технологии сегнетоэлектрических материалов электронной техники, а также для самообразования научных работников и преподавателей.

Север и рынок: формирование экономического порядка: науч.-информ. журн. / Ин-т экон. проблем им. Г. П. Лузина КНЦ РАН. — Апатиты: КНЦ РАН. — 2017. — 2 (53). — 143 с.

Север и рынок: формирование экономического порядка: науч.-информ. журн. / Ин-т экон. проблем им. Г. П. Лузина КНЦ РАН. — Апатиты: КНЦ РАН. — 2017. — 3 (54). — 143 с.

Труды Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 2 (8). — 111 с. — (Океанология, вып. 4).

Труды Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 4 (8). — 111 с. — (Гуманитарные исследования, вып. 11).

Труды XIV Всероссийской (с международным участием) Ферсмановской научной сессии, посвященной 100-летию со дня рождения акад. А. В. Сидоренко и д. г.-м. н. И. В. Белькова (3–4 апреля 2017 г., Апатиты) Геологический ин-т КНЦ РАН. — 2017 (14). — 575 с.



Юбилеи



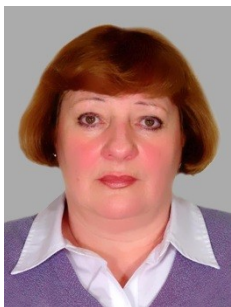
МУХИНА Татьяна Николаевна

к. т. н., заведующий технологическим сектором Инженерного центра (опытно-промышленная обогатительная установка) Горного института КНЦ РАН, где работает с 1974 г.

После окончания Ленинградского горного института по специальности «Обогащение полезных ископаемых» осуществляет научное и организационное руководство большинством исследовательских, экспериментальных и опытно-промышленных работ, проводимых в технологическом секторе. В частности, в 2000-х гг. под ее руководством разработаны технологии обогащения платиносодержащих руд Федорово-Панского массива и Мончегорского плутона, кианитовых сланцев Кейв, усовершенствованы технологии обогащения апатит-нефелиновых руд Хибинского массива. Успешно проведены опытно-промышленные испытания обогащения минерального сырья Кольского п-ова и других регионов России: хромитовых руд месторождения Сопчеозерское; медно-никелевых руд Кольской ГМК и месторождений Кингашского рудного узла; алмазосодержащей руды месторождения им. В. П. Гриба; платиносодержащих руд Гальмознанского месторождения; железомедных руд месторождений Быстринского рудного поля; золотосодержащих руд Быстринско-Ширинского, Попутнинского и Майского месторождений; титаномагнетит-ильменитовых руд месторождения Большой Сейим, титан-циркониевых песков Центрального и Бешпагирского месторождений; редкометалльных руд Зашихинского месторождения и др.

Научные достижения были неоднократно отмечены в годовых отчетах научных советов ОНЗ РАН. Общее количество опубликованных работ Т. Н. Мухиной — 54, включая 5 патентов, 1 авторское свидетельство, 47 статей, 1 издание в LAP Lambert Academic Publishing.

Поздравляем Татьяну Николаевну и желаем успехов, здоровья, оптимизма и долголетия!



НЕРОВИЧ Людмила Ивановна

к. г.-м. н., научный сотрудник лаборатории платинометалльного рудогенеза Геологического института КНЦ РАН, в котором работает с 1984 г.

В 1992 г. окончила аспирантуру КНЦ, в 1999 г. защитила кандидатскую диссертацию. Специалист в области геологии докембрийских метаморфических и магматических образований.

С начала работы в институте Л. И. Нерович сосредоточила внимание на исследованиях анортозитов Лапландского гранулитового пояса, в результате ею были получены принципиально новые данные об особенностях геологического строения, петрохимии, последовательности и характере метаморфических процессов, а также возрасте анортозитовых тел центральной части Лапландского гранулитового пояса. Полученные данные были использованы при составлении геологической карты северо-восточной части Балтийского щита масштаба 1:500 000 и в ряде публикаций. Опыт глубокого изучения гранулитов Л. И. Нерович использовала при решении задач по актуальным темам НИР, выполнявшихся институтом в рамках приоритетных направлений Отделения наук о Земле РАН. В настоящее время является ответственным исполнителем работ по изучению породных комплексов Мончетундровского массива Главного хребта, включая оценку их перспектив на благородные металлы.

Людмила Ивановна активно занимается педагогической деятельностью. Под ее руководством студенты АФ МГТУ пишут курсовые и дипломные работы.

Поздравляем Людмилу Ивановну с юбилеем, желаем ей крепкого здоровья, успехов в делах и благополучия.



Юбилеи



Юбилеи



СУВОРОВА Ольга Васильевна

к. т. н., старший научный сотрудник лаборатории минерального сырья и силикатного синтеза Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН, где работает с 1983 г. после окончания Ленинградского технологического института им. Ленсовета.

В 1999 г. защитила кандидатскую диссертацию на тему «Использование горнопромышленных отходов для получения стекла и стеклокристаллических материалов».

Высококвалифицированный специалист в области исследования физико-химических свойств горнопромышленных отходов и попутных продуктов горнопромышленного комплекса Кольского п-ова как сырья для производства стекол, стеклокристаллических и керамических материалов. При ее участии установлены взаимосвязи важнейших технологических свойств и состава базальтоидных расплавов и стекол, разработаны принципы и условия получения высококачественных многоцветных декоративных стекол и стеклокристаллических материалов.

На основе полученных закономерностей разработаны и защищены авторскими свидетельствами и патентами составы декоративных стекол с авантюриновым эффектом, декоративных многоцветных стекол и стеклокристаллических материалов, термо- и кислотостойких черных стекол, а также керамических и теплоизоляционных материалов. Опытные партии декоративных стекол переработаны в художественные изделия и бижутерию, которые неоднократно экспонировались на международных и отечественных выставках. Результаты выполненных разработок нашли применение в ОАО «Апатит» (кислото- и абразивостойкая керамика), комбинате «Североникель» КГМК (способ получения минерального волокна).

Ольга Васильевна — член-корреспондент Российской экологической академии (с 2016 г.).

Поздравляем Ольгу Васильевну с юбилеем и желаем крепкого здоровья, счастья, новых творческих свершений и всего самого доброго!

80



ВОЛОШИН Анатолий Васильевич

д. г.-м. н., профессор. В Геологическом институте КНЦ РАН — с 1968 г.

Область научных интересов — минералогия и кристаллохимия, эволюция редкометалльного минералообразования в пегматитах, силекситах и гидротермалитах щелочно-гранитной формации. В цикле работ и в докторской диссертации (1990) разработал и

развил метод кристаллохимического анализа минеральных видов в эволюции процесса минералообразования. Систематизировал данные по синтетическим сложным оксидам тантала и ниобия и проанализировал поведение природного тантал-ниобиевого фазообразования в общей схеме процесса на примере гранитных пегматитов.

Один из ведущих специалистов в области минералогии, в частности в минералогии редких металлов, признанный мировым научным сообществом. Избран членом ученого совета ГИ КНЦ РАН, почетным членом Российского минералогического общества. А. В. Волошиным с соавторами открыто более 25 новых минеральных видов, в том числе новая группа танталовых минералов (13 минеральных видов) в гранитных пегматитах Кольского п-ова и других регионов России и мира, новые силикаты иттербия и иттрия Кольского п-ова (6 минеральных видов), ниобаты и ниобосиликаты в карбонатитах (3 минеральных вида), что является выдающимся достижением минералогической науки.

Результаты исследований А. В. Волошина опубликованы более чем в 200 научных публикациях, в том числе 4 монографиях. В настоящее время занимается вопросами минералогии золоторудных и медно-колчеданных рудопроявлений Имандра-Варзугской структурной зоны, Панареченской вулканотектонической структуры и других районов Кольского п-ова.

А. В. Волошин многие годы курирует работу Музея геологии и минералогии им. И. В. Белькова. Научную работу он успешно сочетает с педагогической деятельностью. За достижения в научной и научно-организационной деятельности награжден медалью «Ветеран труда» (1986) и почетными грамотами.

Поздравляем Анатолия Васильевича с юбилеем и желаем ему крепкого здоровья, счастья и дальнейших творческих успехов.



Юбилеи



Юбилары

70



ДЕНИСОВ Владимир Васильевич

д. г. н. (1998), профессор (2006), заслуженный деятель науки Российской Федерации (2006). В Мурманском морском биологическом институте КНЦ РАН с 1992 г. — главный научный сотрудник лаборатории океанографии и радиоэкологии.

Более чем за три десятилетия научной деятельности ученым выполнены важные в теоретическом и практическом отношении исследования океанологического режима арктических шельфовых морей, разработаны и внедрены научно-методические подходы к учету характеристик морской среды при проектировании перспективных судов ледового плавания, сформулированы основы комплексной оценки воздействия на окружающую среду шельфовых разработок нефти и газа, обоснованы методы рационального природопользования для морей с уникальными комплексами природных ресурсов (биологические, нефтегазовые, минеральные и др.). Им предложены и развиты основы экологической географии моря как методологии современного анализа, прогноза и управления природно-хозяйственными морскими комплексами на базе принципов устойчивого развития.

В. В. Денисов — талантливый организатор науки, в течение 12 лет работал в должности заместителя директора Института по научной работе, внося весомый вклад в достижение ежегодных высоких итоговых показателей деятельности института, включая сферу международного сотрудничества. Под его руководством и непосредственном участии разработаны и реализованы крупные экспедиционные и научные программы (проект «БАРЭКС», российско-норвежский океанографический проект, федеральные научные проекты по управлению прибрежными зонами и методологии морских ОВОС). Долгие годы В. В. Денисов — член Президиума КНЦ РАН, в составе которого эффективно участвовал в разработке и осуществлении институтами КНЦ РАН научного сопровождения морской деятельности в регионе и перспектив его развития.

В. В. Денисов — автор более 240 научных работ, включая фундаментальную авторскую монографию «Эколого-географические основы устойчивого природопользования в шельфовых морях (экологическая география моря)», разделы в 17 коллективных монографиях, статьи в отечественных и зарубежных изданиях. Активный участник многих российских и международных конференций по проблемам климата, управления морскими ресурсами, экологических последствий промышленного рыболовства и нефтегазодобычи, охраны природы.

Значительное место в его деятельности занимает подготовка и воспитание молодых специалистов, в итоге им подготовлено 6 кандидатов наук. С 1997 по 2015 гг. читал лекции и руководил базовой кафедрой географии в Мурманском арктическом государственном университете, в настоящее время работает с аспирантами и соискателями.

Входит в состав Ученого совета и Специализированного совета по защите докторских диссертаций при Мурманском морском биологическом институте.

Достижения В. В. Денисова в профессиональной деятельности отмечены правительственной наградой — медалью «300 лет Российскому флоту», грамотами, премиями и благодарностями различных морских организаций, Правительства Мурманской области, Минобрнауки РФ и РАН.



НИВИН Валентин Александрович

д. г.-м. н., ведущий научный сотрудник лаборатории геологии и геодинамики Арктики. В Геологическом институте КНЦ РАН работает с 1980 г.

Научные интересы связаны с изучением геохимии газов в рудно-магматических системах (происхождение углеводородов в щелочных комплексах, роль летучих компонентов в процессах породо- и рудообразования, изотопная геохимия благородных газов) и возможностей использования газогеохимической информации для решения фундаментальных проблем в науках о Земле и практических горно-геологических задач.

В 1988 г. защитил кандидатскую диссертацию, а в 2013 г. — докторскую на тему «Газовые компоненты в магматических породах: геохимические, минерагенические и экологические аспекты и следствия (на примере интрузивных комплексов Кольской провинции)». Опубликовал более 145 научных работ.

Валентин Александрович отличается высокой активностью в реализации своих разработок, участник исследований в рамках международных и отечественных проектов, плодотворно работает в контакте с производственными организациями. Вместе со специалистами горнодобывающих предприятий разработал «Специальные мероприятия газобезопасного ведения горных работ», согласованные с федеральными контролирующими органами и принятые для обязательного исполнения на подземных рудниках эксплуатирующихся Хибинских апатитовых и Ловозерских редкометалльных месторождений.

Поздравляем Валентина Александровича с юбилеем, желаем ему крепкого здоровья, успехов в делах и благополучия



Юбилеи



Юбилеи



ХОХУЛЯ Михаил Степанович

к. т. н. В Горном институте работает с 1971 г., с 2016 г. — заведующий лабораторией новых технологических процессов и аппаратов.

Область научных интересов — интенсификация процессов обогащения различных видов минерального сырья гравитационными методами. Занимался созданием технологии рационального обогащения мелкозернистых слюдяных руд, технологии получения анизотропно-диспергированных слюд и перламутровых пигментов на их основе. Его работы по обогащению вермикулитовых руд легли в основу технологии первой в стране вермикулитовой обогатительной фабрики.

Им разработаны технологии гравитационной переработки различных видов флогопитовых и мусковитовых руд. Занимается вопросами выделения гематитового концентрата из руд текущего производства и складированных отходов обогащения железистых кварцитов Заимандровской группы месторождений.

Ответственный исполнитель разделов и тем НИР, Программ фундаментальных исследований, контрактов ФЦНТП Минобрнауки, грантов РФФИ. Выполненные с его участием разработки неоднократно включались в число важнейших достижений РАН.

Научную работу Владимир Андреевич успешно сочетал с преподавательской деятельностью в качестве доцента горного факультета КФ ПетрГУ, в настоящее время осуществляет руководство дипломными работами.

Автор более 200 научных работ, из которых 12 — авторские свидетельства и патенты.

Награжден почетными грамотами РАН, Президиума КНЦ РАН и Горного института, присвоены звания «Ветеран труда» и «Ветеран труда Мурманской области».

За многолетний добросовестный труд и в связи с юбилеем награжден знаком «Горняцкая слава» III степени.

**КОТОМИН Александр Борисович**

к. т. н., ведущий научный сотрудник отдела экономической политики и хозяйственной деятельности в Арктике и районах Крайнего Севера Института экономических проблем им. Г. П. Лузина КНЦ РАН, в котором работает с 2003 г.

После окончания Политехнического института им. М. И. Калинина (1975) трудился в вычислительных центрах треста «Апатитстрой» и «Главмурманскстрой». С 1982 по 1988 г. работал в отделе автоматизации ОАО «Апатит». В КНЦ РАН работает с февраля 1989 г., с 1989 по 2003 г. работал в Институте информатики и математического моделирования технологических процессов.

В 1998 г. Александр Борисович успешно защитил кандидатскую диссертацию на тему «Разработка системы концептуального моделирования и автоматизации синтеза сценариев регулирования регионального рынка труда».

Область основных научных интересов — экономика энергетики, разведка, добыча, транспортировка и переработка энергетических ресурсов Арктики и северных регионов России. Автор и соавтор более 100 научных трудов.

Помимо научной деятельности, занимался образовательной: с 1998 г. работал доцентом кафедры информационных систем КФ ПетрГУ, доцентом кафедры информационных систем и прикладной математики Мурманского государственного технического университета, также преподавал в ряде других вузов и их филиалах. Член ГЭК МГТУ.

Поздравляем Александра Борисовича с юбилеем и желаем ему крепкого здоровья, счастья и дальнейших творческих успехов.



Юбилеи



Юбилеи



ФРИДМАН Александр Яковлевич

д. т. н., профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории информационных технологий управления промышленно-природными системами. В Институте информатики и математического моделирования технологических процессов КНЦ РАН работает с 1989 г.

В 1975 г. окончил Ленинградский электротехнический институт, факультет автоматики и вычислительной техники. С 1975 по 1989 гг. работал в НПО «Норд» в г. Баку.

Защитил докторскую диссертацию на тему «Разработка интегрированной концептуальной модели природно-технических комплексов и методов ситуационного управления их структурой» (2001).

В период 1995–2013 гг. руководил научно-исследовательскими работами лабораторий информационных технологий управления промышленно-природными системами.

Область научных интересов — моделирование комплексных технологий и их воздействия на окружающую среду, прикладные интеллектуализированные системы. Разработал метод и систему ситуационного моделирования природно-технических комплексов, которые были дважды отмечены в перечне важнейших результатов РАН.

Александр Яковлевич — автор и соавтор 180 опубликованных работ, в т. ч. 4 монографий, 21 учебного пособия. Член Ученого совета Института информатики (с 1995 г.) и Ученого совета Центра физико-технических проблем энергетики Севера (с 2005 г.).

Член Российской ассоциации искусственного интеллекта и экспертного совета региона в области промышленности и энергетики. Ведет активную преподавательскую работу Апатитском филиале Мурманского арктического государственного университета в г. Апатиты, профессор кафедры информатики и вычислительной техники.

С 2012 г. является руководителем редакции журнала «Вестник Кольского научного центра РАН».

Поздравляем Александра Яковлевича с юбилеем и желаем здоровья, неугасаемой энергии, успешного претворения в жизнь научных идей!

60



ДАУВАЛЬТЕР Владимир Андреевич

д. г. н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории водных экосистем Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН.

Окончил геолого-разведочный факультет Ленинградского горного института в 1983 г. Трудовую деятельность начал в

должности инженера-гидрогеолога во ВНИИ геофизических исследований скважин (г. Октябрьский, Башкирская АССР). С 1986 по 1989 гг. работал инженером-гидрогеологом на Восточном руднике ПО «Апатит». В Институте проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН работает с 1989 г., с момента его образования. В 1994 г. защитил кандидатскую диссертацию, в 2000 г. — докторскую, в 2007 г. присвоено ученое звание профессора. Основные научные интересы связаны с изучением геохимического состава донных отложений и оценкой экологического состояния поверхностных вод Евро-Арктического региона.

Владимир Андреевич известен как ученый, внесший вклад в разработку теоретических основ методологических подходов оценки накопления и токсичности загрязняющих веществ в донных отложениях, определения экологической опасности загрязнения поверхностных вод Евро-Арктического региона. Собранный им материал позволяет оценить накопление токсичных тяжелых металлов и органических загрязняющих веществ в донных отложениях водоемов и водотоков Мурманской и Архангельской областей, Ненецкого автономного округа, Республик Коми и Карелии, а также северных районов Норвегии и Финляндии. Этот материал был использован для подготовки международных отчетов по заданию Советов министров Северных стран, обосновывающих принятие согласованных решений по экологической защите Северной Фенноскандии. В международных проектах с различными институтами и университетами Финляндии, Норвегии и Швеции является ответственным исполнителем разделов по оценке экологического состояния поверхностных вод. Входит в состав международной экспертной группы по изучению состояния поверхностных вод приграничных территорий.

В. А. Даувальтер осуществляет научное руководство самостоятельным направлением фундаментальных исследований, тем НИР Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, ответственный исполнитель грантов, научных контрактов, договоров и тем, выполняемых ИППЭС КНЦ РАН.



Юбилеи



Юбилары

Член ученых советов Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Геологического института КНЦ РАН, Апатитского филиала Мурманского государственного технического университета, а также диссертационного совета при Мурманском морском биологическом институте.

В. А. Даувальтер — член редколлегии международного журнала "Journal of Environmental Science and Health", Part A (Taylor & Francis Group Publishing), «Российского журнала прикладной экологии», эксперт РАН и Министерства образования и науки РФ.

Автор и соавтор более 400 научных работ, в т. ч. более 30 монографий и учебных пособий.

Научную работу Владимир Андреевич успешно сочетает с преподавательской деятельностью в качестве профессора кафедры геоэкологии Апатитского филиала МГТУ (2000 г. — по настоящее время), профессора экологического факультета Кольского филиала ПетрГУ (2000–2016 гг., в 2009–2016 гг. был заведующим кафедрой прикладной экологии и охраны окружающей среды КФ ПетрГУ). Под его руководством подготовлены и успешно защищены 70 квалификационных работ в вышеназванных вузах, а также 2 кандидатских диссертации.

Награжден почетными грамотами РАН, губернатора Мурманской обл., главы города Апатиты, Кольского научного центра РАН, ИППЭС КНЦ РАН, Кольского филиала ПетрГУ, присвоено звание «Ветеран труда».



КОЛЬКА Василий Васильевич

к. г.-м. н., доцент, заведующий лабораторией геологии и минерагении новейших отложений Геологического института КНЦ РАН, в котором работает с 1984 г.

Специалист в области изучения геологии кайнозойских отложений северо-востока Балтийского щита. Выдвинул концепцию образования ленточных глин путем сочетания турбидитного и гравитационного седиментационного механизмов в различных условиях осадконакопления. Ведет работы по точному определению перемещения береговой линии Баренцева и Белого морей в плейстоцен-голоценовое время, что необходимо для реконструкции палеогеографии и неотектоники Кольского региона и всего Балтийского щита. В своей работе тесно сотрудничает с коллегами из Норвегии, Швеции, Германии, Австрии.

Результаты исследований опубликованы в более чем 75 статьях и неоднократно включались в список важнейших достижений РАН.

Василий Васильевич известен и как активный спортсмен — многократный участник Мурманского лыжного марафона, большой любитель плавания и бега.

Поздравляем Василия Васильевича с юбилеем и желаем ему крепкого здоровья, счастья и дальнейших творческих успехов.



МАКАРЕВИЧ Павел Робертович

д. б. н. (2004), профессор (2009). В Мурманском морском биологическом институте КНЦ РАН с 1984 г. — первый заместитель директора по науке.

Павел Робертович Макаревич — один из ведущих специалистов в Мурманской обл.

в сфере изучения современного состояния экосистем, биоресурсов, экологии и природопользования арктических морей. Результаты его научных разработок в своей совокупности создают общую теоретическую основу формирования биопродуктивности в морях с ледовым покровом и находят широкое практическое применение при выработке стратегии охраны природы арктического шельфа, решении многих задач в области биоокеанологии и морской экологии.

Павел Робертович занимается проблемами экологической безопасности морских побережий и акваторий Мурманской обл., с конца 1980-х гг. руководил рядом проектов, в том числе международных, по оценке воздействия на окружающую среду проектируемых и строящихся промышленных объектов в Мурманской обл., таких как Штокмановское газоконденсатное месторождение, системы морского газопровода и рейдовые перегрузочные комплексы нефти в Кольском заливе и др. Благодаря его организаторским способностям подготовлено и проведено более 30 морских и береговых экспедиций, давших ценную информацию по биологическим ресурсам и состоянию окружающей среды в районах разведки, бурения и добычи углеводородного сырья на морских акваториях, прилегающих к Мурманской обл. В 1996–1998 гг. был организатором и участником пионерских экологических исследований на атомных ледоколах Мурманского морского пароходства по трассе Севморпути в Российской Арктике, заложивших методическую основу для последующего проведения многолетнего мониторинга. Участвовал в экспедиционных работах по оценке экологической ситуации в районе гибели АПЛ «Курск».

Ведет большую научно-организационную работу: заместитель председателя диссертационного совета при ММБИ КНЦ РАН, член редколлегии журналов «Вестник Кольского научного центра», «Вестник Мурманского государственного технического университета», «Наука Юга России», информационно-аналитического сборника «Российские полярные исследования».



Юбилеи



Юбилеи

Автор и соавтор более 220 научных публикаций, среди которых 7 монографий. Под руководством Павла Робертовича созданы электронные гидробиологические базы данных и атласы, которые используют не только российские ученые, но и зарубежные: базы данных «Фитопланктон Гренландского, Баренцева, Белого, Карского морей» (2014), «Зоопланктон морей Арктики» (2016), «Планктонные пелагические альгоценозы арктических морей в условиях полярной ночи и сезонного ледяного покрова» (2016), «Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878–2013)» (2014), «Биологический атлас морей Арктики» (2000).

Помимо научной работы П. Р. Макаревич много усилий уделяет педагогической деятельности: стоял у истоков создания и был активным организатором биологического факультета Мурманского государственного технического университета, в настоящее время — профессор кафедры биологии. Под его руководством подготовлены и успешно защищены 10 кандидатских диссертаций.

Достижения П. Р. Макаревича в профессиональной деятельности отмечены правительственными и ведомственными наградами: медалью ордена II степени «За заслуги перед Отечеством» (2006), нагрудным знаком «Почетный полярник» (2016), а также грамотами, премиями и благодарностями Правительства Мурманской области, РАН, ВМФ.



Владимир Степанович СЕЛИН

26 октября 1946 г. — 20 октября 2017 г.

Институт экономических проблем им. Г. П. Лузина Кольского научного центра Российской академии наук понес тяжелую, невосполнимую утрату: 20 октября 2017 года на 71-м году жизни в городе Великий Новгород скончался главный научный сотрудник, доктор экономических наук, профессор, заслуженный экономист РФ, почетный житель Мурманской области Владимир Степанович Селин.

Владимир Степанович 45 лет своей жизни отдал Кольскому научному центру РАН и Институту экономических проблем КНЦ РАН. После службы в армии с 1972 г. он работал в аппарате Кольского филиала АН СССР экономистом, начальником планово-финансового отдела. В ИЭП КНЦ РАН с 1986 г.: ст. научный сотрудник, зав. отделом, зам. директора по научной работе, директор Института в 2000–2005 гг., с 2006 до 2017 гг. — зав. отделом экономической политики и хозяйственной деятельности в Арктике и районах Крайнего Севера, главный научный сотрудник.

Владимир Степанович Селин — известнейший в нашей стране и за ее пределами ученый-северовед. В сферу его широких научных интересов входили исследования государственного регулирования социально-экономического развития территорий Севера и Арктики России, вопросы освоения арктического шельфа, проблемы возрождения Северного морского пути, исследования взаимодействия глобальных, государственных и региональных интересов в освоении Арктики.

Автор более 300 научных работ, в том числе более 30 монографий. Более 165 статей опубликовано в ведущих рецензируемых журналах ВАК.

Владимир Степанович вел большую педагогическую деятельность, руководил кафедрами экономического профиля в Кольском филиале Петрозаводского государственного университета, Апатитском филиале Санкт-Петербургского государственного инженерно-экономического университета, занимал должность профессора кафедры менеджмента в Мурманском государственном техническом университете. В течение многих лет являлся председателем диссертационного совета ИЭП КНЦ РАН, под его руководством подготовлено 20 кандидатов экономических наук.

Владимир Степанович вел большую общественную работу, был депутатом Мурманской областной думы (2001–2006), членом экспертного совета по Арктике и Антарктике при Совете Федерации, членом рабочей группы Государственной комиссии по вопросам развития Арктики, неоднократно выступал на парламентских слушаниях в Совете Федерации по вопросам, касающимся развития Арктической зоны Российской Федерации.

Заслуги Владимира Степанович были отмечены медалями «300 лет Российского флота» и «В память 300-летия Санкт-Петербурга» (2004), медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени (2012 г.) и другими наградами.

Владимир Степанович был не только большим, профессионально честным ученым, снискавшим глубочайшее уважение и огромный авторитет, но и очень хорошим человеком — умным, интеллигентным, скромным, доброжелательным, всегда готовым помочь. Он был коренным северянином, родился в городе Кировске Мурманской области, гордился этим и посвятил всю свою жизнь работе на благо российского Севера.

Сотрудники Института искренне скорбят и выражают глубокие соболезнования родным и близким Владимира Степановича Селина.

**Анатолий Федорович УСОВ**

8 ноября 1939 г. — 5 сентября 2017 г.

Анатолий Федорович Усов — один из старейших сотрудников Кольского научного центра РАН, более 40 лет возглавлял научно-организационный отдел КНЦ РАН.

Окончил Томский политехнический институт по специальности «инженер-электрик» (1962), после окончания учебы поступил в аспирантуру и успешно защитил кандидатскую диссертацию (1967). Анатолий Федорович был приглашен на работу в Кольский филиал Академии наук СССР в 1967 г.

в связи с организацией работ по новому перспективному научному направлению — электроимпульсное разрушение горных пород. Глубокие фундаментальные исследования и прикладные технологические разработки выполнялись в Горном институте КФАН СССР при его активном участии, а затем под его руководством в Центре физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН получили мировое признание.

Личный творческий вклад Анатолия Федоровича в развитие инновационных технологий отражен в 3 монографиях, 11 авторских свидетельствах, 160 научных статьях и многочисленных экспозициях на международных выставках в Европе, Китае и России. Его научные достижения были удостоены высшей награды РАН в области электротехники и электрофизики — премией имени П. Н. Яблочкина (2003), а технологические разработки — медалями ВДНХ СССР и международных инновационных салонов в Москве (2002 и 2007) и Санкт-Петербурге (2003).

В последние годы под руководством А. Ф. Усова осуществлялся крупный китайско-российский проект по созданию технологии электроимпульсного бурения скважин на морских нефтегазовых промыслах. Анатолий Федорович стремился обеспечить России конкурентное преимущество при освоении Арктического шельфа, но смерть безжалостно оборвала проект на переходе от стадии экспериментальных работ к финальному этапу создания пилотного бурового комплекса.

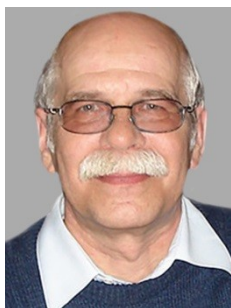
С 1975 г. он успешно сочетал научные исследования с активной научно-организационной деятельностью, выполняя функции ученого секретаря КФАН СССР, заместителя главного ученого секретаря и начальника научно-организационного отдела КНЦ РАН. В эти годы, благодаря его настойчивости и системности в организации комплексных работ, «коллективный портрет» научного сообщества заполярного Центра был полноценно отображен в 5-томной «Кольской энциклопедии» и справочнике «Ученые Кольского научного центра 1930–2010». При поддержке РФФИ А. Ф. Усов впервые в истории России создал интернет-сайт своей малой родины — «Мое село», ставший зачинателем обширной группы патриотических сайтов аналогичного типа.

Многие годы Анатолий Федорович вел педагогическую деятельность в Кольском филиале Петрозаводского государственного университета и Апатитском филиале Мурманского государственного технического университета, читал лекции для магистрантов и консультировал аспирантов в Университете науки и технологий Хуажонг в Китае.

Неоднократно избирался председателем профкома Управления КНЦ РАН, входил в состав Совета профсоюза Мурманской региональной организации работников РАН.

За плодотворный и добросовестный труд А. Ф. Усов был удостоен почетных грамот Президиума КФАН СССР / КНЦ РАН, Президиума РАН, главы города Апатиты, губернатора Мурманской области, награжден медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени.

В сердцах его коллег всегда будет жить Память о делах и свершениях, осуществленных совместно с таким ярким и принципиальным человеком, надежным товарищем, настоящим ученым, беспредельно преданным своему делу.



Александр Павлович ЖИЧКИН

4 января 1952 г. — 26 августа 2017 г.

Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН понес тяжелую утрату: 26 августа 2017 г. на 66-м году жизни скоропостижно скончался старший научный сотрудник Института, кандидат географических наук Александр Павлович Жичкин.

Александр Павлович родился 4 января 1952 г. в городе Саранске. После школы прошел службу в армии, освоил несколько рабочих профессий. В 1980 г. окончил Ленинградский гидрометеорологический институт по специальности «Океанология». Еще в период учебы на заочном отделении поступил на работу в управление «Севрыбпромразведка», где с 1978 по 2002 гг. прошел путь от инженера до директора по научной работе. Он участвовал в морских и авиационных экспедициях в морях Западной Арктики и Северной Атлантике, приобрел ценный опыт прикладных морских исследований, приступил к научным обобщениям собранного материала. Его первые публикации по исследованию океанологических процессов и их влияния на рыбный промысел увидели свет в 1990 г. За трудовые заслуги в период работы в «Севрыбпромразведке» был награжден медалью «300 лет Российскому флоту» (2000).

В 2005 г. после вынужденного продолжительного перерыва Александр Павлович вернулся к научным исследованиям, поступив на работу в Мурманский морской биологический институт. Он сразу нашел свое место в коллективе лаборатории океанографии и радиоэкологии, определил новое и перспективное направление исследований — влияние океанологических факторов на географию рыбного промысла. За короткое время выполнил законченное прикладное исследование и опубликовал его результаты в виде «Атласа российского промысла трески в Баренцевом море» (2008). Эта работа вышла за рамки первоначального замысла и стала незаменимым пособием по промысловой океанологии и для специалистов-практиков, и для научных работников, и для преподавателей вузов. На ее основе Александр Павлович в 2008 г. защитил кандидатскую диссертацию и с этого времени получил заслуженное признание в качестве одного из ведущих ученых ММБИ. Продолжая выбранное направление, он выполнил цикл работ по климатическим изменениям ледяного покрова в арктических морях, что стало важным вкладом в исследования современного состояния морских экосистем Арктики.

Александр Павлович был в самом высоком смысле тружеником науки, отличался исключительной добросовестностью во всех своих работах, постоянно стремился к новым знаниям и техническим навыкам, всегда был готов плодотворно работать с коллегами и помогать начинающим сотрудникам. При некоторой внешней замкнутости он нередко раскрывался как эрудированный и остроумный собеседник, человек с богатым жизненным опытом.

Память об Александре Павловиче Жичкине, большом ученом и замечательном человеке, навсегда сохранится в наших сердцах.



КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
184209, Мурманская область, г.Апатиты, ул.Ферсмана, 14

KOLA SCIENCE CENTRE
14, Fersman str., Apatity, Murmansk region, 184209, RUSSIA

