

ISSN 0869-5997

И РУДЫ 
МЕТАЛЛЫ
ORES AND METALS

3/2024

РУДЫ И МЕТАЛЛЫ 3/2024

Учредитель

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов»
Роснедра Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации

Свидетельство о регистрации средства массовой информации № 01919 от 21 декабря 1992 г.

Решением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации журнал включён в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени доктора и кандидата наук»

Москва, ЦНИГРИ, 2023

Журнал издаётся при поддержке Международной ассоциации по генезису рудных месторождений



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Наумов Евгений Анатольевич

главный редактор
первый заместитель генерального директора ФГБУ «ЦНИГРИ»
кандидат геолого-минералогических наук

Иванов Анатолий Иннокентьевич

заместитель главного редактора
и. о. генерального директора ФГБУ «ЦНИГРИ»
доктор геолого-минералогических наук

Дамдинов Булат Батуевич

заместитель генерального директора ФГБУ «ЦНИГРИ»
доктор геолого-минералогических наук

Пирайно Франко

заместитель главного редактора
по международным публикациям
профессор, Университет Западной Австралии,
г. Перт, Австралия

Жаркова Вера Сергеевна

заместитель главного редактора
по редакционно-издательской деятельности
заместитель начальника редакционно-оформительского
отдела ФГБУ «ЦНИГРИ»

Аракчеев Дмитрий Борисович

генеральный директор ФГБУ «Росгеолфонд»
кандидат технических наук

Бозкая Гульчан

доктор наук, профессор
инженерно-геологического факультета
Университета Памуккале, Турция

Волчков Алексей Гордеевич

заведующий научно-методическим
отделением МСБ ФГБУ «ЦНИГРИ»
кандидат геолого-минералогических наук

Вымазалова Анна

Чешская геологическая служба,
г. Прага, Чешская Республика

Голубев Юрий Конкордьевич

начальник отдела алмазов ФГБУ «ЦНИГРИ»
кандидат геолого-минералогических наук

Горячев Николай Анатольевич

главный научный сотрудник СВКНИИ ДВО РАН
доктор геолого-минералогических наук, член-корр. РАН

Звездов Вадим Станиславович

начальник отдела металлогении ФГБУ «ЦНИГРИ»
доктор геолого-минералогических наук

Калинин Юрий Александрович

главный научный сотрудник ИГМ СО РАН
доктор геолого-минералогических наук

Кременецкий Александр Александрович

советник генерального директора ФГБУ «ИМГРЭ»
доктор геолого-минералогических наук

Кряжев Сергей Гаврилович

начальник отдела минералогии,
изотопной геохимии месторождений
благородных и цветных металлов ФГБУ «ЦНИГРИ»
доктор геолого-минералогических наук

Кузнецов Владимир Вениаминович

начальник отдела цветных металлов ФГБУ «ЦНИГРИ»
кандидат геолого-минералогических наук

Мишенин Сергей Григорьевич

начальник отдела геофизики ФГБУ «ЦНИГРИ»
кандидат геолого-минералогических наук

Похиленко Николай Петрович

научный руководитель ИГМ СО РАН
доктор геолого-минералогических наук,
академик РАН

Проскурнин Василий Фёдорович

заведующий отделом региональной геологии
и полезных ископаемых
Восточных районов России ФГБУ «ВСЕГЕИ»
доктор геолого-минералогических наук

Зельтманн Реймар

профессор, Музей естественной истории,
г. Лондон, Великобритания

Толстов Александр Васильевич

ведущий научный сотрудник ИГАБМ СО РАН
доктор геолого-минералогических наук,
действительный член АН РС(Я)

Фридовский Валерий Юрьевич

директор ИГАБМ СО РАН
доктор геолого-минералогических наук,
профессор

Черных Александр Иванович

советник управляющего директора ООО «УК Полюс»
кандидат геолого-минералогических наук

ORES AND METALS 3/2024

Founded by FSBI «Central research institute of geological prospecting for base and precious metals» (TsNIGRI)
Federal Agency for Subsoil Use

Mass media registration certificate No 01919 (21.12.1992)

Published since 1992

Moscow, TsNIGRI, 2023

The Journal is published with the support of the IAGOD
(International association on the genesis of ore deposits)



EDITORIAL BOARD

Evgeniy A. Naumov

Editor-in-chief
Deputy Director, FSBI TsNIGRI
PhD

Anatoly I. Ivanov

Deputy editor-in-chief
Acting General Director, FSBI TsNIGRI
PhD

Bulat B. Damdinov

Deputy editor-in-chief
Deputy Director, FSBI TsNIGRI
PhD

Franco Pirajno

Deputy editor-in-chief for international publications
Dr., Adjunct Professor at Centre for Exploration Targeting,
University of Western Australia

Vera S. Zharkova

Deputy editor-in-chief for editorial
and publishing activities
Deputy head of editorial
and design department, FSBI TsNIGRI

Dmitry B. Arakcheev

General Director, FSBI Rosgeolfond
PhD

Gülcan Bozkaya

Dr., Professor, Department of Geological Engineering
Pamukkale University, Turkey

Alexey G. Volchkov

Head of mineral base scientific
and methodical division, FSBI TsNIGRI
PhD

Anna Vymazalova

Dr., Czech Geological Survey, Czech Republic

Yuri K. Golubev

Head of diamond department, FSBI TsNIGRI
PhD

Nikolay A. Goryachev

Chief researcher, NEISRI FEB RAS
Corr. Member of RAS

Vadim S. Zvezdov

Head of metallogeny department, FSBI TsNIGRI
PhD

Yuri A. Kalinin

Chief researcher, IGM SB RAS
PhD

Alexander A. Kremenetsky

Advisor to General Director, FSBI IMGRE
PhD

Sergey G. Kryazhev

Head of mineralogy and isotope geochemistry
department, FSBI TsNIGRI
PhD

Vladimir V. Kuznetsov

Head of base metals department, FSBI TsNIGRI
PhD

Sergey G. Mishenin

Head of geophysics department, FSBI TsNIGRI
PhD

Nikolay P. Pokhilenko

Scientific Director, IGM SB RAS
Academician of RAS

Vasily F. Proskurin

Head of the Eastern Russia regional geology
and minerals department, FSBI VSEGEI
PhD

Reimar Seltmann

Dr., Professor, Head of CERCAMS
(Centre for Russian and Central EurAsian
Mineral Studies),
Natural History Museum, London

Alexander V. Tolstov

Leading researcher, IGABM SB RAS
PhD, Full member of SB RAS

Valery Yu. Fridovsky

Director, IGABM SB RAS
PhD, Professor

Alexander I. Chernykh

Advisor to Managing Director, Polyus PJSC
PhD



СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА, ПОИСКОВ, ОЦЕНКИ И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Болонин А. В.

Изотопный состав кислорода–
углерода и стронция в первичных
карбонатитах мира: сводка данных
и линейные тренды

5

METHODS AND TECHNIQUES OF MINERAL DEPOSITS FORECASTING, PROSPECTING, ASSESSMENT AND EXPLORATION

Bolonin A. V.

Oxygen–Carbon and Strontium Isotope
Composition in Primary Carbonatites
of the World: The Data Summary
and Linear Trends

СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

**Мигачёв И. Ф., Звездов В. С.,
Конкин В. Д.**

Палеотектоническая позиция
базальтоидных вулcano-плутонических
поясов с меднопорфировыми
месторождениями

28

GEOLOGY OF THE ORE DEPOSITS

**Migachev I. F., Zvezdov V. S.,
Konkin V. D.**

Paleotectonic setting of basaltoid
volcano-plutonic belts with porphyry
copper deposits

**Игнатов П. А., Иванов А. А.,
Малютин С. А., Попов Е. М.**

Дуговые разломы золоторудного поля
Голден Вэлли зеленокаменного пояса
Мидлендс (Зимбабве) и их роль
в локализации оруденения

47

**Ignatov P. A., Ivanov A. A.,
Malyutin S. A., Popov E. M.**

Arc-shaped faults of the Golden Valley
gold field of the Midlands greenstone belt
in Zimbabwe and their role in localization
of the ore mineralization

**Морохин А. И., Шумилова Т. Г.,
Светов С. А.**

Особенности вещественного состава
первичных, смешанных и окисленных
медных руд в габброидах Волковского
массива (Средний Урал, Россия)

58

**Morokhin A. I., Shumilova T. G.,
Svetov S. A.**

Compositional peculiarities of the primary,
mixed, and oxidized copper ores
in gabbroids of the Volkovsky massif
(Middle Urals, Russia)

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНОМ ПРОЦЕССЕ

Забелин А. В., Ратьков С. С.

Опыт систематизации,
централизации фондовых материалов
геологоразведочного комплекса
АК «АЛРОСА» (ПАО)

82

INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE EXPLORATION PROCESS

Zabelin A. V., Ratkov S. S.

Practice of the systematization
and centralization of archive fund materials
of the PJSC ALROSA geological
exploration complex

Изотопный состав кислорода–углерода и стронция в первичных карбонатитах мира: сводка данных и линейные тренды

Болонин А. В.

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва, Россия

Аннотация. Выполнен статистический регрессионный анализ сводки собранных из опубликованной литературы изотопных данных по 176 карбонатитовым проявлениям мира (всего 1829 парных значений $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$ в первичных карбонатитах). В большинстве проявлений в значениях $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$ выявлены отчётливые линейные тренды, аппроксимируемые на диаграммах векторами по формуле регрессии $y = kx + b$. Выделяются тренды трёх направлений. Доминирует тренд с угловым коэффициентом k в диапазоне $0,0 \div +0,6$ и в среднем $+0,31$ (прямая корреляция $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$). В литературе его связывают с релейевским высокотемпературным фракционированием карбонатитовых расплавов или с их седиментационной коровой контаминацией. Второй тренд с k от $0,0$ до $-0,7$ (обратная корреляция $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$) связывают с дегазацией CO_2 из расплавов. Редок третий тренд с k от $+0,6$ до $+1,5$. В остальных карбонатитовых проявлениях линейные тренды в значениях $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$ не обнаруживаются. Это может быть следствием совместного действия разнонаправленных линейных трендов. В этой связи универсальным изотопным показателем для всех карбонатитовых проявлений принята начальная точка трендовых векторов. На диаграмме $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$ в поле начальных точек очерчен бокс PC-90, включающий 90 % проявлений первичных карбонатитов. Координаты угловых точек бокса $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$ ‰: $(+5 \div -8)$, $(+5 \div -5)$, $(+5,5 \div -2,5)$, $(+12 \div -2,5)$, $(+12 \div -7)$, $(+9 \div -8,5)$. PC-90 по изотопному составу углерода подразделён на две части значением $\delta^{13}\text{C} = -5,2$ ‰. Тем самым предполагаются разные по изотопному составу углерода глубинные источники. Корреляция в изотопном составе кислорода–углерода и стронция в карбонатитах не обнаруживается, что предполагает неоднородность глубинных источников также и по изотопному составу стронция.

Ключевые слова: карбонатиты, изотопы кислорода, углерода и стронция, линейные тренды.

Для цитирования: Болонин А. В. Изотопный состав кислорода–углерода и стронция в первичных карбонатитах мира: сводка данных и линейные тренды. Руды и металлы. 2024. № 3. С. 5–27. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10011.

Oxygen–Carbon and Strontium Isotope Composition in Primary Carbonatites of the World: The Data Summary and Linear Trends

Bolonin A. V.

FSBI "Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals", Moscow, Russia

Annotation. A statistical regression analysis was performed of a summary of borrowed literary isotopic data on 176 carbonatite occurrences worldwide (a total of 1829 paired $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$ values in primary carbonatites). For most of the occurrences, distinct linear trends in $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$ values were revealed, approximated in diagrams by vectors using the regression formula $y = kx + b$. Trends in three directions are distinguished. The dominating trend possesses the angular coefficient k in the range of $0.0 \div +0.6$, averaging at $+0.31$ (direct correlation $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$). In the literature, it is associated with the Rayleigh high-temperature fractionation of carbonatite melts or with their sedimentary crustal contamination. The second trend with k from 0.0 to -0.7 (inverse correlation $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$) is associated with CO_2 degassing from the melts. The third trend with k from $+0.6$ to $+1.5$ is rare. In other carbonatite occurrences, no linear trends in $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$ values are detected. This may be a consequence of a combined action of the multidirectional linear trends. In this regard, the initial point of the trend vectors is accepted as a universal isotope indicator for all the carbonatite occurrences. In the $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$ diagram, the box PC-90 is outlined in the field of the initial points, including 90 % of the primary carbonatite occurrences. The coordinates of the corner points of the box in $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$ ‰ are $(+5 \div -8)$, $(+5 \div -5)$, $(+5.5 \div -2.5)$, $(+12 \div -2.5)$, $(+12 \div -7)$, $(+9 \div -8.5)$. The box PC-90 is subdivided into two parts by the carbon isotope composition, using the value $\delta^{13}\text{C} = -5.2$ ‰. This suggests that the deep sources differ in carbon isotope composition. No correlation is found in the oxygen–carbon and strontium isotope compositions in the carbonatites, which suggests that the deep sources are also heterogeneous in the strontium isotope composition.

Keywords: carbonatites; oxygen, carbon, and strontium isotopes; linear trends.

For citation: Bolonin A. V. Oxygen–Carbon and Strontium Isotope Composition in Primary Carbonatites of the World: The Data Summary and Linear Trends. Ores and metals, 2024, № 3, pp. 5–27. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10011.

Введение. По литературным источникам из 176 карбонатитовых проявлений мира собраны 1829 пар сопряжённых значений изотопного состава кислорода и углерода ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$) в первичных карбонатитах. Выполнена статистическая обработка значений, включая линейный регрессионный анализ по формуле $y = kx + b$. Дополнительно собраны данные по изотопному составу стронция в тех же карбонатитовых проявлениях. Сводка изотопных данных публиковалась ранее [3]. Обновлённая сводка превосходит раннюю по количеству и полноте статистической обработки данных.

В сводку включены изотопные данные по пробам, которые авторы литературных источников классифицируют как первичные карбонатиты. Карбонатитовые проявления представляют собой объекты разных форм и размеров – комплексы, массивы, штоки, тела, дайки, фациальные зоны. Изотопные анализы выполнены по материалу карбонатных пород (сёвит, альвикит, бекфорсит и др.), реже по монофракциям кальцита, доломита, анкерита, сидерита. Анализируемый материал в большинстве случаев классифицируется как первичные карбонатиты на основе петрографических наблюдений, которыми в породах не регистрируются заметные вторичные минеральные изменения эндогенного или экзогенного типа. К «вторичным карбонатитам» авторы относят гидротермально изменённые, перекристаллизованные, выветрелые, окисленные породы, а также сопутствующие гидротермальные карбонатные жилы, туфы, вторичный кальцит. В редких случаях к «вторичным карбонатитам» относят значения $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$, значительно отклоняющиеся от диапазонов, типичных для первичных карбонатитов.

Изотопная сводка включает 176 карбонатитовых объектов, по которым имелись два и более парных значений $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$. Из них 153 объекта входят в известный список из 527 карбонатитовых проявлений мира [8]. Этому списку в статье соответствуют названия проявлений и их идентификационные номера (ID). Сверх списка привлечены 23 дополнительных проявления. Лимитируемый объём статьи не позволяет представить полную базу данных

и список литературных источников (около 150 названий). Тем не менее по названиям и фамилиям, имеющимся в табличном приложении, большинство источников могут быть найдены в интернете.

На всех изотопных диаграммах горизонтальная ось $x - \delta^{18}\text{O}$, ‰ (V-SMOW), вертикальная ось $y - \delta^{13}\text{C}$, ‰ (V-PDV). Такое положение осей имеет значение при регрессионном анализе. На диаграммах на обеих осях длина 1 ‰ выдерживается одинаковой. Это позволяет визуально единообразно сравнивать форму полей точек и угол наклона трендовых линий на разных диаграммах. Лабораторная точность индивидуальных определений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$ не хуже 0,1–0,2 ‰. Для краткости изложения далее используются сокращения: $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ – парные значения (точки на диаграмме) изотопного состава кислорода и углерода, КП – карбонатитовые проявления, PC – первичные карбонатиты (от Primary Carbonatites), линейное (нелинейное, изометрическое) КП – карбонатитовое проявление с линейной взаимосвязью (без линейной взаимосвязи) значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$, max–min $\delta^{18}\text{O}$ и max–min $\delta^{13}\text{C}$ – разность между максимальным и минимальным значениями в выборке.

Сводные данные. В изотопную сводку включены 1829 индивидуальных значений $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$, классифицируемых авторами как первичные карбонатиты. Все точечные значения вынесены на диаграмме (рис. 1), где они заполняют обширное поле между мантийным значением $\delta^{18}\text{O}$ около 5,0 ‰ и нормально-осадочными морскими карбонатами (NSC). На этом основана гипотеза широкой контаминации первичного мантийного карбонатитового источника коровым седиментационным материалом [1, 2].

Из тех же литературных источников попутно взяты 299 точечных значений, отнесённых авторами к «вторичным карбонатитам». На диаграмме эти точки занимают наиболее широкое поле. В целом оно смещено в направлении увеличения $\delta^{18}\text{O}$ (утяжеления кислорода), в том числе в сторону гипергенных почвенных карбонатов (SC), образующихся под действием метеорных вод.

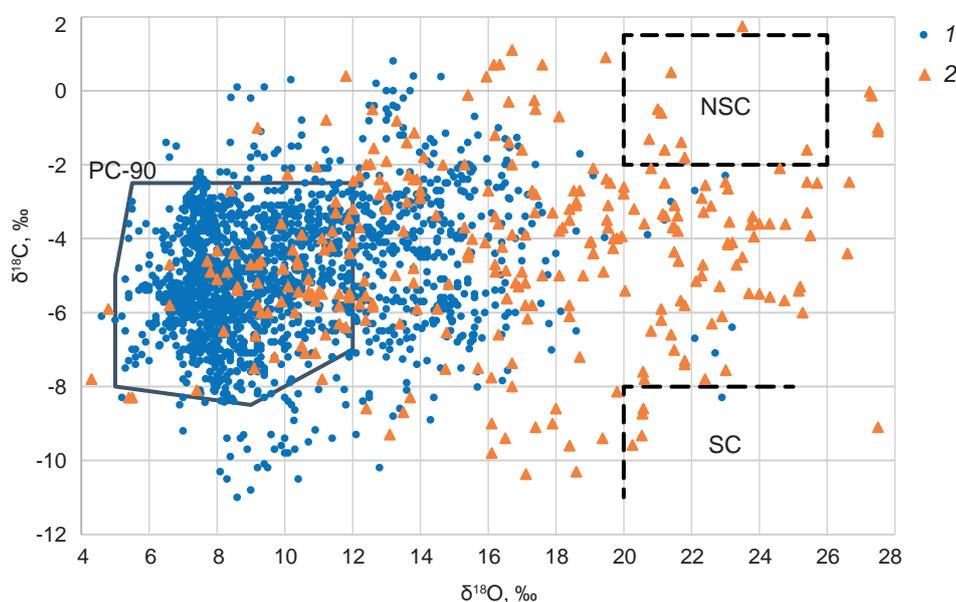


Рис. 1. Значения $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ в индивидуальных пробах карбонатитов мира:

1 – в первичных ($n = 1829$) и 2 – вторичных ($n = 299$) карбонатитах. NSC – нормально-осадочные морские карбонаты; SC – почвенные карбонаты [7]. Контур PC-90 обоснован на рис. 7

Fig. 1. The $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ values in individual samples of carbonatites from around the world:

1 – in primary carbonatites ($n = 1829$) and 2 – in secondary carbonatites ($n = 299$). NSC – marine normal sedimentary carbonates; SC – soil carbonates [7]. The PC-90 contour is based on Fig. 7

Более интересный результат даёт трендовый анализ изотопных данных в пределах отдельных КП. В рассматриваемых 176 объектах число точек $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ колеблется от 2 до 54. Трендовый анализ выполнен в 155 КП, в которых имеются три и более изотопных точек. Таблица с этими КП приведена в конце статьи. Для каждого из КП в программе Microsoft Excel 97-2003 построена точечная диаграмма и линия тренда (регрессии), рассчитаны уравнение регрессии $y = kx + b$, включающее угловой коэффициент k и постоянное число b , а также коэффициент детерминации (достоверности аппроксимации) R^2 . Коэффициент R^2 равен квадрату коэффициента парной корреляции и отражает степень линейной взаимосвязи значений: от полного её отсутствия ($R^2 = 0$) до полной функциональной зависимости ($R^2 = 1,0$). Примеры диаграмм приводятся на последующих рисунках. Линия тренда на диаграммах изображается как вектор, направленный

в сторону увеличения $\delta^{18}\text{O}$. В использованной литературе противоположное направление вектора, в сторону уменьшения $\delta^{18}\text{O}$, в рассматриваемых КП практически не допускается. Для каждого КП рассчитаны минимальное, максимальное и среднее значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$, разности $\text{max-min } \delta^{18}\text{O}$ и $\text{max-min } \delta^{13}\text{C}$, а также начальная точка линии тренда с координатами $x = \text{min } \delta^{18}\text{O}$ и $y (\delta^{13}\text{C}) = kx + b$.

Вначале построенный была выбрана группа КП, удовлетворяющих двум «жёстким» условиям – число проб в выборке не менее четырёх и разность между максимальным и минимальными значениями $\text{max-min } \delta^{18}\text{O}$ более 2,0 ‰. Линейный тренд в выборке определялся по визуальному восприятию поля точек на диаграммах и значению коэффициента R^2 . Примеры диаграмм в порядке увеличения R^2 приведены на рисунке 2. В этом ряду линейная форма поля точек начинает визуально уверенно фиксироваться с проявления Четлас-

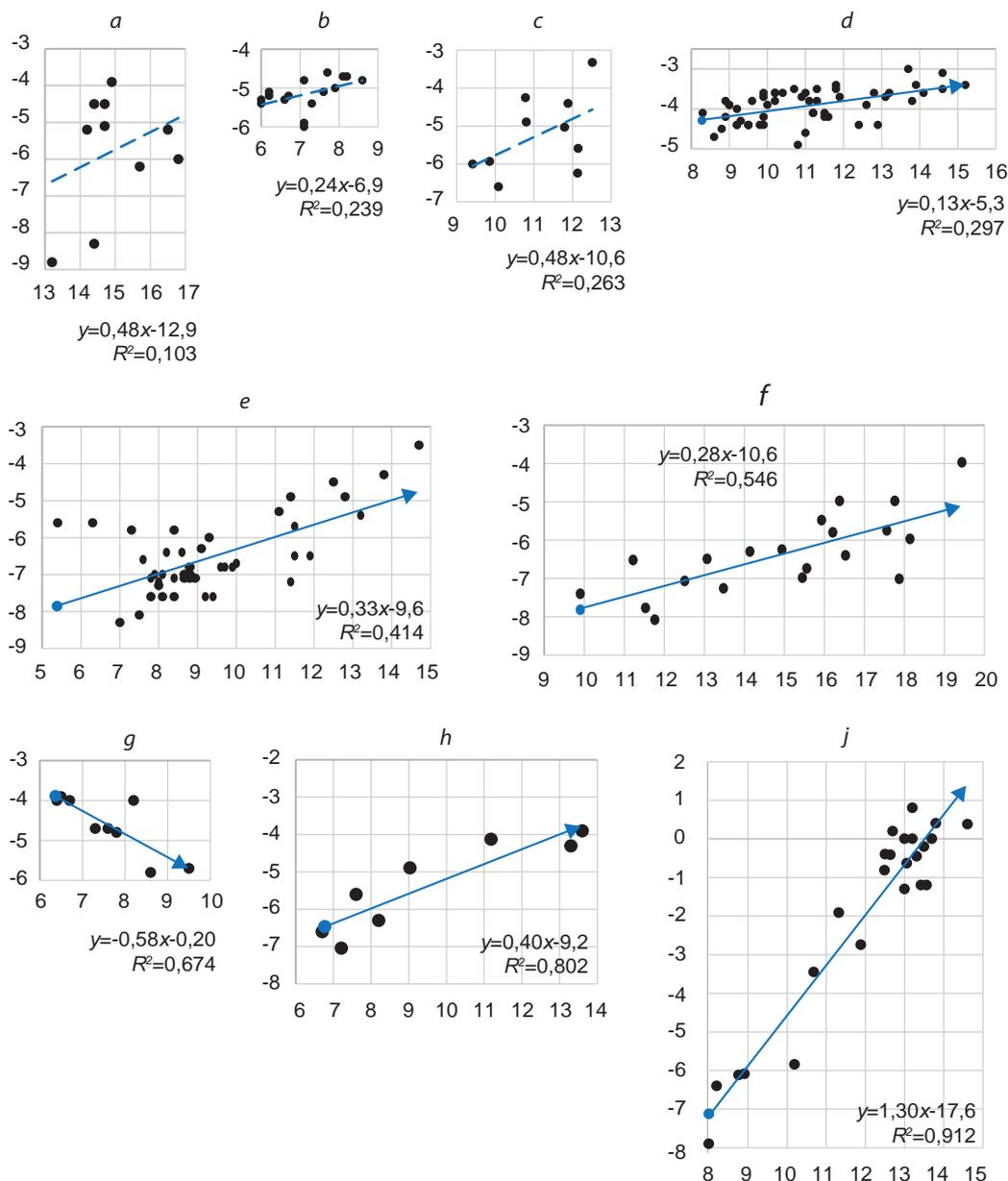


Рис. 2. Примеры трендового анализа парных значений $\delta^{18}\text{O}$ ‰ (ось x) и $\delta^{13}\text{C}$ ‰ (ось y) в группе КП с $\text{max}-\text{min } \delta^{18}\text{O}$ более 2,0 ‰ (в скобках здесь и далее ID):

a – Зандкопсдриффт (122), b – Глейбат-Лафуд, c – Майоа (337), d – Четласский (413), e – Тапира (299), f – Чиригуэло (310), g – Ваджилитаг (318), h – Баилундо (5), i – Мато-Прето (306). Синий вектор – линия регрессии с начальной точкой. КП расположены в порядке увеличения коэффициента R^2

Fig. 2. Examples of the trend analysis of the paired values $\delta^{18}\text{O}$ ‰ (x -axis) and $\delta^{13}\text{C}$ ‰ (y -axis) in the group of carbonatite occurrences with the difference $\text{max}-\text{min } \delta^{18}\text{O}$ of more than 2.0 ‰ (in brackets here and below – ID):

a – Zandkopsdrift (122), b – Gleibat-Lafhouda, c – Miayoa (337), d – Chetlassky (413), e – Tapira (299), f – Chiriguuelo (310), g – Wajilitage (318), h – Bailundo (5), i – Mato Preto (306). The blue vector is the regression line with the starting point. The carbonatite occurrences are arranged in order of increasing the coefficient R^2

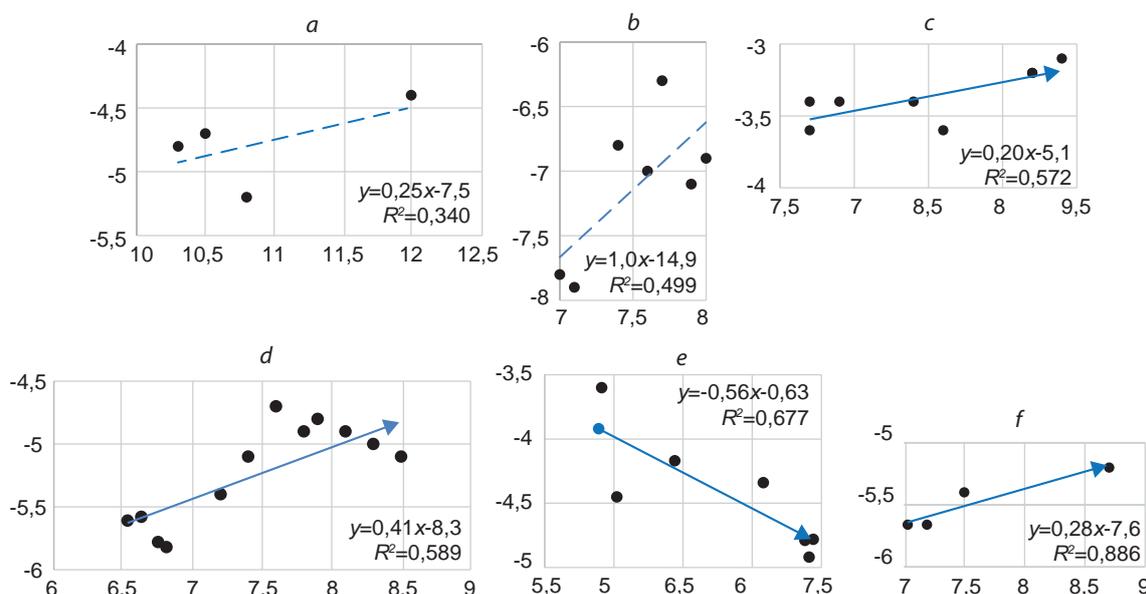


Рис. 3. Примеры трендового анализа значений $\delta^{18}\text{O}$ ‰ (ось x) и $\delta^{13}\text{C}$ ‰ (ось y) в группе КП с разностью $\text{max-min } \delta^{18}\text{O}$ от 1,0 до 2,0 ‰:

a – Волтуре, b – Вишневогорский (414), c – Хома-Маунтин (33), d – Матонго (16), e – Лайвайюки (489), f – Магнет-Ков (282). КП расположены в порядке увеличения коэффициента R^2

Fig. 3. Examples of the trend analysis of the values $\delta^{18}\text{O}$ ‰ (x-axis) and $\delta^{13}\text{C}$ ‰ (y-axis) in the group of carbonatite occurrences with the difference $\text{max-min } \delta^{18}\text{O}$ from 1.0 to 2.0 ‰:

a – Vulture, b – Vishnevogorsky (414), c – Homa Mountain (33), d – Matongo (16), e – Laivajoki (489), f – Magnet Cove (282). The carbonatite occurrences are arranged in order of increasing the coefficient R^2

ский ($R^2 = 0,30$) (см. рис. 2, d). Это значение соответствует коэффициенту парной корреляции 0,55, который в статистике характеризует начало отчётливой линейной взаимосвязи. Таким способом рассчитанный линейный тренд устанавливается в 57 КП, имеющих R^2 от 0,30 до 0,99.

В группе КП с разностью $\text{max-min } \delta^{18}\text{O}$ от 1,0 до 2,0 ‰ также можно выделить достоверно линейные КП путём повышения порога минимального R^2 . На рисунке 3 в ряду КП в порядке увеличения R^2 отчётливый линейный тренд фиксируется у КП с R^2 более 0,50 (соответствует коэффициенту парной корреляции более 0,71). В эту группу попадают 7 КП.

Наряду с отчётливо линейными КП (R^2 более 0,30) линейная форма поля точек видна у некоторых КП с R^2 менее 0,30. Такие КП проявляют визуальную линейность за счёт большой растянутости точек вдоль оси $\delta^{18}\text{O}$ (рис. 4). Мерой растянутости может служить отноше-

ние разностей $\text{max-min } \delta^{18}\text{O} / \text{max-min } \delta^{13}\text{C}$. При отношении более 2,75 такие КП на диаграммах кажутся линейными (всего 19 объектов).

Есть примеры КП, в которых отсутствие линейности можно объяснить совмещением двух разнонаправленных трендов (рис. 5, a). Совместное действие трендов приводит прежде всего к увеличению дисперсии $\delta^{13}\text{C}$, что «размывает» общее поле точек с потерей линейности. Вместе с тем, среди КП с широким диапазоном $\delta^{18}\text{O}$ есть примеры, где их линейность достигается включением в выборку удалённых по оси $\delta^{18}\text{O}$ точек (см. рис. 5, b). Не исключено, что удалённые точки принадлежат «вторичным карбонатитам», в которых эпигенетические изменения не были зарегистрированы при петрографическом изучении.

Рассмотренные выше линейные КП в базе данных представлены 83 объектами (57 + 7 + 19). Остальные 72 КП, не удовлетворяю-

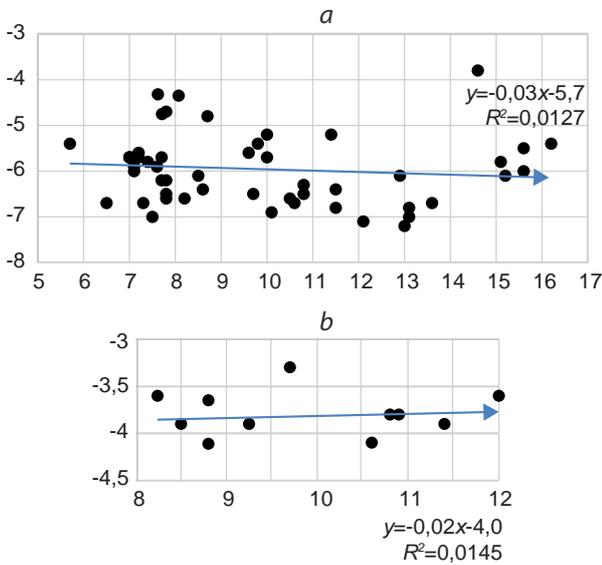


Рис. 4. Примеры визуально линейных КП с R^2 менее 0,30. Отношение $\max\text{-min } \delta^{18}\text{O} / \max\text{-min } \delta^{13}\text{C}$:

a – Кайзерштуль (499) – 3,09, *b* – Циганбулак – 4,64

Fig. 4. Examples of visually linear carbonatite occurrences with R^2 less than 0.30. The ratio $\max\text{-min } \delta^{18}\text{O} / \max\text{-min } \delta^{13}\text{C}$:

a – Kaiserstuhl – 3,09, *b* – Qiegenbulake – 4,64

щие вышеизложенным критериям линейности, можно отнести к группе нелинейных, то есть без выраженной линейной взаимосвязи индивидуальных значений $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$. Нелинейные КП по форме полей точек можно подразделить на изометрические (32 объекта) и остальные промежуточные (переходные к линейным). Мерой изометричности может служить отношение разностей $\max\text{-min } \delta^{18}\text{O} / \max\text{-min } \delta^{13}\text{C}$. В изометрических КП оно менее 1,9 (рис. 6).

Изометрические КП имеют меньший, чем линейные, но довольно широкий диапазон разностей: $\max\text{-min } \delta^{18}\text{O}$ от 1,0 до 9,6 ‰ и $\max\text{-min } \delta^{13}\text{C}$ от 0,7 до 5,4 ‰. Крайними примерами могут служить проявления Ока и Амба-Донгар (см. рис. 6, *b*, *e*). Для изометрических КП характеристической является средняя точка со среднеарифметическими значениями $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$. Отклонения от неё в разные стороны до некоторого предела являются статистически случайными. Но можно предположить, что широкие диапазоны ($\max\text{-min } \delta^{18}\text{O}$ более

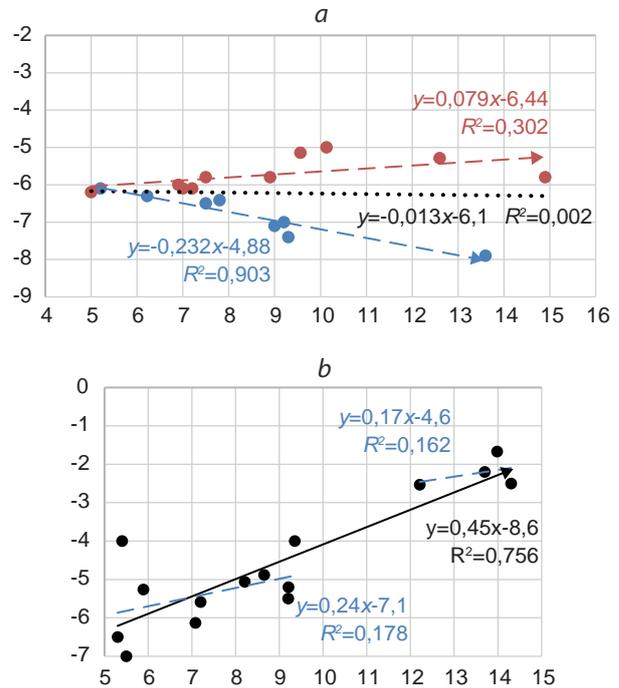


Рис. 5. Примеры совмещения разных трендов $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ в КП:

a – пример в целом нелинейного КП Ошурково (448) ($R^2 = 0,002$), в котором совмещены два разных линейных тренда с R^2 0,302 и 0,903; *b* – пример линейного КП Монте-Верде (6) ($R^2 = 0,756$), который приобрёл линейность за счёт удалённых по оси $\delta^{18}\text{O}$ точек ($R^2 = 0,162$)

Fig. 5. Examples of combining different $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ trends in carbonatite occurrences:

a – an example of a generally nonlinear Oshurkovo (448) carbonatite occurrence ($R^2 = 0,002$), in which two different linear trends with R^2 0,302 and 0,903 are combined; *b* – an example of a linear Monte Verde (6) carbonatite occurrence ($R^2 = 0,756$), that has acquired the linearity due to remote points along the $\delta^{18}\text{O}$ axis ($R^2 = 0.162$)

4–5 ‰) обусловлены смешением разнонаправленных линейных трендов, как это показано на рис. 5, *a*. Ситуация со смешением трендов более подробно смоделирована в [3]. В выборках изометрических КП формально также может быть вычислена начальная точка векторов. Она мало отличима от точки с минимальным значением $\min \delta^{18}\text{O}$ и средним значением $\text{aver } \delta^{13}\text{C}$ (см. рис. 6).

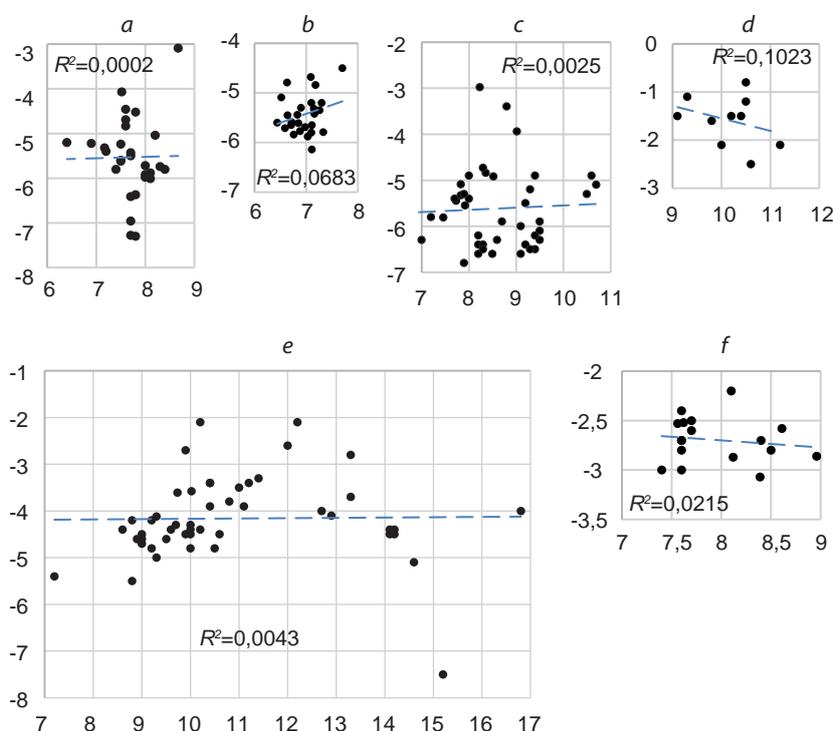


Рис. 6. Примеры изометрических КП:

отношение $\max\text{-min } \delta^{18}\text{O} / \max\text{-min } \delta^{13}\text{C}$: *a* – Альнё (515) – 0,54, *b* – Ока (230) – 0,77, *c* – Тамазерт (64) – 0,98, *d* – Весёлое (450) – 1,24, *e* – Амба-Донгар (356) – 1,78, *f* – Турий Мыс (406) – 1,79

Fig. 6. Examples of isometric carbonatite occurrences:

Ratio $\max\text{-min } \delta^{18}\text{O} / \max\text{-min } \delta^{13}\text{C}$: *a* – Alnö (515) – 0,54, *b* – Oka (230) – 0,77, *c* – Tamazert (64) – 0,98, *d* – Veseloe (450) – 1,24, *e* – Amba-Dongar (356) – 1,78, *f* – Turiy Mys (406) – 1,79

Преобладающее распространение в изотопной системе $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ отчётливо линейных КП и вероятность потери линейности в изометрических КП в результате смешения разных трендов – оба фактора позволяют применить в качестве характеристической начальную точку трендов для всего множества КП. Начальные и средние точки в 155 КП отображены на диаграмме (рис. 7). Начальные точки относительно средних смещены влево. Следует также заметить, что начальная точка некоторых КП может быть смещена на диаграмме влево в случае появления при дальнейшем изучении дополнительных изотопных значений с наименьшим $\delta^{18}\text{O}$. На диаграмме очерчен полигональный контур – бокс *PC-90*, включающий 90 % начальных точек. Координаты его

угловых точек $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ ‰: (+5÷-8), (+5÷-5), (+5,5÷-2,5), (+12÷-2,5), (+12÷-7), (+9÷-8,5). Своим левым краем бокс совпадает с первичным мантийным значением $\delta^{18}\text{O}$ около 5 ‰, определяемым по изотопии перидотитов и океанических базальтов [4]. *PC-90* шире бокса первичного изверженного карбонатита – *PC* [5] и значительно удалён от боксов нормально-осадочных морских и почвенных карбонатов. Бокс *PC-90* можно воспринимать как «обычный» для начальных точек $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ в первичных карбонатитах. За его пределы выходят немногочисленные объекты, для которых желателен поиск причин отклонения от «обычных» значений.

На диаграмме (рис. 8, *a*) вынесены начальные точки и линии трендов для 64 отчётли-

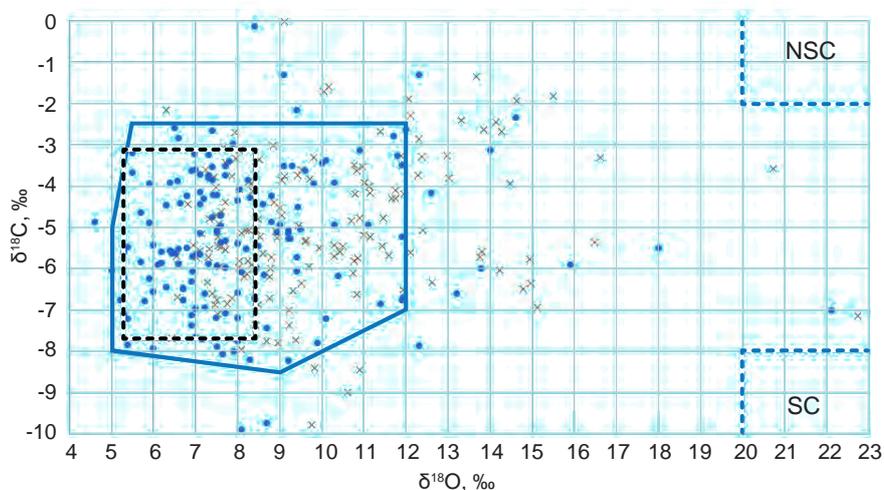


Рис. 7. Средние точки $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ (крестики) и начальные точки трендов (кружки) в 155 проявлениях первичных карбонатитов [5]:

полигональный синий контур PC-90 охватывает 90 % начальных точек; штриховой чёрный контур – первичные изверженные карбонатиты [5]; NSC – нормально-осадочные морские карбонаты; SC – почвенные карбонаты

Fig. 7. Mean points of $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ (crosses) and initial points of the trends (circles) in 155 occurrences of primary carbonatites [5]:

The polygonal blue contour PC-90 embraces 90 % of the initial points; the dashed black contour – primary igneous carbonatites [5]; NSC – marine normal-sedimentary carbonates; SC – soil carbonates

во линейных КП. На диаграмме просматриваются три направления трендов. Они также выделяются при статистическом анализе углового коэффициента k (см. рис. 8, *b*). Коэффициент k изменяется в широком диапазоне от -0,7 до +1,5, в котором с долей условности считаются три отдельных интервала. На диаграмме интервалы показаны в форме секторов, а векторами – средние интервальные значения. Резко доминирует сектор k в диапазоне $0,0 \div +0,6$ (средний вектор +0,31). Подчинённое распространение имеют сектор $0,0 \div -0,7$ и сектор $+0,6 \div +1,5$.

Бокс PC-90 по визуальному восприятию на диаграмме (см. рис. 8, *a*) можно подразделить по вертикали на две части по значению $-5,2 \text{ ‰ } \delta^{13}\text{C}$. Такое разделение видится в левой части диаграммы в расположении линейных трендов и начальных точек. Аргументом в пользу такого разделения может служить и тот факт, что начальные точки проявлений,

находящихся в одном регионе, часто располагаются на диаграмме в одной её части – верхней или нижней (рис. 9). Впрочем, есть и располагающиеся в обеих частях (Индия-запад, Кольский). Различие по значению $\delta^{13}\text{C}$ между двумя группами КП на региональном уровне может указывать на гетерогенность глубинных карбонатитовых источников по изотопному составу углерода.

Во многих КП присутствуют разные минеральные типы карбонатитов, формирующихся, как правило, в разные изверженные фазы или стадии. Наиболее распространены кальцитовые и доломитовые карбонатиты, редки анкеритовые и сидеритовые. На диаграммах приведены примеры разного изотопного соотношения двух типов карбонатитов (рис. 10, см. подписи). В целом доминирует тенденция увеличения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$ в доломитовых и сидеритовых карбонатитах по сравнению с кальцитовыми.

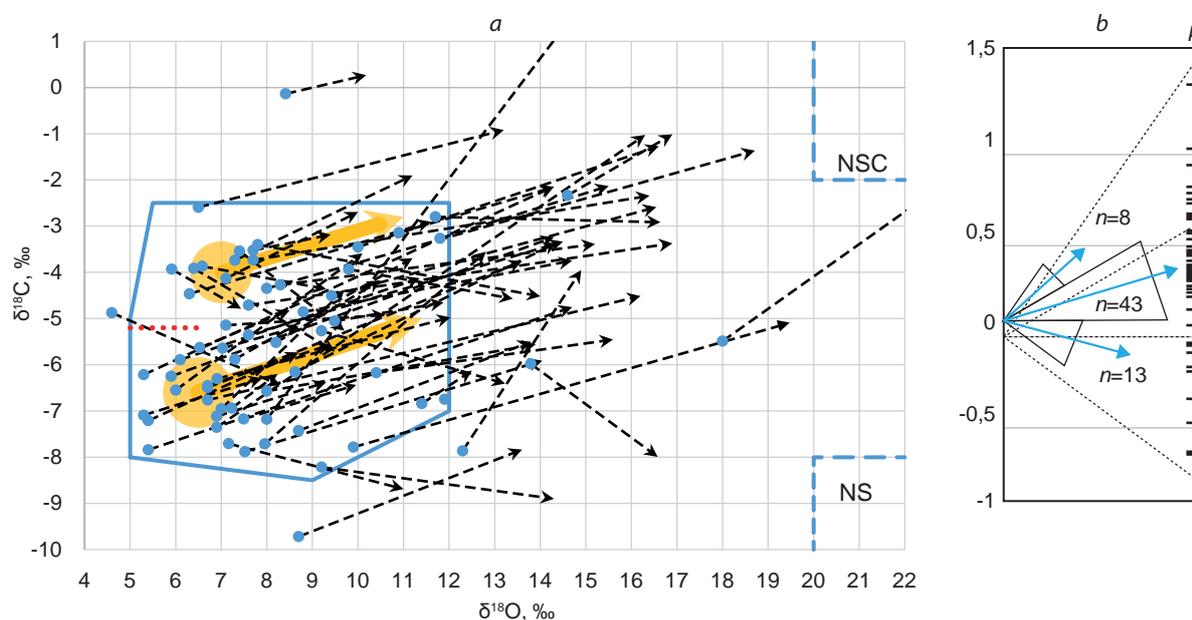


Рис. 8. Начальные точки $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ и линии тренда в отчётливо линейных КП:

a – линии тренда $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ (чёрные векторы) и их начальные точки (синие) в 64 первичных карбонатитовых проявлениях мира. Бокс PC-90 (синий контур) подразделён на две части значением $-5,2$ ‰ $\delta^{13}\text{C}$ (красный пунктир); жёлтые стрелки – предполагаемые два центра начальных точек и исходящие из них векторы; *b* – диаграмма углового коэффициента k в уравнении регрессии $y = kx + b$. Раздельно показаны интервалы k : $0,0 \div -0,7$ (среднее $-0,29$ из $n = 13$); $0,0 \div 0,6$ (среднее $+0,31$ из $n = 43$); $0,6 \div 1,5$ (среднее $+0,9$ из $n = 8$)

Fig. 8. $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ starting points and trend lines in distinctly linear carbonatite occurrences:

a – the $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ trend lines (black vectors) and their initial points (blue) in 64 primary carbonatite occurrences worldwide. The box PC-90 (blue contour) is subdivided into two portions by the value of $\delta^{13}\text{C}$ -5.2 ‰ (red dotted line); yellow arrows – two assumed centers of initial points and vectors emanating from them; *b* – diagram of the angular coefficient k in the regression equation $y = kx + b$. The following intervals of k are shown separately: $0.0 \div -0.7$ (average -0.29 of $n = 13$); $0.0 \div 0.6$ (average $+0.31$ of $n = 43$); $0.6 \div 1.5$ (average $+0.9$ of $n = 8$)

В использованных литературных источниках содержатся также данные по изотопному составу стронция в карбонатитах. Данные по 99 карбонатитовым проявлениям вынесены на диаграмме (рис. 11) и в прилагаемой таблице. Используются минимальное начальное значение ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) $_i$ и минимальное начальное значение $\min \delta^{18}\text{O}$. Из диаграммы видно, что корреляция между значениями не обнаруживается. Нет корреляции и в паре $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $\delta^{13}\text{C}$ (диаграмма не приводится). Наклонная линия на диаграмме – это линия смешения мантийного источника ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,702$ и

$\delta^{18}\text{O} = 5$ ‰) и седиментационного контаминанта ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,710$ и $\delta^{18}\text{O} = 20$ ‰) при условии равной концентрации стронция в обоих источниках. Известно, что карбонатиты в большинстве случаев обогащены стронцием по сравнению с осадочными карбонатами. При таком условии полоса точек выше линии смешения на диаграмме может отражать седиментационную коровую контаминацию магм [2]. Однако широкий разброс точек ниже линии оставляет место для других гипотез, включая гетерогенность первичного источника по изотопному составу стронция на уров-

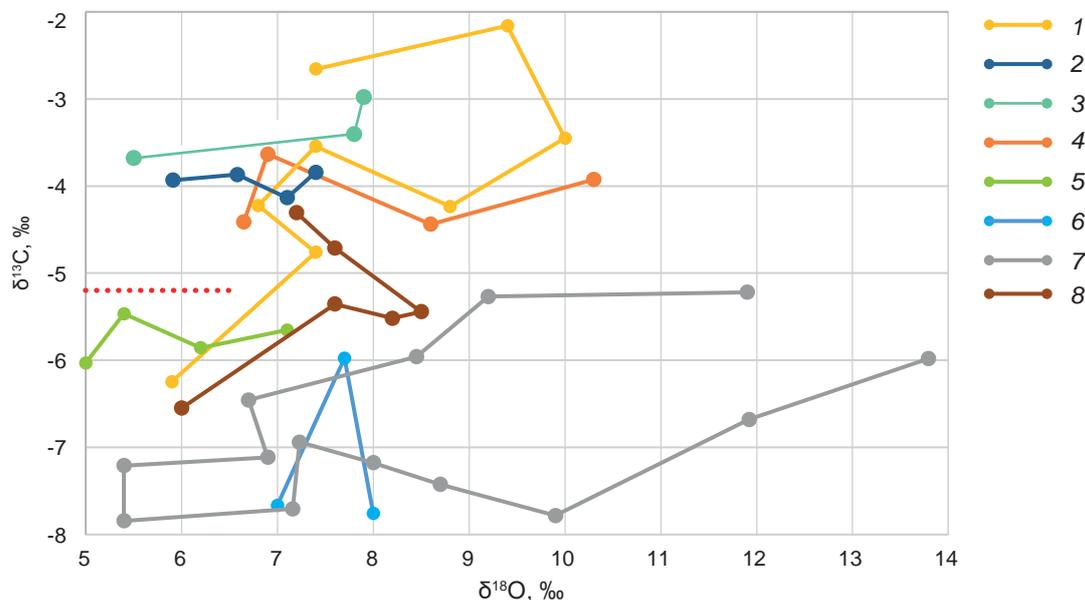


Рис. 9. Начальные точки $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ в карбонатитовых проявлениях в разных регионах мира (красным пунктиром проявления подразделены на две части по значению $-5,2\text{‰}$ $\delta^{13}\text{C}$):

1 – Кольский – Хибинь, Озёрная Варакка, Телячий Остров, Турий мыс, Ковдор, Салланлатви, Вуориярви, Тикшеозеро; 2 – Финляндия – Сокли, Лайвайюки, Кортярви, Силинярви; 3 – Малави (Африка) – Канганкунде, Сонгве-Хилл, Чилва; 4 – Гренландия – Гардинер, Грендел-Ика, Какарсук, Игалико; 5 – Южная Сибирь – Жидой, Южное, Халюта, Ошурково; 6 – Урал – Вишневогорский, Потанино, Булдым; 7 – Южная Америка (Бразилия, Боливия, Парагвай) – Серро-Сапо, Чиараки, Ангико-Диас, Каталан-II, Каталан-I, Салитри, Аракса, Тапира, Джукия, Якупиранга, Барра-Итапирапуа, Мато-Прето, Чиригуэло, Серра-Негра; 8 – Индия-запад – Сарну-Дандали, Мундвара, Невания, Сиривасан, Амба-Донгар, Амба-Донгар-дайка

Fig. 9. Initial points of $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ in carbonatite occurrences in various regions of the world (the occurrences are subdivided into two portions by the value $\delta^{13}\text{C} -5,2\text{‰}$, shown by the red dotted line):

1 – Kola region – Khibiny, Ozernaya Varaka, Telyachy Island, Turiy Mys, Kovdor, Sallanlatvi, Vuoriarvi, Tiksheozero; 2 – Finland region – Sokli, Laivajoki, Kortejärvi, Siilinjarvi; 3 – Malawi region (Africa) – Kangankunde, Songwe Hill, Chilwa Island; 4 – Greenland region – Gardiner, Grennedal-Ika, Qaqarssuk, Igaliko; 5 – Southern Siberia region – Zhidoy, Yuzhnoye, Khaluta, Oshurkovo; 6 – Ural region – Vishnevogorsky, Potanino, Buldym; 7 – South America region (Brazil, Bolivia, Paraguay) – Cerro Sapo, Chiaracke, Angico dos Dias, Catalan II, Catalan I, Salitre, Araxa, Tapira, Juquia, Jacupiranga, Barra do Itapirapua, Mato Preto, Chiriguuelo, Serra Negra; 8 – India-West region – Sarnu-Dandali, Mundwara, Newania, Siriwasan, Amba-Dongar, Amba-Dongar-Dike

не мантии. Нижнее левое поле на диаграмме ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0,704$ и $\delta^{18}\text{O} < 8,5\text{‰}$) можно считать «мантийным» в изотопной системе Sr–O.

Заключение. По 176 карбонатитовым проявлениям мира собраны данные по изотопному составу кислорода и углерода в первичных карбонатитах – всего 1829 парных значений $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$. По 155 проявлениям выполнен статистический анализ изотопных выборок по

формуле линейной регрессии $y = kx + b$. Линейные тренды обнаруживаются более чем в половине объектов, что видно на диаграммах в координатах $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ (‰). Трендовые векторы направлены в сторону увеличения $\delta^{18}\text{O}$. Векторы характеризуются начальной точкой, наклоном к оси x и коэффициентом детерминации R^2 . Начальная точка имеет минимальное по выборке значение $x = \min \delta^{18}\text{O}$ и значе-

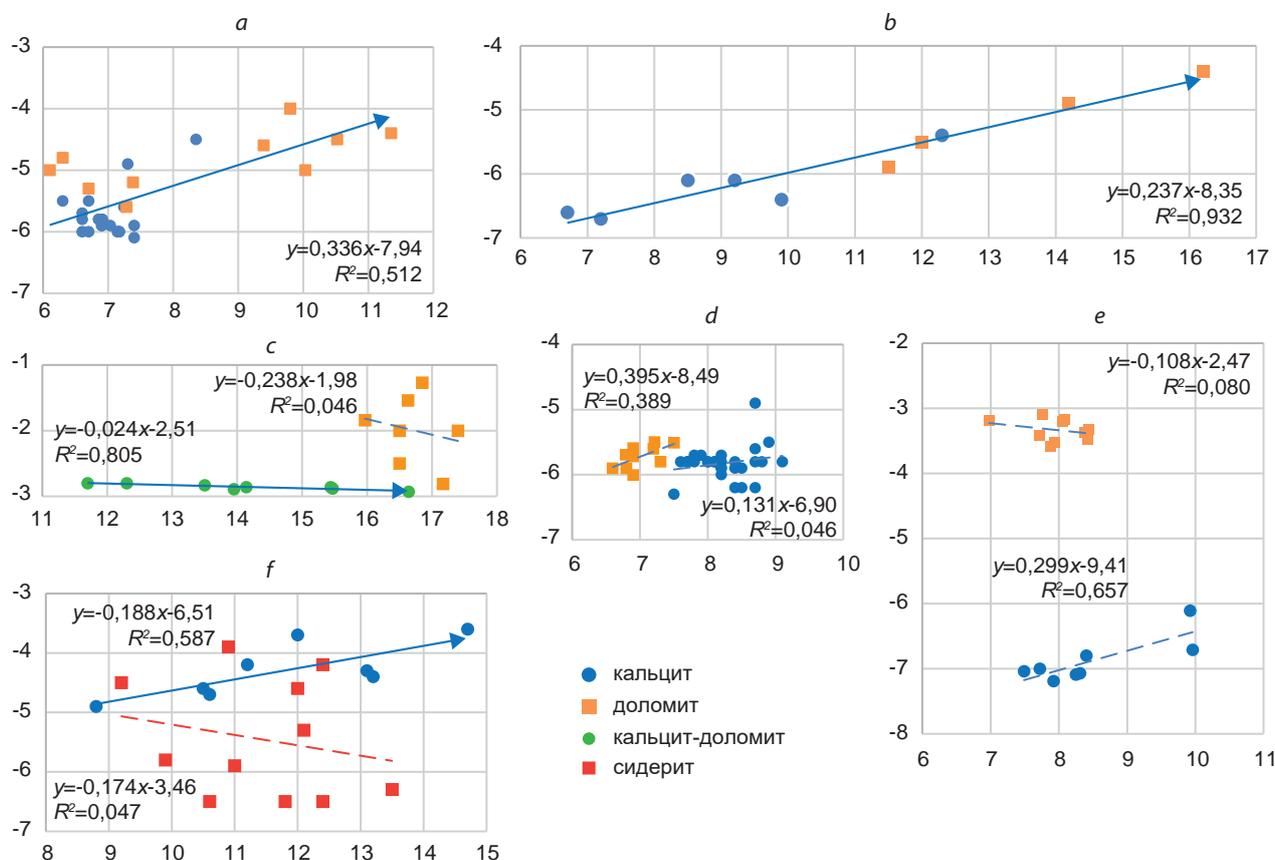


Рис. 10. Примеры разного соотношения кальцитовых и доломитовых карбонатов на диаграмме $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$:

a – Белая Зима (Нижнесаянский) (439) – нелинейный кальцит и линейный доломит с близкой начальной точкой; *b* – Хааст-Ривер (484) – линейный доломит на продолжении линейного кальцита; *c* – Спитскоп (105) – нелинейный доломит на окончании линейного кальцита; *d* – Пакканаду (369) – доломит и кальцит различаются по $\delta^{18}\text{O}$ при одинаковом $\delta^{13}\text{C}$; *e* – Каотан – доломит и кальцит различаются по $\delta^{13}\text{C}$ при одинаковом $\delta^{18}\text{O}$; *f* – Карасуг – линейный кальцит и нелинейный сидерит с общей начальной точкой

Fig. 10. Examples of different ratios of calcite and dolomite carbonatites on the $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ diagram:

a – Belaya Zima (Nizhnesayansky) (439) – nonlinear calcite and linear dolomite with the closely spaced starting points; *b* – Haast River (484) – linear dolomite on the continuation of linear calcite; *c* – Spitskop (105) – nonlinear dolomite at the ending of linear calcite; *d* – Pakkanadu (369) – dolomite and calcite differ in $\delta^{18}\text{O}$ with the same $\delta^{13}\text{C}$; *e* – Caotan – dolomite and calcite differ in $\delta^{13}\text{C}$ with the same $\delta^{18}\text{O}$; *f* – Karasug – linear calcite and nonlinear siderite with the common starting point

ние $y = \delta^{13}\text{C}$, вычисляемое из формулы регрессии. Наклон вектора определяется угловым коэффициентом k , а коэффициент R^2 определяет силу взаимосвязи значений.

Угловой коэффициент k варьируется в широком диапазоне от $-0,7$ до $+1,5$, в котором выделяются три трендовых направления. Доминирует тренд с k от $0,0$ до $+0,6$, в среднем $+0,31$ (прямая корреляция $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$). Размах линий тренда (разность $\max\text{-}\min \delta^{18}\text{O}$) колеблется от $1,0$ до $10,7$ ‰, в среднем $4,6$ ‰. В литературе [2, 4, 6] такой тренд принято объяснять действием двух совпадающих по направлению факторов – релеевским высокотемпературным

факторов – релеевским высокотемпературным

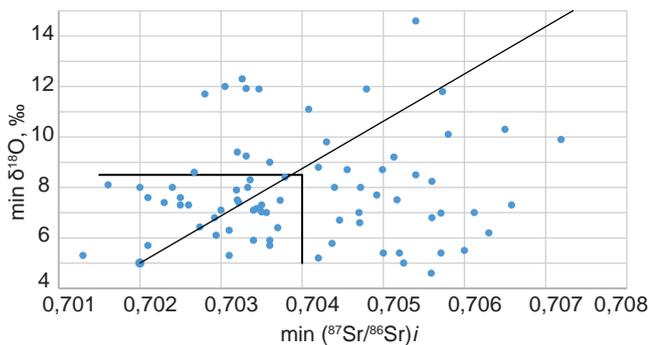


Рис. 11. Изотопный состав стронция и кислорода в карбонатитовых проявлениях мира

Fig. 11. Isotopic composition of strontium and oxygen in carbonatite occurrences of the world

фракционированием карбонатитовых расплавов и (или) седиментационной (коровой) контаминацией расплавов в промежуточных очагах. Второй тренд с коэффициентом k от 0,0 до -0,7 (обратная корреляция $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$) менее распространён, его связывают с дегазацией CO_2 из расплавов. Редок третий тренд с увеличенным коэффициентом k от +0,6 до +1,5 (прямая корреляция $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$). Во всех трёх случаях увеличенные размахи трендов ($\text{max}-\text{min } \delta^{18}\text{O}$ более 5–7 ‰) позволяют предполагать дополнительное воздействие на первичные карбонатиты не зафиксированных при петрографических наблюдениях вторичных процессов – флюидных, низкотемпературных гидротермальных, метаморфических, гипергенных.

У половины карбонатитовых проявлений линейные тренды $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$ не отчётливы или отсутствуют (на диаграмме точки образуют поле изометрической формы). Это может быть следствием совместного действия разнонаправленных эндогенных факторов, например, высокотемпературного фракционирования и дегазации расплавов. Исходя из такого предположения, для проявлений без отчётливого линейного тренда $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$ также можно вычислять начальную точку и принимать её как наиболее приближённую к первичному изотопному составу изверженных карбонатитов.

В поле начальных изотопных точек $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$ на диаграммах оконтурен бокс PC-90,

включающий 90 % проявлений первичных карбонатитов. Его можно принять как «обычный» для первичных карбонатитов, имеющих существенно глубинный источник вещества при минимальном или умеренном проявлении изотопного фракционирования или контаминации расплавов. За пределами бокса остаются редкие проявления, требующие углублённой петрографической аргументации их первичной природы. Бокс PC-90 имеет довольно отчётливые ограничения с трёх сторон значениями: слева +5,0 ‰ $\delta^{18}\text{O}$, сверху -2,5 ‰ $\delta^{13}\text{C}$, снизу -8,0 ‰ $\delta^{13}\text{C}$. Граница справа +12,0 ‰ $\delta^{18}\text{O}$ является произвольной. PC-90 по вертикали подразделяется на две части по значению -5,2 ‰ $\delta^{13}\text{C}$, тем самым предполагаются разные по изотопному составу углерода глубинные источники, что находит подтверждение в региональных различиях карбонатитовых проявлений.

Корреляция в изотопном составе кислорода и стронция в карбонатитах в целом не обнаруживается. Значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ варьируются в широком диапазоне 0,701–0,707. Это предполагает неоднородность глубинных карбонатитовых источников по изотопии стронция, автономную от изотопной неоднородности по кислороду.

Изотопный состав кислорода, углерода и стронция в первичных карбонатитах мира рассмотрен на обширной статистической базе. Полученные данные подтверждают основные тенденции в изотопной эволюции карбонатитов, обсуждаемые в литературе. Вместе с тем остаётся возможность для дополнительных суждений и обобщений. Начальные точки линейных трендов в выборках карбонатитовых проявлений максимально приближены к первичному изотопному составу O и C, их можно использовать и при анализе изотопных данных по другим типам «мантийных» пород – кимберлитам, основным и щелочным породам. В целом широкие вариации в первичных карбонатитах начального изотопного состава C–O–Sr предполагают гетерогенность глубинных мантийных источников карбонатитовых магм и контаминацию их в промежуточных коровых очагах.



Таблица. Изотопный состав кислорода, углерода и стронтия в первичных карбонатах мира

Table. Isotopic composition of oxygen, carbon, and strontium in primary carbonates of the world

ID	Проявление	Страна	Литературный источник	n	k	b	R ²	$\delta^{18}\text{O}$ min	$\delta^{18}\text{O}$ max	$\delta^{18}\text{O}$ aver	$\delta^{13}\text{C}$ min	$\delta^{13}\text{C}$ max	$\delta^{13}\text{C}$ aver	$\delta^{13}\text{C}$ initial	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	InOuzzal	Algeria	Ouzegane et al., 1988	7	0,197	-9,57	0,032	7,65	10,27	9,38	-8,92	-6,35	-7,72	-8,06	
3	Catanda-Jango	Angola	Campey et al., 2015	4	0,410	-9,58	0,367	9,40	10,40	9,95	-6,00	-5,20	-5,50	-5,73	
5	Bailundo	Angola	Pineau et al., 1973; Alberti et al., 1999	8	0,397	-9,15	0,802	6,70	13,60	9,60	-7,04	-3,09	-5,34	-6,50	
6	Monte Verde	Angola	Pineau et al., 1973; Alberti et al., 1999	15	0,452	-8,61	0,756	5,30	14,30	9,01	-7,00	-1,67	-4,53	-6,21	
10, 11	Tchivira-Bonga	Angola	Alberti et al., 1999	7	0,269	-7,04	0,443	9,42	16,55	12,28	-5,31	-1,88	-3,74	-4,51	
15	Lupongola	Angola	Alberti et al., 1999	10	0,302	-10,16	0,474	7,52	14,04	9,23	-8,32	-6,27	-7,37	-7,88	
16	Matongo	Bourundi	Dolenek 2015; Decree et al., 2015	13	0,410	-8,30	0,589	6,53	8,50	7,54	-5,82	-4,70	-5,21	-5,63	
21	Wadi Tarr	Egypt	Shimron, 1975	3	-0,731	-2,96	0,321	5,20	8,30	6,43	-9,40	-5,30	-7,67	-6,76	0,7042
33	Homa Mountain	Kenya	Dennis and Schrag, 2010	8	0,199	-5,06	0,572	7,70	9,40	8,51	-3,60	-3,10	-3,36	-3,52	
34	Buru	Kenya	Onuanga, 1997	16	0,117	-5,63	0,091	12,61	16,10	14,48	-4,39	-3,07	-3,94	-4,16	
39	Kangankunde	Malawi	Dennis and Schrag, 2010; Nelson 1987; Broom Fendley et al., 2017	9	-0,372	-1,63	0,136	5,50	10,26	8,49	-6,03	-2,30	-4,79	-3,68	0,7016
47	Chilwa Island	Malawi	Simonetti and Bell, 1994	13	0,086	-3,66	0,073	7,90	14,15	11,39	-3,27	-1,50	-2,68	-2,98	0,7032
51	Songwe Hill	Malawi	Broom- Fendley et al., 2016	4	-0,180	-2,00	0,826	7,80	14,00	11,13	-4,60	-3,40	-4,00	-3,40	
64	Tamazert	Morocco	Bouabdellah et al., 2010; Marks et al., 2009	42	0,048	-6,03	0,003	6,94	10,70	8,60	-6,80	-2,98	-5,62	-5,70	0,7033
	Gleibat Lafhouda	Morocco	Bouabdellah et al., 2022	16	0,240	-6,87	0,239	6,00	8,60	7,15	-6,00	-4,60	-5,16	-5,43	0,7032
73	Xiluvo	Mozambique	Melluso et al., 2004	3	-0,101	-4,34	1,000	7,50	13,00	9,63	-5,66	-5,10	-5,32	-5,10	0,7032
82	Lofdal	Namibia	Vistorina Nandigolo, Do Cabo, 2013	3	0,272	-7,32	0,901	6,43	10,30	8,08	-5,72	-4,58	-5,13	-5,57	0,7027



Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
89	Dicker Willem	Namibia	Reid and Cooper, 1992	7	0,064	-5,60	0,347	7,10	10,60	8,44	-5,20	-4,80	-5,06	-5,14	
103	Phalaborwa	South Africa	Suwa et al., 1975	4	0,219	-5,84	0,232	8,05	10,20	9,06	-4,28	-3,10	-3,85	-4,07	0,7039
105	Spitskop	South Africa	Harmer 1999, Suwa et al., 1975	8	-0,024	-2,51	0,805	11,70	16,64	14,14	-2,93	-1,27	-2,45	-2,80	0,7028
109	Kruidfonten	South Africa	Clarke, 1989	5	0,290	-6,31	0,687	10,90	14,30	13,32	-3,00	-1,90	-2,40	-3,14	
113	Premier Mine	South Africa	Suwa et al., 1975	4	0,650	-14,25	0,600	11,40	12,50	11,93	-7,20	-6,00	-6,50	-6,84	
122	Zandkopsdrift	South Africa	Ogungbuy et al., 2015	10	0,477	-12,90	0,103	13,20	16,80	14,95	-8,80	-3,90	-5,77	-6,60	0,7033
126	Oldoinyo Lengai	Tanzania	Bell and Keller 1995; Halama et al., 2007	9	-0,052	-6,48	0,072	5,78	9,30	7,47	-7,14	-6,30	-6,86	-6,78	0,7044
127	Kerimasi	Tanzania	Zaitsev et al., 2013	3	0,235	-5,95	0,989	7,43	12,77	9,43	-4,27	-2,96	-3,73	-4,20	
142	Panda Hill (Mbeya)	Tanzania	Suwa et al., 1975; Dennis and Schrag, 2010; Dolenek, 2015	13	0,121	-5,60	0,082	5,90	9,70	7,48	-5,40	-3,80	-4,70	-4,89	0,7034
146	Fort Portal	Uganda	Deines and Gold, 1973; Benkó et al., 2021	4	-0,133	-6,99	0,980	9,20	14,30	10,90	-8,90	-8,20	-8,45	-8,22	
156	Tororo	Uganda	Ackerman et al., 2021; Benkó et al., 2021; Dennis and Schrag, 2010	14	0,472	-7,19	0,638	7,30	11,20	8,84	-3,85	-1,60	-3,02	-3,74	0,7025
157	Sukulu	Uganda	Deines and Gold, 1973; Benkó et al., 2021; Ackerman et al., 2021	11	0,159	-4,41	0,199	7,30	8,90	8,04	-3,38	-2,80	-3,13	-3,25	0,7026
173	Aley	Canada	Mader, 1986; Chakhmouradian et al., 2015	6	0,090	-6,00	0,101	7,70	10,70	8,53	-5,80	-4,90	-5,23	-5,31	
176	Wicheeda	Canada	Trofanenko, 2014	22	0,259	-8,09	0,832	6,91	12,03	10,30	-6,31	-4,66	-5,42	-6,30	
177	Howard Creek	Canada	Çimena et al., 2019	8	0,268	-7,50	0,220	8,94	10,54	9,46	-5,37	-4,52	-4,96	-5,10	0,7026
191	Eden Lake	Canada	Chakhmouradian et al., 2008	9	0,246	-9,95	0,010	7,91	8,34	8,08	-8,42	-7,20	-7,96	-8,00	
230	Oka	Canada	Dennis and Schrag, 2010; Chen and Simonetti, 2015; Haynes et al., 2003	26	0,359	-7,94	0,068	6,44	7,70	6,96	-6,14	-4,50	-5,43	-5,63	0,7032



Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
243	Aillik Bay	Canada	Tappe et al., 2006	14	0,004	-3,67	0,000	9,60	13,20	10,83	-4,80	-2,70	-3,63	-3,63	0,7039
249	Gardiner	Greenland	Nielsen and Buchardt, 1985	3	0,587	-9,97	0,935	10,30	12,00	10,97	-3,90	-2,90	-3,53	-3,93	
257	Grcnnedal-Ika	Greenland	Pearc, 1997; Coulsonetal, 2003; Halama et al., 2005	18	0,011	-4,48	0,000	6,65	8,61	7,70	-5,03	-3,90	-4,40	-4,41	0,7029
258	Qaqarssuk	Greenland	Knudsen and Buchardt, 1991	16	0,249	-5,35	0,219	6,90	10,39	7,71	-4,68	-2,74	-3,43	-3,64	
260	Igaliko	Greenland	Coulsonetal, 2003	9	0,142	-5,66	0,276	8,60	19,10	13,02	-5,50	-2,30	-3,81	-4,44	0,7027
263	Bearpaw Mountains (Rocky Boy)	USA	Dennis and Schrag, 2010	8	1,125	-17,53	0,807	8,30	9,00	8,70	-8,30	-7,40	-7,74	-8,19	
265	Bear Lodge (Bull Hill)	USA	Moore, 2014	15	0,385	-13,07	0,313	8,70	13,60	10,62	-10,20	-6,90	-8,98	-9,72	0,7046
272	Wet Mountains	USA	Armbrustmacher, 1979	4	0,015	-4,53	0,001	7,10	10,00	8,88	-4,90	-3,20	-4,40	-4,43	
275	Iron Hill	USA	Jones et al., 2013; Bezertschi, 1957; Hugh et al., 1966; Ackerman et al., 2021	4	0,561	-9,98	0,960	7,30	11,20	9,05	-5,90	-3,40	-4,70	-5,88	0,7035
282	Magnet Cove	USA	Haynes et al., 2003; Nelson, 1987; Dennis, 2010	4	0,278	-7,60	0,886	7,03	8,70	7,61	-5,66	-5,20	-5,48	-5,64	0,7035
285	Cerro Sapo	Bolivia	Schultz, 2004	4	-0,256	-5,88	0,496	7,16	11,00	9,84	-9,18	-7,67	-8,39	-7,71	0,7034
286	Chiaracke	Bolivia	Schultz, 2004	3	-1,900	17,39	0,380	11,90	12,30	12,10	-6,16	-4,94	-5,60	-5,22	0,7035
289	Angico dos Dias	Brazil	Antonini et al., 2003	16	0,071	-7,52	0,032	11,92	15,82	14,78	-7,09	-5,70	-6,48	-6,68	0,7033
293	Catalao II	Brazil	Guarino et al., 2016	10	-0,105	-5,08	0,047	8,45	9,48	8,79	-6,35	-5,68	-6,00	-5,96	0,7050
294	Catalao I	Brazil	Cordeiro et al., 2010	5	-0,282	-2,67	0,864	9,20	13,23	10,86	-6,60	-5,37	-5,74	-5,27	0,7051
295	Serra Negra	Brazil	Speziale et al., 2020	4	0,744	-12,32	0,529	7,23	8,23	7,50	-7,35	-6,18	-6,75	-6,94	
296	Salitre	Brazil	Brod and Affonso, 1999	14	0,306	-9,22	0,491	6,90	9,30	7,76	-7,20	-6,20	-6,85	-7,11	

Продолжение таблицы

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
298	Araxa	Brazil	Santos and Clayton, 1995; Speziale et al., 2020	8	0,377	-10,71	0,640	8,70	13,80	10,83	-7,20	-4,80	-6,63	-7,43	0,7050
299	Tapira	Brazil	Brod and Affonso, 1999	45	0,332	-9,64	0,414	5,40	14,70	9,32	-8,30	-3,50	-6,54	-7,84	0,7052
302	Juquia	Brazil	Speziale et al., 2020	8	-0,720	3,94	0,778	13,79	16,58	15,12	-8,02	-5,82	-6,94	-5,98	
303	Jacupiranga	Brazil	Gomide et al., 2016; Comin-Chiaromonti et al., 2007; Haynes et al., 2003; Nelson, 1987	25	0,448	-9,63	0,630	5,40	8,70	7,28	-7,40	-5,40	-6,34	-7,21	0,7050
305	Barra do Itapirapua	Brazil	Andrade et al., 1999	9	0,332	-8,68	0,785	6,70	9,40	8,34	-6,40	-5,40	-5,91	-6,46	0,7045
306	Mato Preto	Brazil	Santos and Clayton, 1995; Andrade et al., 1999; Comin-Chiaromonti et al., 2001; Speziale et al., 2020	24	1,302	-17,59	0,912	8,00	14,61	12,06	-7,90	0,80	-1,89	-7,18	0,7047
310	Morro Preto	Brazil	Nascimento et al., 2023	6	0,168	-6,65	0,833	9,49	11,88	10,71	-5,10	-4,66	-4,85	-5,05	
318	Chiriguelo	Paraguay	Censi et al., 1989; Castorina et al., 1997	20	0,281	-10,57	0,546	9,90	19,44	14,97	-8,08	-3,97	-6,36	-7,78	0,7072
323	Wajilitage	China	Song et al., 2017	9	-0,580	-0,20	0,674	6,40	9,50	7,62	-5,80	-3,90	-4,62	-3,91	0,7037
332	Bayan Obo (dike)	China	Yang X et al., 2000; Le Bas, 2000	12	0,308	-10,41	0,386	11,90	17,70	14,24	-7,30	-4,60	-6,03	-6,75	
337	Qieganbulake	China	Ye et al., 2013; Y. Jia and Y. Liu, 2023	13	0,022	-4,04	0,015	8,24	12,00	9,71	-4,11	-3,30	-3,82	-3,85	0,7056
338	Dashigou	China	Xu et al., 2010	6	-0,162	-5,43	0,212	7,22	8,78	7,87	-6,90	-6,36	-6,71	-6,60	
340	Miaoya	China	Gimen et al., 2018	10	0,481	-10,58	0,263	9,41	12,51	11,14	-6,60	-3,32	-5,23	-6,06	0,7036
340	Shaxiongdong	China	Cheng Xu et al., 2008	5	0,167	-7,21	0,343	6,92	8,09	7,58	-6,08	-5,71	-5,94	-6,05	
340	Maoniuping	China	Zengqian Hou et al., 2009	7	0,953	-13,62	0,798	7,00	9,70	8,03	-6,90	-3,90	-5,97	-6,95	0,7061



Продолжение таблицы

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
340	Muluozhai	China	Zengqian Hou et al., 2009	5	-0,067	-6,14	0,048	8,40	9,10	8,75	-6,80	-6,60	-6,72	-6,70	
	South Qinling	China	Cheng Xu et al., 2014	17	0,487	-10,35	0,385	8,62	14,36	11,45	-6,96	-3,54	-4,78	-6,16	
	Caotan (calcite)	China-Qinling	Chun-Wan Wei et al., 2020	8	0,299	-9,41	0,657	7,49	9,96	8,50	-7,19	-6,11	-6,88	-7,17	0,7037
	Caotan (dolomite)	China-Qinling	Chun-Wan Wei et al., 2020	10	-0,108	-2,47	0,080	6,98	8,44	7,96	-3,58	-3,09	-3,33	-3,23	0,7057
346	Sarnu-Dandali	India-west	Ray and Rames, 1999; Ray et al., 2000	7	0,585	-10,31	0,913	8,20	10,50	8,91	-5,70	-4,20	-5,10	-5,52	
349	Mundwara	India-west	Ray and Rames, 1999; Ray et al., 2000	8	0,723	-10,89	0,948	6,00	10,10	7,54	-6,50	-3,70	-5,44	-6,55	
350	Newania	India-west	Viladkar and Ramesh, 2014	9	0,293	-7,58	0,441	7,60	14,50	11,67	-5,70	-2,50	-4,31	-5,35	0,7021
355	Siriwasan	India-west	Viladkar and Gittins, 2016	11	-0,074	-4,81	0,044	8,50	17,80	11,60	-7,40	-3,50	-5,67	-5,44	0,7054
356	Amba Dongar	India-west	Gwalani et al., 2010; Viladkar and Ramesh, 2014; Simonetti et al., 1995; Ray and Rames, 2000; Amit Tiwari, 2016	50	0,029	-4,51	0,004	7,20	16,80	10,79	-7,50	-2,10	-4,20	-4,31	0,7055
356	Amba Dongar - dike	India-west	Viladkar and Ramesh, 2014; Gwalani et al., 2010	21	0,144	-5,81	0,340	7,60	16,90	11,75	-5,20	-2,40	-4,11	-4,71	
357	Swangkre	India-east	Ray et al., 1999	7	-0,164	-2,00	0,107	9,30	9,70	9,51	-3,70	-3,50	-3,60	-3,52	
358	Sung Valley	India-east	Ray et al., 1999; Srivastava et al., 2005; Viladkar and Ramesh, 2014; Amit Tiwari, 2016	40	-0,209	-1,46	0,145	6,60	11,50	7,67	-4,50	-2,20	-3,07	-2,84	0,7047
360	Samchampi	India-east	Ray et al., 1999	11	0,068	-4,07	0,004	7,00	7,60	7,25	-3,80	-3,00	-3,60	-3,60	0,7047
365	Hogenakkal	India-south	Pandit, 2002	4	-0,368	-3,09	0,234	8,10	8,40	8,23	-6,20	-6,00	-6,13	-6,08	0,7016

Продолжение таблицы

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
366	Samalpatti	India-south	Ackerman et al., 2017	6	-0,182	-1,54	0,251	10,10	12,40	10,78	-3,99	-3,14	-3,50	-3,38	0,7058
367	Sevattur	India-south	Pandit, 2002; Kumar et al., 1998; Ackerman et al., 2017	12	-0,126	-4,12	0,149	7,51	13,20	8,93	-6,40	-4,76	-5,25	-5,07	0,7052
369	Mulakkadu	India-south	Pandit, 2002	5	0,211	-5,35	0,256	7,30	7,78	7,44	-3,90	-3,70	-3,78	-3,81	0,7066
369	Pakkanadu	India-south	Privastava et al., 2022	28	0,131	-6,90	0,046	7,50	9,10	8,25	-4,90	-6,30	-5,82	-5,92	
369	Pakkanadu	India-south	Privastava et al., 2022	10	0,395	-8,49	0,389	6,60	7,50	7,01	-6,00	-5,50	-5,72	-5,88	
378	Matcha	Kirgystan	Vrublevskii, 2017	9	0,700	-18,09	0,707	18,00	23,00	20,73	-6,50	-1,90	-3,58	-5,49	0,7070
379	Hongcheon	South Korea	Kim et al., 2005; Kwon and Yeang, 2003	7	0,857	-14,53	0,594	7,96	12,81	9,53	-9,31	-3,89	-6,36	-7,71	
	Yonghwa	South Korea	Seo et al., 2016	7	0,053	-7,49	0,003	7,70	10,40	9,23	-8,20	-5,80	-7,00	-7,08	
380	Mushugai Khuduk	Mongolia	Владыкин и др., 2004	5	0,574	-10,72	0,324	14,60	16,90	15,50	-3,00	-0,70	-1,82	-2,34	0,7054
383	Ulgei	Mongolia	Кулешов, 1986	15	0,095	-10,66	0,025	8,10	12,80	9,76	-11,00	-7,30	-9,78	-9,89	0,7041
393	Seblyavr	Russia-Cola	Кухаренко и др., 1962	3	0,342	-10,66	0,200	10,10	13,90	12,63	-7,40	-4,40	-6,33	-7,20	
398	Khibiny	Russia-Cola	Zaitzev, 1996; Покровский, 2000	29	0,359	-8,36	0,399	5,90	14,30	8,20	-7,80	-2,30	-5,07	-6,25	0,7036
399	Ozernaya Varaka	Russia-Cola	Козлов, 2016	12	-0,748	1,99	0,566	7,40	9,70	8,37	-6,30	-3,70	-4,27	-3,54	0,7032
405	Telyachi Island	Russia-Cola	Beard et al., 1996	4	1,500	-17,44	0,844	8,80	9,40	9,12	-4,14	-3,36	-3,76	-4,24	
406	Turiy Mys	Russia-Cola	Dunworth and Bell, 2001; Demeny et al., 2004; Владыкин и др., 2004	17	-0,073	-2,12	0,022	7,40	8,96	7,94	-3,07	-2,20	-2,70	-2,66	0,7033
407	Kovdor	Russia-Cola	Плюснин и др., 1980; Владыкин и др., 2004	7	-0,051	-1,68	0,031	9,40	15,80	12,10	-3,40	-1,20	-2,30	-2,16	0,7032
408	Sallanlatvi	Russia-Cola	Demeny et al., 2004	4	0,330	-6,75	0,962	10,00	16,60	14,63	-3,50	-1,30	-1,93	-3,45	
409	Vuorjarvi	Russia-Cola	Demeny et al., 2004; Владыкин и др., 2004; Fomina and Kozlov, 2021	18	0,117	-5,02	0,101	6,80	11,80	8,05	-4,80	-3,40	-4,08	-4,22	0,7056



Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
410	Tikshezero	Russia-Cola	Tichomirovd et al., 1992	8	-0,851	1,54	0,073	7,40	7,70	7,56	-5,30	-4,50	-4,90	-4,76	0,7023
413	Chetlassky	Russia-Europe	Удлагатина и др., 2014; Шумилова и др., 2012	54	0,128	-5,34	0,297	8,30	15,20	11,01	-4,90	-3,00	-3,93	-4,27	0,7034
	Dubravinsky	Russia-Europe	Луговая и др., 2012; Savko et al., 2023	18	-0,140	-4,25	0,144	8,00	15,60	10,31	-8,60	-4,70	-5,70	-5,38	0,7020
414	Vishnevogorsky	Russia-Ural	Недосекова и др., 2012; Nedosekova et al., 2013	7	1,044	-14,98	0,499	7,00	8,00	7,53	-7,90	-6,30	-7,10	-7,67	0,7036
	Potanino	Russia-Ural	Недосекова и др., 2012; Nedosekova et al., 2013	8	-0,538	-1,83	0,068	7,70	8,80	8,16	-7,70	-5,30	-6,20	-5,98	
	Buldym	Russia-Ural	Недосекова и др., 2012; Nedosekova et al., 2013	5	-0,044	-7,41	0,011	8,00	10,40	8,96	-8,20	-7,40	-7,80	-7,76	0,7044
417	Guli	Russia-Taimyr	Владыкин и др., 2004	8	0,295	-6,33	0,519	6,30	11,60	8,26	-5,30	-2,90	-3,89	-4,47	0,7031
428	Essei	Russia-Taimyr	Кравченко, Багдасаров, 1987; Владыкин и др., 2004	9	0,279	-6,58	0,724	8,00	18,71	11,88	-4,47	-1,15	-3,27	-4,35	0,7033
430	Tomtor	Russia-Taimyr	Пономарчук и др., 2020; Покровский, 2000	20	0,040	-4,00	0,020	7,10	17,00	11,90	-4,80	-2,10	-3,48	-3,71	0,7034
	East Taimyr	Russia-Taimyr	Проскурнин и др., 2010	5	0,245	-7,11	0,172	6,20	14,70	11,96	-6,20	-1,00	-4,18	-5,59	0,7072
436	Upper Petropavlovka	Russia-Asia	Vrublevskii, 2015	10	0,307	-6,89	0,799	11,80	15,50	13,84	-3,50	-2,00	-2,64	-3,27	0,7057
437	Edelveis	Russia-Asia	Врублевский и др., 2012	9	1,506	-26,38	0,460	12,30	14,90	13,81	-8,40	-2,70	-5,59	-7,86	0,7033
438	Tagna	Russia-Asia	Владыкин и др., 2004	3	-0,786	6,80	0,682	12,00	12,50	12,30	-3,10	-2,60	-2,87	-2,63	0,7031
439	Nizhnesayansky (Belaya Zima)	Russia-Asia	Doroshkevich et al., 2016; Владыкин и др., 2004	32	0,336	-7,94	0,512	6,10	11,35	7,68	-6,10	-4,00	-5,35	-5,89	0,7029

Продолжение таблицы

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
440	Verkhnesayansky (Sredniya Zima)	Russia-Asia	Владыкин и др., 2004	3	-0,263	-3,70	0,987	6,80	7,60	7,10	-5,70	-5,50	-5,57	-5,49	0,7029
	Karasug-calcite	Russia-Tuva	Болонин, 1983; Никифоров и др., 2006	8	0,188	-6,51	0,587	8,80	14,70	11,76	-4,90	-3,60	-4,30	-4,86	0,7042
	Karasug-siderite	Russia-Tuva	Болонин, 1983; Никифоров и др., 2006	11	-0,174	-3,46	0,047	9,20	13,50	11,44	-6,50	-3,90	-5,45	-5,06	0,7042
	Karasug-Chahol	Russia-Tuva	Никифоров и др., 2006	3	1,296	-10,33	1,000	5,50	6,80	6,30	-3,20	-1,50	-2,17	-3,20	0,7060
	Karasug-Ulatay	Russia-Tuva	Никифоров и др., 2006	7	-0,178	-2,19	0,301	9,80	13,40	11,14	-4,50	-3,70	-4,17	-3,93	0,7043
441	Kharly	Russia-Tuva	Врублевский, 2003	12	-0,072	-2,12	0,024	14,00	18,60	16,62	-4,00	-2,30	-3,32	-3,13	
443	Zhidoy	Russia-Asia	Morigiyo et al., 2005	4	0,569	-9,69	0,220	7,10	7,50	7,33	-5,80	-5,20	-5,53	-5,65	0,7030
445	Yuzhnoe	Russia-Asia	Никифоров и др., 2000; Рипп и др., 2000	3	-0,024	-5,71	0,001	6,20	7,10	6,60	-6,10	-5,50	-5,90	-5,86	0,7063
446	Khaluta	Russia-Asia	Никифоров и др., 2000; Рипп и др., 2000; Дорошкевич, 2013	9	-0,122	-4,81	0,278	5,40	9,10	8,04	-6,20	-5,20	-5,80	-5,47	0,7057
448	Oshurkovo	Russia-Asia	Никифоров и др., 2000; Рипп и др., 2000, 2014	18	0,013	-6,10	0,002	5,00	14,90	8,75	-7,90	-5,00	-6,20	-6,03	0,7053
	Western Baikal	Russia-Asia	Savelyeva et al., 2015	6	0,422	-8,51	0,447	11,90	13,10	12,37	-3,70	-2,90	-3,28	-3,48	0,7048
450	Veseloje	Russia-Asia	Doroshkevich et al., 2007; Ласточкин, 2009	10	-0,261	1,06	0,102	9,10	11,20	10,16	-2,50	-0,80	-1,59	-1,31	
451	Pogranichnoe	Russia-Asia	Doroshkevich et al., 2006	5	0,228	-2,05	0,567	8,41	10,18	9,12	-0,20	0,30	-0,02	-0,14	0,7038
	Ulan-Ude	Russia-Asia	Ripp et al., 2019	4	-0,425	-2,92	0,300	4,60	8,30	6,55	-6,60	-3,60	-5,70	-4,87	0,7056



Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
452	Murun	Russia-Asia	Vladikin et al., 2004; Покровский, 2000	20	0,236	-9,34	0,111	6,00	10,40	8,42	-9,20	-5,20	-7,36	-7,93	0,7062
453	Seligdar	Russia-Asia	Doroshkevich et al., 2018	5	0,914	-20,42	0,149	15,90	17,00	16,48	-6,10	-4,10	-5,36	-5,89	0,7042
459	Ingili	Russia-Asia	Владыкин и др., 2004	4	0,172	-7,95	0,928	8,00	13,90	10,75	-6,60	-5,40	-6,10	-6,57	0,7024
460	Arbarastakh	Russia-Asia	Владыкин и др., 2004	3	-0,156	-3,78	0,123	7,60	9,30	8,27	-5,30	-4,60	-5,07	-4,96	0,7025
462	Koksharovsky	Russia-Asia	Октябрьский и др., 2010	9	-0,117	-3,88	0,136	9,00	13,30	11,00	-5,70	-4,20	-5,17	-4,93	0,7036
464	Eppawala	Sri Lanka	Manthilake et al., 2008; Pitawala et al., 2003	27	0,160	-4,96	0,522	7,70	16,40	14,27	-3,55	-1,99	-2,69	-3,73	0,7049
471	Chagatai	Uzbekistan	Шумилова и др., 2012; Лохов и др., 2007	11	0,249	-4,21	0,375	6,50	13,20	10,05	-3,50	-0,40	-1,71	-2,59	
472	South Nam Xe	Vietnam	Thuy et al., 2014	17	0,279	-6,04	0,232	9,10	11,00	9,80	-3,90	-2,70	-3,30	-3,51	0,7082
475	Gifford Creek	Australia	Slezak, Paul, 2019	14	-0,356	-1,87	0,073	9,20	11,10	10,43	-7,10	-5,00	-5,58	-5,14	0,7057
476	Wallaby	Australia	Salier et al., 2004	5	-0,131	-4,06	0,099	9,24	12,08	10,51	-6,13	-5,03	-5,44	-5,28	0,7033
479	Yungul	Australia	Gwalani et al., 2010	36	0,137	-7,60	0,512	10,40	15,60	13,75	-6,30	-5,10	-5,71	-6,17	
481	Cummins Range	Australia	Downes et al., 2014	7	0,334	-6,72	0,126	7,50	8,80	8,33	-4,20	-3,00	-3,94	-4,22	
484	Haast River	New Zealand	Cooper and Paterson, 2008	10	0,237	-8,35	0,932	6,70	16,20	10,77	-6,70	-4,40	-5,80	-6,76	
488	Sokli	Finland	Demeny et al., 2004	7	0,498	-7,67	0,876	7,10	10,00	7,86	-4,10	-2,60	-3,76	-4,13	
489	Laivajoki	Finland	Nykanen et al., 1997	7	-0,559	-0,63	0,677	5,91	7,44	6,81	-4,92	-3,60	-4,44	-3,93	
490	Kortejärvi	Finland	Nykanen et al., 1997	7	-0,180	-2,69	0,553	6,58	9,30	7,49	-4,33	-3,67	-4,03	-3,87	

Продолжение таблицы

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
492	Siilinjärvi	Finland	Demeny et al., 2004	5	-0,287	-1,72	0,192	7,40	9,10	8,36	-4,60	-3,60	-4,12	-3,84	0,7014
497	Laacher See	Germany	Hugh et al., 1966; Jones et al., 2013	13	-0,148	-5,51	0,006	6,30	8,30	7,39	-7,70	-3,10	-6,60	-6,44	
498	Rockeskyll (Auf Dickel)	Germany	Riley et al., 1999	3	-0,099	-3,84	0,475	11,10	14,40	12,40	-5,30	-4,80	-5,07	-4,94	0,7041
499	Kaiserstuhl	Germany	Hubberten, 1988; Dolenek, 2015; Dennis and Schrag, 2010	54	-0,030	-5,66	0,013	5,70	16,20	9,69	-7,20	-3,80	-5,95	-5,83	0,7036
	Mt. Vulture	Italy	Stoppa et al., 2016; Rosatelli et al., 2010	4	0,253	-7,53	0,340	10,30	12,00	10,90	-5,20	-4,40	-4,78	-4,93	0,7065
510	Fen	Norway	Broom-Fendley et al., 2016; Andersen, 1987	10	-0,088	-4,14	0,099	5,70	9,28	7,34	-5,10	-3,80	-4,79	-4,65	0,7021
515	Alnö	Sweden	Roopnarain, 2013; Hugh et al., 1966; Jones, Genge, Carmody, 2013	29	0,030	-5,76	0,000	6,40	8,67	7,71	-7,30	-3,09	-5,53	-5,57	0,7029
	Zhlobin	Belarusia	Веретенников и др., 2007	4	-0,197	-2,65	0,012	22,10	23,20	22,73	-8,30	-6,40	-7,13	-7,00	
518	Chernigovskiy	Ukraine	Луговая и др., 1978	15	-0,039	-5,38	0,013	5,30	11,70	8,81	-6,50	-4,50	-5,73	-5,59	0,7013
520	Fuerteventura	Spain Canaries	Hoernle et al., 2002; Шумилова и др., 2012	12	-0,271	-3,73	0,223	6,60	8,20	7,32	-6,30	-5,20	-5,72	-5,52	0,7032
524	Fogo	Cape Verdes	Hoernle et al., 2002	4	0,308	-8,73	0,330	5,30	7,90	6,58	-7,50	-5,90	-6,70	-7,09	0,7031
525	Sao Tiago	Cape Verdes	Hoernle et al., 2002	9	0,674	-12,01	0,942	6,90	16,30	12,99	-7,20	-1,00	-3,26	-7,36	
526	Maio	Cape Verdes	Hoernle et al., 2002	3	-0,026	-0,98	0,287	12,30	14,40	13,66	-1,40	-1,30	-1,35	-1,30	



Список литературы

1. Кулешов В. Н. Изотопный состав и происхождение глубинных карбонатов // Труды ГИН АН СССР. Вып. 405. – М. : Наука, 1986. – 128 с.
2. Покровский Б. Г. Коровая контаминация мантийных магм по данным изотопной геохимии // Труды ГИН РАН. Вып. 535. – М. : Наука, 2000. – 222 с.
3. Bolonin A. V. Oxygen and Carbon Isotope Composition in Primary Carbonatites of the World: Data Summary and Linear Trends // *Open Journal of Geology*. – 2019. – V. 9, № 8. – P. 424–439. DOI: 10.4236/ojg.2019.98028.
4. Deines P. Stable isotope variations in carbonatites / Carbonatites: Genesis and Evolution. – London : Unwin Hyman, 1989. – P. 301–359.
5. Jones A. P., Genge M., Carmody L. Carbonate Melts and Carbonatites // *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. – 2013. – V. 75. – P. 289–322.
6. Ray I. S., Ramesh R. Rayleigh fractionation of stable isotopes from a multicomponent source // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2000. – № 64. – P. 299–306.
7. Salomons W. Chemical and isotopic composition of carbonatites in recent sediments and soils from Western Europe // *Journal of Sedimentary Petrology*. – 1975. – V. 45, № 2. – P. 440–449.
8. Woolley A. R. and Kjarsgaard B. A. Carbonatite occurrences of the world: Map and database. – Ottawa : Geological Survey of Canada, 2008.

References

1. Kuleshov V. N. Izotopnyi sostav i proiskhozhdenie glubinnykh karbonatov [Isotopic composition and origin of deep carbonates], *Trudy GIN AN SSSR [Proceedings of the GIN AS USSR]*, Moscow, Nauka Publ., 1986, Iss. 405, 128 p. (In Russ.).
2. Pokrovskii B. G. Korovaya kontaminatsiya mantiinykh magm po dannym izotopnoi geokhimii [Crustal contamination of mantle magmas according to isotope geochemistry data], *Trudy GIN RAN [Proceedings of the GIN RAS]*, Moscow, Nauka Publ., 2000, 222 p. (In Russ.).
3. Bolonin A. V. Oxygen and Carbon Isotope Composition in Primary Carbonatites of the World: Data Summary and Linear Trends, *Open Journal of Geology*, 2019, V. 9, No 8, pp. 424–439. DOI: 10.4236/ojg.2019.98028.
4. Deines P. Stable isotope variations in carbonatites, In *Carbonatites: Genesis and Evolution*, London, Unwin Hyman Publ, 1989, pp. 301–359.
5. Jones A. P., Genge M., Carmody L. Carbonate Melts and Carbonatites, *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2013, V. 75, pp. 289–322.
6. Ray I. S., Ramesh R. Rayleigh fractionation of stable isotopes from a multicomponent source, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, No 64, pp. 299–306.
7. Salomons W. Chemical and isotopic composition of carbonatites in recent sediments and soils from Western Europe, *Journal of Sedimentary Petrology*, 1975, V. 45, No 2, pp. 440–449.
8. Woolley A. R. and Kjarsgaard B. A. Carbonatite occurrences of the world: Map and database, Ottawa, Geological Survey of Canada, 2008.

Болонин Александр Васильевич (bolonin.a@inbox.ru)

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва, Россия

СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.43 : 551.26

**Палеотектоническая позиция базальтоидных
вулcano-плутонических поясов
с меднопорфировыми месторождениями****Мигачёв И. Ф., Звездов В. С., Конкин В. Д.**

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены геотектоническая позиция и строение базальтоидных вулcano-плутонических поясов (ВПП) с медно- и золото-меднопорфировыми месторождениями. Среди них выделены океанические и периокеанические пояса, входящие в состав энсиматических островных дуг и образовавшиеся на поздней стадии развития последних после инверсии базальтоидных прогибов, и рифтогенные, возникшие в островодужных океанических обстановках на поздней стадии заполнения спрединговых зон. ВПП первых двух типов с золото-меднопорфировыми месторождениями располагаются над конвергентными границами тектонических плит в надсубдукционной позиции, пояса третьего – образуют протяжённые линейные зоны в пределах отдельных рифтовых структур и содержат небольшие по масштабам меднопорфировые объекты с убогими содержаниями золота и молибдена. В качестве примеров описаны ВПП энсиматических островных дуг: Санда, Филиппинского архипелага, Новобританской, Соломоновой, Аляски, Антильской и пояса рифтогенных зон Южного Урала – Ирендыкский и Новоалексеевский. Охарактеризованы вулcano-плутонические ассоциации, участвующие в строении этих ВПП, включая продуктивные на меднопорфировое оруденение, а также структурно-вещественные комплексы их фундамента. Отмечено, что неоднократные проявления магматизма при длительном развитии энсиматических островных дуг приводят к возникновению в их пределах нескольких базальтоидных ВПП с золото-меднопорфировыми месторождениями, в то время как в рифтогенной обстановке базальтоидные пояса с меднопорфировыми объектами формируются однократно.

Ключевые слова: меднопорфировые месторождения, вулcano-плутонические пояса, энсиматические островные дуги, рифтогенные структуры, магматические серии, ассоциации, формации.

Для цитирования: Мигачёв И. Ф., Звездов В. С., Конкин В. Д. Палеотектоническая позиция базальтоидных вулcano-плутонических поясов с меднопорфировыми месторождениями. Руды и металлы. 2024. № 3. С. 28–46. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10012.

**Paleotectonic setting of basaltoid volcano-plutonic belts
with porphyry copper deposits****Migachev I. F., Zvezdov V. S., Konkin V. D.**

FSBI “Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals”, Moscow, Russia

Annotation. The article considers geotectonic position and geological features of basaltoid volcano-plutonic belts (VPBs) associated with porphyry copper and gold-copper deposits. Three types of the belts, the oceanic, peri-oceanic, and riftogenic ones, are distinguished among these VPBs. The oceanic and peri-oceanic belts were incorporated into the composition of ensimatic island arcs and formed at a late stage of their development, after inversion of the basaltoid troughs. The riftogenic belts appeared in island-arc oceanic settings at a late stage of filling the spreading zones. VPBs of the first two types with porphyry gold-copper deposits are located over the convergent boundaries of tectonic plates in an above-subduction position, while belts of the third type form extended linear zones within individual rift structures and contain small-scale porphyry copper objects with poor gold and molybdenum contents. As examples of the structures, the Sunda, Philippine archipelago, New British, Solomon, Alaska, and Antilles ensimatic island arcs and the Irendyk and Novoalekseevsky belts of rift zones of the Southern Urals are described. Volcanic-plutonic associations participating in the structure of these VPBs (including those productive for porphyry copper mineralization), as well as structural-lithological complexes of their basement, are characterized. It is noted that repeated magmatism manifestations during the long-term development of the ensimatic island arcs lead to appearance of several basaltoid VPBs with porphyry gold-copper deposits, while basaltoid belts with porphyry copper objects in the rift settings are formed only once.

Keywords: porphyry copper deposits, volcano-plutonic belts, ensimatic island arcs, riftogenic structures, magmatic series, associations, formations.

For citation: Migachev I. F., Zvezdov V. S., Konkin V. D. Paleotectonic setting of basaltoid volcano-plutonic belts with porphyry copper deposits. Ores and metals, 2024, № 3, pp. 28–46. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10012.



Месторождения меднопорфиrowого типа располагаются в специфических геоструктурах – вулканоплутонических поясах (ВПП) двух типов: базальтоидных и андезитоидных [3–5].

Базальтоидные ВПП представляют собой элементы энсиматических островных дуг (ОД), которые развиваются на океанической коре, представленной недифференцированными основными лавами толеитовой серии с базит-гипербазитовыми образованиями. Первая стадия формирования этих дуг заключается в возникновении базальтоидных прогибов с дифференцированными формациями внутренних островодужных зон, нередко содержащих месторождения колчеданных руд. Завершение данной стадии характеризуется инверсией прогибов, иногда складчатостью и возникновением архипелагов островов, часть из которых и представляют собой базальтоидные ВПП. Эти пояса сложены вулканоплутоническими ассоциациями (ВПА), образованными базальт-андезит-базальтовыми и габбро-диорит-кварц-диорит-тоналит-плаггиогранитными формациями. Такие ассоциации, по существу, завершают натровые серии базальтоидного магматизма и закономерно сменяют во времени и по латерали однородные базальтовые и колчеданосные контрастные и непрерывные формации.

В базальтоидных ВПП в тесной пространственно-временной связи с слагающими их ВПА находятся месторождения золото-меднопорфиrowого рудно-формационного типа, которые характеризуются рядом принципиальных особенностей: существенно натровым составом рудоносных интрузивных массивов, отсутствием или весьма незначительными содержаниями молибдена в рудах при их повышенной золотоносности, рисунком метасоматической и рудной зональности, соответствующим «диоритовой» модели В. Холлистера, а также определённым набором сопряжённых рудных формаций в структуре меднопорфиrowых рудно-магматических систем с комплексной металлогенией [2, 8]. В то же время, несмотря на сходные черты происхождения и строения базальтоидных ВПП и состава сла-

гающих их магматических комплексов, формирование таких поясов происходило в нескольких различных тектонических обстановках – океанической, периокеанической и рифтогенной.

К *первым* отнесены ВПП островных дуг, находящихся непосредственно над зоной субдукции. Они сложены породами толеитовой и известково-щелочной серий, имеют океанический базитовый субстрат и натровый профиль магматизма. Продуктивные ВПА составляют базальт-андезит-дацитовая и габбро-диорит-тоналит-плаггиогранитная формации с порфиrowыми диоритами либо кварцевыми диоритами рудоносной фазы. Меднопорфиrowые месторождения (МПМ) обладают повышенными содержаниями и запасами золота при практически полном отсутствии молибдена.

Ярким примером таких поясов с золото-меднопорфиrowыми месторождениями (Бату Хайджау, Тумпангпиту, Эланг, Хью'ю) и проявлениями является островная дуга Санда (Восточная Зондская дуга, Индонезия) на границе Евразийской и Индо-Австралийской плит. Она протягивается на 1800 км в широтном направлении от о. Ява на западе до островов Сумбава, Флорес и Банда на востоке (рис. 1). Подробная характеристика геологического строения, тектоники, магматизма и металлогении этой дуги проведена в обобщающей работе Э. Марионо с соавторами [13].

Названные крупные золото-меднопорфиrowые месторождения находятся в восточном сегменте ОД, которая развивалась на тонкой океанической коре в отличие от западного её сегмента (о. Ява), сформировавшегося на коре континентального типа, где в основании дуги залегают породы мелового и палеоценового возраста, которые также установлены в районе месторождения Тумпангпиту (зёрна циркона с изотопным возрастом $98,5 \pm 1$ и $98,5 \pm 0,8$ млн лет) [14].

В восточной части ОД установлено пять магматических поясов (ВПП): дотретичный, палеоцен-эоценовый, олигоцен-раннемиоценовый, позднемиоцен-плиоценовый и базальтовый четвертичный. На западе дуги образова-

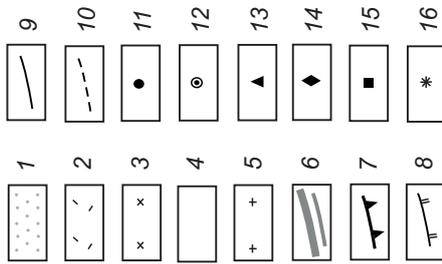


Рис. 1. Островная дуга Санда с золото-меднопорфировыми и сопряжёнными эпитермальными, скарновыми и стратойдными месторождениями золота, серебра и цветных металлов, а также предшествующим медно-цинково-колчеданным месторождением [13]:

тип фундамента: 1 – океанический островодужный, 2 – блок Лукония, 3 – континентальный Австралийской плиты, 4 – океанический Индийской плиты, 5 – раннемеловой дуги Санда; 6 – оси островных дуг; 7 – зона субдукции; 8 – поднятие Ру (океаническое плато); 9 – зоны разломов; 10 – границы центров океанического спрединга; *типы месторождений:* 11 – золото-меднопорфировые, 12 – эпитермальные золото-серебряные LS-типа, 13 – эпитермальные золото-медные и золото-серебряные HS-типа, 14 – стратойдные в осадочных толщах, 15 – золото-медные скарновые, 16 – медно-цинковые колчеданные (VMS)

Fig. 1. The Sunda island arc with porphyry gold-copper deposits and related epithermal, skarn, and stratoid deposits of gold, silver, and base metals, as well as with their preceding copper-zinc VMS deposit [13]:

basement type: 1 – oceanic island arc, 2 – Luconia block, 3 – continental, of the Australian plate, 4 – oceanic, of the Indian plate, 5 – of the Early Cretaceous Sunda arc; 6 – island arc axes; 7 – subduction zone; 8 – Roo Rise (oceanic plateau); 9 – fault zones; 10 – boundaries of oceanic spreading centers; *mineral deposit types:* 11 – porphyry gold-copper, 12 – epithermal gold-silver of LS-type, 13 – epithermal gold-copper and gold-silver of HS-type, 14 – stratoid in sedimentary strata, 15 – skarn gold-copper, 16 – copper-zinc volcanogenic massive sulfide (VMS)



ния поясов наложены друг на друга, а на востоке отделены друг от друга. Ранний магматизм ограничен Западной Явой. Палеоцен-эоценовые и эоцен-миоценовые магматиты в основном расположены на о. Ява, миоцен-плиоценовые – в восточном сегменте ОД. В районе месторождения Тумпангпиту на участках коренных обнажений площадью от 0,3 до 10 км² последовательность их формирования следующая: дорудные диориты с равнотекстурированной структурой (основная фаза рудоносного комплекса?) и комплекс порфировых тоналитовых интрузий – 4,83±0,4 (четвёртая фаза) до 4,03±0,65 млн лет (шестая фаза).

В западном сегменте дуги сосредоточены эпитеpmальные золото-серебряные месторождения типа «высокой сульфидизации» (HS-тип) [11]. Крупные золото-меднопорфировые объекты расположены вдоль её восточного сегмента. К их особенностям относятся низкие содержания калия в рудоносных интрузивах, преобладание биотита над калишпатом в метасоматических зонах, замещение актинолита хлоритом, появление олигоклаза (вместо калишпата) в центральных биотит-магнетитовых зонах, угнетённое развитие узких зон более поздних кварц-серицит-пиритовых метасоматитов [18].

В целом выделяется три этапа образования меднопорфировых месторождений дуги Санда: олигоцен-миоценовый (> 15 млн лет), средне-позднемиоценовый (15–5 млн лет) и плиоцен-плейстоценовый (5–1,5 млн лет). Рудопроявления первого этапа известны лишь на о. Ява. Низкосортные рудные проявления второго этапа известны на островах Ява, Ломбок и Сумбаву. И лишь в течении третьего этапа образовались крупные (до гигантских) золото-меднопорфировые объекты восточной части ОД. В это же время происходило формирование крупных эпитеpmальных серебряных объектов Западной Явы.

В строении рудных районов (Бату-Хайджау, Эланг и др.) принимают участие вулканогенно-осадочные породы (вулканиты представлены преимущественно андезитами). В основании сложенных ими толщ залегают вулканомиктовые песчаники и аргиллиты, а верхние

горизонты представлены вулканическими брекчиями, песчаниками и конгломератами. Присутствуют прослои мелководных известняков и известковистых алевролитов. Возраст этих толщ от 21 до 15 млн лет. В районе Тумпангпиту закартированы турбидиты и мелководные морские осадки с возрастом от 20,67±0,47 до 16,68±0,35 млн лет.

В строении ВПП описываемой ОД выделены многочисленные вулканоплутонические центры, в срединной части которых расположены интрузивы рудоносных комплексов с золото-меднопорфировыми месторождениями, а в периферийной – вулканогенные образования преимущественно андезитового состава. Плиоцен-плейстоценовые центры располагаются примерно в 80 км друг от друга по оси ВПП в широтном направлении (рис. 2).

Рудоносные порфировые интрузивы на месторождениях обычно состоят из 2–5 фаз. Как правило, по составу это кварцевые диориты и тоналиты. Они имеют «карандашную» форму, диаметр от 200 до 1200 м, протяжённость по вертикали более 2 км. Временные диапазоны их формирования: от 3,55±0,13 до 3,52±0,14 млн лет в районе Бату-Хайджау; от 2,51±0,13 до 2,38±0,18 млн лет в Эланге. В то же время в западной части дуги (Брамбанг, Селедон) подобные интрузивные комплексы имеют возраст от 6,15 до 7,28 и 7,22 млн лет. Возраст пострудных дацитов Эланга – 2,1±0,11 млн лет.

Э. Мариано и др. [16] полагают, что возраст в 5 млн лет представляет собой границу между крупными золото-меднопорфировыми и эпитеpmальными золото-серебряными месторождениями и мелкими непромышленными объектами тех же типов. Действительно, все крупные и гигантские объекты моложе 5 млн лет: Тумпангпиту от 4,83±0,40 до 4,03±0,65 млн лет; Бату-Хайджау от 3,76±0,10 до 3,67±0,12 млн лет; Эланг от 2,51±0,13 до 2,38±0,18 млн лет.

Вышеизложенное позволяет отметить следующее:

- в истории формирования островной дуги Санда ВПП с меднопорфировым и золото-меднопорфировым оруденением образовывались

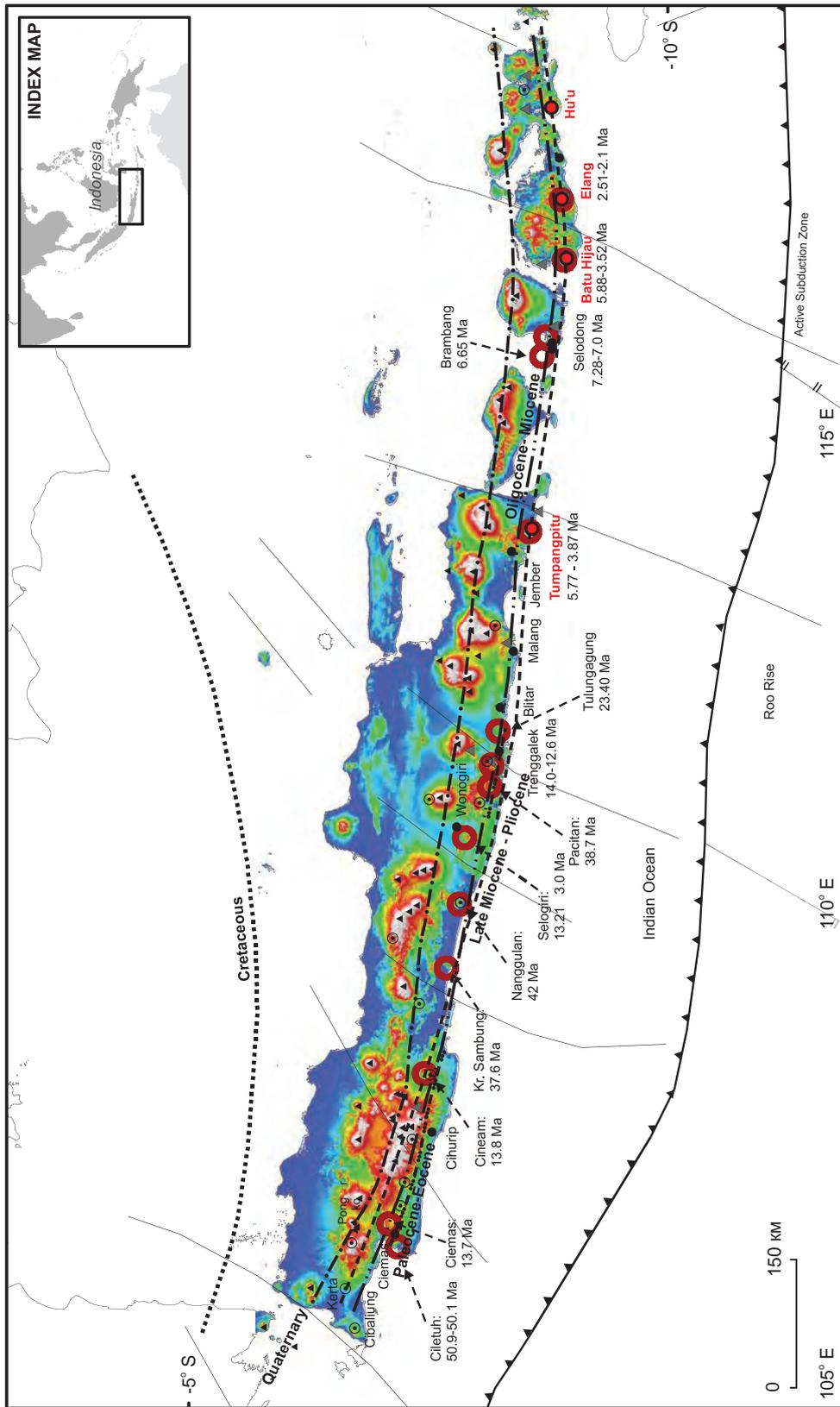


Рис. 2. Вулкано-плутонические центры с рудными месторождениями островной дуги Санда [16]:

1 – активные вулканы; 2 – линейменты; осевые линии ВПП разных возрастов: 3 – K_1 , 4 – P_1-P_2 , 5 – P_3-N_1 , 6 – N_1-N_2 , 7 – Q; 8 – интрузивные комплексы; 9 – золото-меднопорфировые гигантские и крупные месторождения (a), рудопроявления (b); остальные усл. обозн. см. рис. 1

Fig. 2. Volcano-plutonic centers with ore deposits of the Sunda island arc [16]:

1 – active volcanoes; 2 – lineaments; axial lines of VPPs of different ages: 3 – K_1 , 4 – P_1-P_2 , 5 – P_3-N_1 , 6 – N_1-N_2 , 7 – Q; 8 – intrusive complexes; 9 – porphyry gold-copper objects: (a) giant and large ore deposits, (b) ore occurrences, for other symbols see Fig. 1



не менее трёх раз: в палеоцен-эоцене, олигоцен-раннем миоцене и позднем миоцене-плиоцене. Для самого молодого пояса характерно омоложение плутоногенных рудогенных процессов с запада на восток. Все крупные и гигантские золото-меднопорфировые месторождения восточного сегмента дуги имеют возраст моложе 5 млн лет и сформированы на коре океанического типа;

- особенностью строения ВПП являются редуцированное развитие вулканогенных образований (андезиты) и концентрация натровых диорит-тоналитовых рудоносных интрузивов, в том числе диоритовых и тоналитовых порфиров, с которыми ассоциируют золото-меднопорфировые месторождения в так называемых «магматических центрах». Центры отстоят друг от друга по оси поясов с шагом примерно в 80 км;

- ВПП с крупными и гигантскими золото-меднопорфировыми месторождениями, а также с мелкими непромышленными объектами того же геолого-промышленного типа могут в первом приближении рассматриваться в качестве базальтоидных;

- большинство исследователей [13, 16, 18] связывают возникновение и развитие дуги Санда с существованием Зондской субдукционной зоны, что не вызывает сомнений и определяет положение этой ОД и входящих в её структуры базальтоидных ВПП как надсубдукционное. В то же время дуга, предположительно, представляет собой проекцию на поверхность границы Евразийской и Индо-Австралийской литосферных плит.

К *периокеаническим* относится большинство базальтоидных ВПП с месторождениями золото-меднопорфирового типа. Такие пояса расположены в периокеанических островодужных структурах, где они нередко представляют собой внешние барьерные зоны. Одним из примеров являются базальтоидные ВПП Филиппинского архипелага на границе Евразийской и Филиппинской плит. Здесь выделен так называемый Филиппинский мобильный пояс (МП), протягивающийся в меридиональном направлении от о. Лусон на севере до о. Минданао на юге, а в его преде-

лах – рудные районы Манканьян, Багио, Маридукью, Атлас, Суригао и др. более чем с 50 золото-меднопорфировыми и сопряжёнными с ними эпитермальными золото-медными (HS-типа) и золото-серебряными (IS- и LS-типов) месторождениями и проявлениями (рис. 3).

К западу от МП располагается Поливанский микроконтинет, включающий о. Миндоро, море Сулу с о. Палаван и северо-восток о. Калимантан. С востока к МП примыкает менее мобильная зона, ограниченная Филиппинским жёлобом. В основании микроконтинентального блока и фрагментарно на флангах МП развиты доюрские метаморфические толщи – гнейсы, кристаллические сланцы, песчаники, филлиты, что подтверждает его континентальную природу [10]. В то же время в фундаменте МП залегают метавулканы зеленосланцевой фации метаморфизма и ультрамафические основные породы, включая серпентиниты, габбро и амфиболиты. Эти образования рассматриваются в качестве океанической коры.

Детальное геологическое изучение выше-названных рудных районов последних десятилетий с изотопным определением возраста рудовмещающих пород и руд [10, 11, 14, 19] позволило более обоснованно установить геологическую позицию и время формирования золото-меднопорфировых месторождений Филиппин.

В центральной части Филиппин в рудном районе Атлас (острова Себу и Бохол) с месторождениями Атлас, Бига, Кармен, Лутопан и Балак-5 [19] меднопорфировое оруденение обнаруживает пространственно-временные связи с кварц-диоритовыми порфиритами. Возраст интрузивов $108,5 \pm 1,6$ млн лет (U-Pb метод), а оруденения – $110,2 \pm 5,6$ млн лет (Re-Os по пириту), что соответствует верхней границе раннего мела. Здесь же на доюрском основании ВПП несогласно залегает нижнемеловая толща формации Конси, состоящая из базальтов, андезитов, вулканокластических песчаников с прослоями известняков. Эти породы перекрыты отложениями формации Пандан – конгломератами, песчаниками, глинистыми

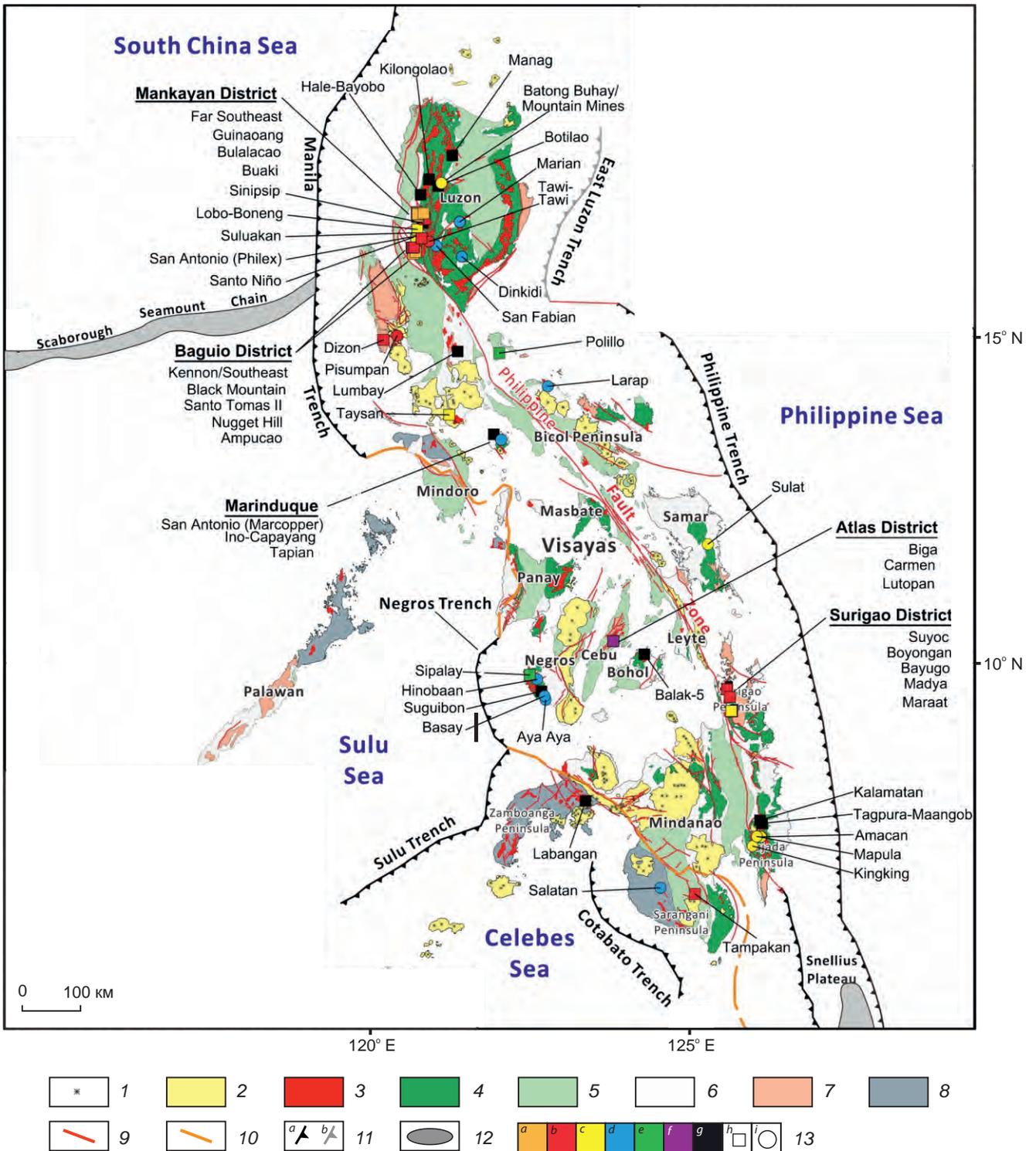




Рис. 3. Региональная геология и распределение разновозрастных золото-меднопорфировых месторождений Филиппинского архипелага [10]:

1 – современные вулканы; 2 – вулканиды, N_3 – Q ; 3 – третичные интрузивы; 4 – островные вулканиды, P_1 – N_1 ; 5 – осадочные бассейны, P_3 – Q_{IV} ; 6 – нерасчленённые геологические единицы; породы фундамента: 7 – офиолитовые комплексы, K_1 – P , 8 – домеловые континентальные метаморфические породы; 9 – главные разломы; 10 – коллизионные зоны (сутуры); 11 – зоны субдукции (*a* – активной, *b* – неактивной); 12 – подводные плато и хребты; 13 – возраст порфировых месторождений, млн лет: *a* – 0,1–1,6 (Q), *b* – 1,6–5,3 (N_2), *c* – 5,3–11,2 (N_3^2), *d* – 11,2–23,7 (N_1^1 – N_1^2), *e* – 23,7–36,6 (P_3), *f* – 97,5–113 (K_1al), *g* – нет данных, *h* – точное радиоизотопное определение возраста, *i* – оценка возраста по геологической обстановке и/или косвенным данным

Fig. 3 Regional geology and distribution of porphyry gold-copper deposits of different ages in the Philippine Archipelago [10]:

1 – recent volcanoes; 2 – volcanics, N_3 – Q ; 3 – Tertiary intrusions; 4 – island-arc volcanics, P_1 – N_1 ; 5 – sedimentary basins, P_3 – Q_{IV} ; 6 – undivided geological units; basement rocks: 7 – ophiolite complexes, K_1 – P , 8 – pre-Cretaceous continental metamorphic rock; 9 – major faults; 10 – collision zones (sutures); 11 – subduction zones (*a* – active, *b* – inactive); 12 – submarine plateaus and ridge; 13 – age of porphyry deposits, million years: *a* – 0,1–1,6 (Q), *b* – 1,6–5,3 (N_2), *c* – 5,3–11,2 (N_3^2), *d* – 11,2–23,7 (N_1^1 – N_1^2), *e* – 23,7–36,6 (P_3), *f* – 97,5–113 (K_1al), *g* – no data, *h* – precise radioisotope age determination, *i* – age estimate based on geological setting and/or indirect data

сланцами с прослоями углей. И те, и другие прорваны рудоносными штоками кварцевых диоритов и их порфировых разностей.

Правомерно предположить, что осадочно-вулканогенные толщи формации Конси и кварц-диоритовые плутониты образуют единую, продуктивную на золото-меднопорфировые руды, ВПА раннемелового базальтоидного ВПП, сформированного на океанической коре. Молассы формации Пандан «фиксируют» временной интервал между образованием вулканогенной и плутоногенной составляющих этой ВПА. Примечательно, что базальт-андезитовые породы мелового возраста были обнаружены также на севере Филиппин (о. Катандуанес) и на юго-востоке островов Лусон и Рапу-Рапу, что позволяет предположить более широкое площадное развитие базальтоидного ВПП мелового возраста.

Большая часть золото-меднопорфировых месторождений Филиппин, в т. ч. крупных, сосредоточена в восточной части архипелага – на севере Восточно-Филиппинского ВПП (запад о. Лусон) в рудных районах Манканьян и Багио (см. рис. 3). Они описаны в серии публикаций [10–12, 15].

К наиболее ранним образованиям этих районов относятся позднеэоценовые базаль-

тоиды и их пирокласты серии Лепанто ($35,3 \pm 1,0$ млн лет и $33,7 \pm 0,7$ млн лет). Они прорваны крупным батолитообразным телом (центральный Кордильерский батолит) габбро-диорит-тоналитового комплекса Багон позднего эоцена ($34,05 \pm 0,5$ млн лет, $34,8 \pm 0,7$ млн лет). Олигоцен-раннемиоценовые породы формации Балили – вулканокласты, брекчии, конгломераты (возможно молассовые образования) несогласно перекрывают вулканиды Лепанто и нередко содержат обломки диоритов и тоналитов Баган. Разрез завершают плиоцен-плейстоценовые андезит-дацитовые толщи (в основном пирокласты) формаций Имбангуида ($2,19 \pm 0,12$ млн лет, $1,82 \pm 0,36$ млн лет) и Бало ($1,43 \pm 0,21$ млн лет). В последних фиксируются обломки кварцевых диоритов с меднопорфировой минерализацией. Породы толщи Имбангуида прорваны многочисленными телами кварцевых диоритовых порфиров-дацит-порфиров, с которыми ассоциирует меднопорфировое оруденение [15].

С определённой долей условности можно предположить, что в северной части Восточно-Филиппинского пояса проявлены две ВПА, продуктивные на золото-меднопорфировые руды. В первую (позднеэоценовую) входят вулканиды серии Лепанто и плутоногенные породы

комплекса Багон, с поздними порфировыми фазами которого, по-видимому, связано формирование меднопорфировых проявлений среднего миоцена Мариан, Динкиди, Сан-Фабиан (23–12 млн лет). Вторая (плиоцен-плейстоценовая) включает вулканогенно-пирокластические толщи Имбангуида и Бало и малые интрузивные тела кварцевых диорит-порфиров и дацит-порфиров. С этой ВПА связывается образование большинства месторождений вышеназванных рудных районов.

По существу, выделенные ВПА в структурно-металлогеническом понимании отвечают самостоятельным базальтоидным ВПП.

В южной части Восточно-Филиппинского пояса расположен рудный район Суригао с месторождениями Суеок, Бойонган, Байуго, Мадья, Марсаг [11]. Здесь к образованиям фундамента ВПП отнесены толща конгломератов, песчаников, мраморов и сланцев («Консепьонский сланец») предположительно мелового возраста, а также мел-палеоценовый офиолитовый комплекс Суригао (см. рис. 3). Позднеэоценовая Маданлогская формация состоит из конгломератов, сланцев и известняков, несогласно залегающих на комплексах основания пояса. Широко распространены образования формации Бакуаг, среди которых преобладают базальты и их брекчии, в верхних частях разреза переслаивающиеся с известняками и углеродистыми сланцами. Возраст пород формации определён как поздний олигоцен–ранний миоцен. Более поздняя турбидитовая формация (Мазелоуд), представленная переслаивающимися алевритовыми аргиллитами, граувакками, мергелями с горизонтами базальтов, скорее всего имеет среднемиоценовый возраст. Среди пород миоценовой формации Мабухай преобладают андезиты – вулканокласты и брекчии; фиксируются горизонты дацитов, известняков и алевролитов. В основании разреза формации закартирована толща базальных конгломератов, несогласно залегающих на породах турбидитовой формации. Позднемиоценовые-плиоценовые известняки формации Тимамана несогласно залегают на образованиях формации Бакуаг. Предполагается, что их отложение происхо-

дило непосредственно перед внедрением плейстоценовых диоритов и диоритовых порфиров комплекса Боюонган, с которым связывается рудообразование.

На месторождениях Боюонган-Байуго магматиты этого комплекса представлены диоритовыми порфирами: предрудными ($2,31 \pm 0,1 \div 2,23 \pm 0,1$ млн лет) и пострудными ($2,19 \pm 0,16$ и $2,09 \pm 0,20$ млн лет), возраст которых определён U-Pb методом по циркону. Возраст штока диоритов (возможно, основная фаза комплекса), прорывающего породы формации Мабухай, составляет $3,23 \pm 0,2$ млн лет, а молибдена из кварцевых жил – $2,120 \pm 0,007$ и $2,115 \pm 0,008$ млн лет (по Ar-Ar методу).

Д. Брэкстон с соавторами [12] рассматривает образование вулканитов формации Мабухай и диоритов комплекса Боюонган как проявление единого магматического процесса, что позволяет объединить их в единую рудоносную ВПА, отвечающую базальтоидному ВПП, с которой связано формирование плиоценовых золото-меднопорфировых объектов Восточно-Филиппинского пояса.

Не преследуя цель детального рассмотрения структуры и истории развития заложенной на океанической коре Филиппинской ОД, определяемой рядом исследователей [10, 11, 17] как коллаж разнородных тектонических блоков, отметим на основе проанализированных нами публикаций следующее:

- продуктивные на золото-меднопорфировые руды магматические формации базальтоидных ВПП возникали несколько раз: на границе раннего и позднего мела в западной части архипелага; в позднем эоцене на севере о. Лусон; в миоцен-плиоцене (плейстоцене) на востоке архипелага в пределах Восточно-Филиппинского пояса;
- рудоносные плутоногенные комплексы во всех случаях представлены породами известково-щелочной серии натрового профиля – диоритами–кварцевыми диоритами с порфировыми фазами того же состава. Для Лутопанского кварц-диоритового штока месторождения Атлас, по $\Sigma \text{Hf}(t)$ циркона, Sr-Nd изотопным данным и La/Yb отношению Ю. Зангом и др. [19] сделано предположение о том, что рудо-

носный магматический очаг располагался или в нижней части континентальной коры или на её границе с астеносферой. При этом магма существовала в условиях высокой летучести кислорода, высокой концентрации H_2O и низких температур;

- представляется, что определяющими факторами геологической позиции Филиппинской ОД является её надсубдукционное положение непосредственно над конвергентной границей океанической (Филиппинской) и континентальной (Евразийской) литосферных плит. Неоднократное проявление рудоносного магматизма, по-видимому, обусловлено взбросо-сдвиговыми деформациями по этой геотектонической зоне при субдукционных, коллизионных и орогенных процессах, приводящих в конечном итоге к возникновению и протекнованию магмавыводящих разломов.

Филиппинская островная дуга с золото-меднопорфировыми месторождениями может рассматриваться в качестве эталонной структуры для определения палеотектонической позиции периокеанических базальтоидных ВПП. Установленные для неё особенности геологического строения и металлогении характерны также для Новобританской и Соломоновой базальтоидных ОД на границе Австралийской и Тихоокеанской плит (рис. 4).

Наиболее древние образования Новобританской дуги – вулканы основного состава (базальты и андезитобазальты), датированные эоценом. Перекрывающие их вулканогенные породы олигоцена принадлежат к известково-щелочной серии. Золото-меднопорфировые месторождения Плесиуми, Эсис и Кулу расположены в трёх разобщённых узлах, отвечающих позднеолигоценным–среднемиоценовым интрузивным массивам [3, 5].

Интрузивные образования, завершавшие островодужный этап развития о. Новая Британия, имеют отчётливо выраженный натровый профиль. Во всех массивах устанавливается эволюция составов от габбро к кварцевым диоритам и более редким тоналитам. Обстоятельный анализ петрохимических особенностей интрузивов Новобританской ОД, проведённый Р. Хайном и Д. Мэсоном [3], показал

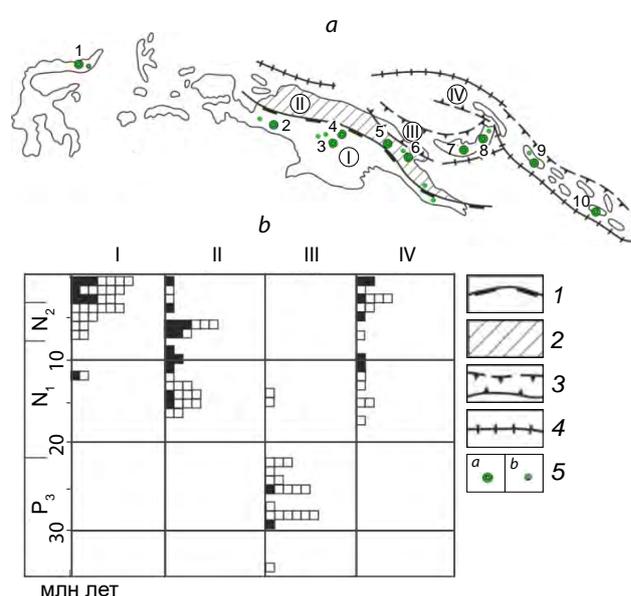


Рис. 4. Схема размещения золото-меднопорфировых месторождений юго-восточной части Филиппино-Новогвинейской провинции (а) и эволюция возраста вулcano-плутонических поясов (б), по Д. Мэсону, Дж. Макдональду, С. Титли и Т. Хайдрику [2] с дополнениями:

1 – граница Австралийского континентального блока (I); 2 – мобильный пояс севера Папуа-Новой Гвинеи (II); 3 – границы островных дуг: III – Новобританской, IV – Соломоновой; 4 – оси глубоководных желобов; 5 – меднопорфировые месторождения (а), значительные рудопроявления (б). Цифрами обозначены месторождения: 1 – Кабанг Кири (Томбуилилато), 2 – Грасберг, 3 – Ок Теди, 4 – Фрида Ривер, 5 – Яндера, 6 – Голпу, 7 – Плесиуми, 8 – Эсис, 9 – Пангуна, 10 – Колоула

Fig. 4. Schematic map showing the distribution of porphyry gold-copper deposits in the southeastern Philippines-New Guinea province (a) and evolution of the age of volcano-plutonic belts (b); modified after D. Mason, J. MacDonald, S. Tittle and T. Heidrick [2]:

1 – boundary of the Australian continental block (I); 2 – mobile belt of northern Papua New Guinea (II); 3 – boundaries of the island arcs: III – New British, IV – Solomon; 4 – axes of deep-sea trenches; 5 – porphyry copper objects: (a) ore deposits, (b) significant ore occurrences. The deposits are indicated by numbers: 1 – Kabang Kiri (Tombuililato), 2 – Grasberg, 3 – Ok Tedi, 4 – Frida River, 5 – Yandera, 6 – Golpu, 7 – Plesiumi, 8 – Esis, 9 – Panguna, 10 – Koloula

принципиальное отличие принадлежащих ей плутонитов от интрузивных и вулканогенных пород окраинно-континентальных (аккреционных) андезитовидных ВПП. Резкое преобладание натрия над калием, низкие значения отношения рубидия к стронцию и невысокие концентрации никеля, хрома и кобальта в интрузивах района привели к выводу о связи магматизма с частичным плавлением комплексов базитового слоя земной коры на глубинах 20–40 км, сопровождавшимся фракционированием образующегося расплава.

Островная дуга Соломоновых островов сложена несколькими ВПА, сформировавшимися во временном интервале от начала миоцена до плейстоцена включительно. Наиболее древние образования представлены мезозойскими базальтоидами. На о. Гуадалканал широко развиты вулканиты базальтового и андезибазальтового состава мощностью более 2,5 км, датируемые поздним олигоценом–ранним миоценом. Плиоцен-голоценовые лавы базальтов и дацитов слагают узкий пояс на западной окраине острова. На о. Бугенвиль значительную часть пояса образуют андезиты группы Киета с изотопным возрастом 4–5 млн лет. Интрузивные породы этого региона имеют натровую специализацию, проявленную во всех разностях – от габбро до диоритов, кварцевых диоритов и более поздних гранодиоритов.

Плутонический комплекс Колоула имеет весьма сложное строение. С ним связано одноименное месторождение. А. Чивас и И. Макдоугал [3] выделили 26 фаз интрузивного магматизма, которые отнесены к двум циклам с временем проявления 4,5 и 2,4 млн лет. Породы раннего цикла составляли ряд габбро-диориты – кварцевые диориты – гранодиориты. Во втором цикле происходила эволюция состава фаз от кварцевых диоритов к тоналитам при ярко выраженном натровом профиле. Гидротермальные изменения датируются периодом от 2 до 1,5 млн лет.

Месторождение Пангуна на о. Бугенвиль локализовано в экзоконтактовой зоне массива роговообманковых диоритов–кварцевых диоритов. Их возраст 4–5 млн лет, а прорываю-

щих их гранодиорит-порфиров, с которыми сопряжено золото-меднопорфировое оруденение, – 3,4±0,3 млн лет.

Все названные островные дуги и слагающие их базальтоидные ВПП приурочены к конвергентным границам литосферных плит, занимают надсубдукционную позицию и являются производными базитовых магматических очагов, что объясняет определённое сходство их геологического строения и характеристик расположенных в их пределах МПМ.

На Аляске островные дуги с базальтоидными ВПП находятся вблизи границы Северо-Американской и Тихоокеанской плит над зонами субдукции. Расположенные в их пределах меднопорфировые месторождения, по данным В. Холлистера, С. Анцалоне, Д. Рихтера [3, 4], сопряжены с массивами диоритов, роговообманковых диоритов, реже гранатсодержащих диоритов, которые входят в состав раннеюрских, позднеюрско-раннемеловых и третичных островодужных ВПА, вулканогенная часть которых представлена базальтами, андезибазальтами и андезитами. Месторождения и рудопроявления (Костелло Крик, Грабстейк, Индиан Пасс Лейк, Баумтофф и др.) этой минерагенической провинции по петрологии и рудно-метасоматической зональности соответствуют «диоритовой» модели В. Холлистера.

Периокеанический Прибрежный ВПП Аляски сформирован вулканогенными толщами пенсильванско-пермского возраста, которые В. Холлистер и др. [3, 5] относят к островодужным комплексам, образованным на океанической коре. Эти комплексы перекрыты терригенными и карбонатными морскими отложениями и базальтоидными вулканитами триаса. Более молодые вулканогенные образования рассматриваются как продукты раннеюрской, позднеюрско-раннемеловой и третичной островодужных систем, последовательно наращивавших окраину континента начиная с триаса.

Для интрузивных пород пояса установлено пять отрезков формирования: 285–282, 179–154, 117–105, 83–85 и 41–25 млн лет. Четыре первых отрезка совпадают со временем су-



ществования островных дуг, а соответствующие интрузивы входят в базальтоидные ВПА.

Месторождения приурочены к штокам диоритов и диоритовых порфиров раннетриасового (Грабстейк), раннеюрского (Индиан Пасс Лейк), мелового (Баумтофф, Птармиган Крик – 114 млн лет) и третичного возраста (Костелло Крик). Все они рассматриваются как часть островодужных ВПА, продуцирующих месторождения, которые отвечают «диоритовой» модели.

К этому же типу принадлежат наиболее молодые месторождения (Пирамид, Драй Крик) провинции, находящиеся в структурах Алеутской островной дуги (Островного ВПП) и описанные Р. Армстронгом и др. [3, 5].

Месторождение Пирамид приурочено к штоку кварцевых диоритовых порфиров (абсолютный возраст 6,2 млн лет), прорывающему олигоценые островодужные вулканы андезитового и андезит-базальтового состава и испытавшему биотитизацию и серицитизацию. На месторождении Драй Крик минерализация ассоциирует со штоком кварцевых диоритов (возраст 3,3 млн лет), внедрившимся в юрские толщи. Минерализация представлена халькопиритом, пиритом и магнетитом; отмечаются следы молибденита и золота. От внутренних частей штока к периферии месторождения происходит смена зоны биотитизации зоной серицитизации, за которой располагается обширный ореол пропицитизации и пиритизации.

В Панамской части Центрально-Американской провинции С. Кезлером и другими исследователями [3] выделены две существенно различные группы медно-порфировых месторождений. К первой отнесены объекты, сопряжённые с интрузивами, завершающими островодужный вулканизм и формирующиеся в интервале 70–50 млн лет. Такие месторождения известны на северо-востоке страны (Рио Пинто, Патикан, Наваганди), где они находятся в рудных районах островодужных базальтоидных ВПП. Второй группе принадлежат месторождения более молодого андезитовидного ВПП, наложенного на островодужные комплексы. Известные в его пределах ме-

сторождения (Серро Колорадо, Чорча) связаны с интрузивами преимущественно гранодиоритового состава. Что же касается месторождения Петакилья, то позиция его остаётся недостаточно ясной из доступных публикаций.

В северной части Карибского региона, на границе Южно- и Северо-Американской литосферных плит, С. Кезлером, Л. Джонсом и Р. Валкером [3, 5] выделен меловой–раннекайнозойский базальтоидный пояс, сформированный на мезозойском океаническом субстрате. Ему соответствует Антильская металлогеническая провинция (Пуэрто-Рико, Ямайка), в пределах которой известна серия небольших медно-порфировых месторождений – Рио Виви, Танама, Ла Муда, Коппер Майн Пойнт и др.

Участвующие в геологическом строении региона раннемеловые образования представлены продуктами инициального островодужного магматизма – спилитами и кварцевыми кератофирами, ассоциирующими с кремнистыми отложениями. Более поздние вулканы андезит-базальтового и дацитового состава в ассоциации с терригенными и карбонатными отложениями отвечают завершению собственно базальтоидного этапа развития в конце мела–раннем кайнозое при миграции этого режима в пространстве с омоложением к востоку.

Все известные в провинции месторождения сопряжены с интрузивами кварцевых диоритов, принадлежащих островодужной андезит-базальт-диоритовой ВПА.

Месторождения Рио Виви, Танама и Кайон ассоциируют со штоками кварц-роговообманковых диоритов, прорывающими поздне-меловые и позднеэоценовые вулканогенные толщи и относимыми к эоцену. На других островах архипелага известны более древние рудоносные интрузивы кварцевых диоритов. Так, для штока Терре Неуве, к которому приурочено месторождение Мене на Гаити, изотопный возраст – 66 млн лет, для штока Гиппер Ридж с месторождением Кочкора на Ямайке – 85 млн лет.

В целом, возраст интрузивов кварцевых диоритов, несущих меднопорфировую минерализацию, «укладывается» в диапазон 90–

40 млн лет. С. Кезлер с соавторами относит месторождения и рудопоявления провинции к островодужному типу, а специфику их петрологических и геохимических характеристик объясняет мантийным происхождением магматических расплавов, ограниченно взаимодействовавших с интрузируемой океанической корой.

Палеотектоническая позиция океанических и периокеанических островных дуг и входящих в их состав базальтоидных ВПП с медно- и золото-меднопорфировыми месторождениями в определённой степени сходна. Вместе с тем, океанические ОД отличаются большей протяжённостью, линейной формой и строением поясов.

В принципиально иной палеотектонической обстановке формируются базальтоидные ВПП с меднопорфировыми объектами Уральской металлогенической провинции. Преследуя определённую цель – установление палеотектонического положения этих поясов в структуре Уральской складчатой системы, авторы не считают необходимым детально рассматривать различные точки зрения на те или иные достаточно спорные вопросы, касающиеся истории развития Урала и геологических аспектов его строения. В этом отношении можно сослаться на подробный критический анализ ключевых моментов развития и геологии Уральского региона, а также представлений различных исследователей по основным дискуссионным проблемам, проведённый А. И. Кривцовым [3]. Следует отметить при этом, что рифтогенная природа возникновения и существования океанических структур Урала не вызывает принципиальных возражений у большинства тектонистов и геологов.

По мнению А. И. Кривцова [3–6], на Урале базальтоидные ВПП (базальт-андезит-базальтовые и диорит-кварц-диорит-плагиогранитные формации) завершают развитие однородной базальтовой (океанической коры?), раннеостроводужных контрастных и непрерывных колчеданосных формаций и надстраивают их разрезы. В отдельных случаях такие пояса располагаются непосредственно

на породах недифференцированной формации. При этом, как было показано М. Б. Бородавской с соавторами [1], базальтоидные ВПП, формируясь в островодужных обстановках, не занимают надсубдукционного положения, а отвечают поздним стадиям заполнения рифтогенных («спрединговых») зон, переживших океанический режим становления.

Наиболее известен Ирландский пояс в Западно-Магнитогорской металлогенической зоне Уральской провинции, протягивающийся в меридиональном направлении более чем на 1000 км при ширине от 15–20 до 50–70 км (рис. 5). В комплексах его основания обнаружен целый ряд месторождений колчеданного семейства, для которых характерна высокая сохранность синвулканических структурных форм при отсутствии складчатых деформаций. Кроме того, в этом районе базальт-андезит-базальтовая и непрерывная колчеданосная формации обладают некоторым общим временным диапазоном становления, а начало накопления пород более поздней из них частично совпадает с завершением ранней при частичном их совмещении в отдельных блоках [1, 3, 5, 6].

Ирландский ВПП ($D_1-D_2e_2$) выражен системой протяжённых гряд вулканических построек, которые на южном фланге распадаются на отдельные вулканические сооружения и ареалы удалённых вулканомиктовых фаций. Пояс сложен вулканитами базальт-андезит-базальтовой формации (D_1-D_2e). Интрузивные комагматы вулканитов слагают штокообразные тела и дайки (D_2e_2) габбро-диорит-плагиогранитовой формации. Базальт-андезит-базальтовая и габбро-диорит-плагиогранитовая формации образуют ВПА, продуктивную на меднопорфировые и золото-сульфидно-кварцевые руды (рис. 6).

На северном и западном флангах описываемого пояса в выступах фундамента развиты многочисленные массивы плутонитов рудоносной формации и сконцентрированы небольшие меднопорфировые месторождения (Поляковское, Дунгурай, Нуралинское, Салаватское, Вознесенское) и проявления (Троицкое, Ново-Берёзовское, Узункулевское и др.),

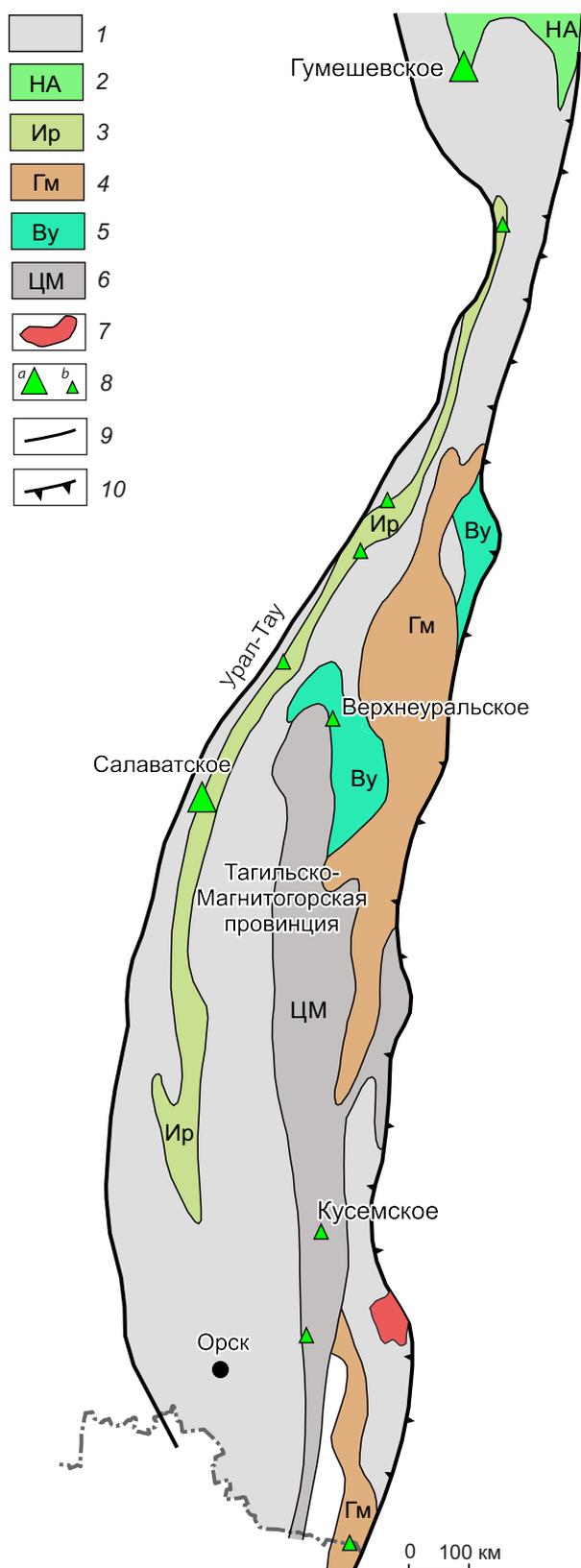


Рис. 5. Тагильско-Магнитогорская металлогеническая провинция Южного Урала с вулcano-плутоническими и плутоническими поясами [9]:

1 – Тагильско-Магнитогорская металлогеническая провинция; базальтоидные ВПП: 2 – Новоалексеевский (НА), D_{1-2} , 3 – Ирендыкский (Ир), D_2 , 4 – Гумбейский (Гм), D_{2-3} , 5 – Верхнеуральский (Ву), D_3-C_1 , 6 – Центрально-Магнитогорский (ЦМ), C_1 ; 7 – гранитоидный массив Восточно-Уральского плутонического пояса, C_1 ; 8 – меднопорфировые объекты (a – месторождения, b – проявления); 9 – глубинные и крупные региональные разломы; 10 – граница меднопорфировых провинций

Fig. 5. Tagil-Magnitogorsk metallogenic province of the Southern Urals with volcano-plutonic and plutonic belts [9]:

1 – Tagil-Magnitogorsk metallogenic province; Basaltoid volcano-plutonic belts: 2 – Novoalekseevsky (NA), D_{1-2} , 3 – Irendyk (Ip), D_2 , 4 – Gumbey (Gm), D_{2-3} , 5 – Verkhneuraly (Vy), D_3-C_1 , 6 – Central Magnitogorsk (Tsm), C_1 ; 7 – granitoid massif of Vostochno-Uraly plutonic belt, C_1 ; 8 – porphyry copper objects (a – ore deposits, b – ore occurrences); 9 – major deep and large regional faults; 10 – boundaries of porphyry copper provinces

локализованные в эндо- и экзоконтактных частях штоков и даек порфировидных диоритов, кварцевых диоритов, диорит-порфиритов. С интрузивами этого комплекса сопряжены также мелкие месторождения золото-сульфидно-кварцевой (Красная жила) и золото-порфировой (Тыелгинское, Наилинское и др.) формаций. Золотоносные стратоидные залежи ряда месторождений (Камышканское, Малый Каран) приурочены к литолого-стратиграфическому уровню нижней части разреза базальт-андезибазальтовой формации.

Показательно, что для меднопорфировых месторождений Ирендыкского пояса характерны сравнительно небольшие ресурсы меди (до 1 млн тонн Cu), весьма убогие содержания золота (сотые доли г/т) и молибдена (сотые доли %).

На рисунках 5 и 7 показан фрагмент Новоалексеевского базальтоидного ВПП, который продолжается в структурах Среднего Урала. Пояс представлен вулканитами базальт-андезит-базальтовой и плутонитами габбро-ди-

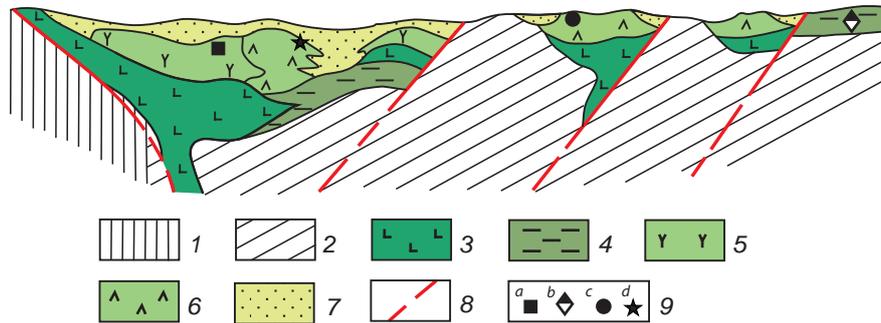


Рис. 6. Принципиальная схема строения Ирландского базальтоидного вулканоплутонического пояса на Южном Урале с установленными в его пределах основными типами месторождений [6]:

1 – докембрийские отложения; 2 – осадочные и вулканогенно-осадочные образования досредне-ордовикского возраста; 3 – базальтоиды недифференцированной формации в ассоциации с углисто-глинистыми и кремнистыми отложениями; 4 – углисто-глинистые и кремнистые отложения; 5 – вулканы контрастной и непрерывной колчеданоносных формаций; 6 – вулканы базальт-андезит-базальтовой формации базальтоидных поясов; 7 – осадочные отложения, включая флишоиды и турбидиты; 8 – глубинные разломы; 9 – месторождения (а – цинково-медноколчеданные, b – железо-марганцевые, c – меднопорфировые, d – жильные полиметаллические)

Fig. 6. Generalized scheme showing the structure of the Irendyk basaltoid volcano-plutonic belt in the Southern Urals with the main types of ore deposits identified within its boundaries [6]:

1 – Precambrian deposits; 2 – sedimentary and volcanosedimentary formations of pre-Middle Ordovician age; 3 – basaltoids of the undifferentiated formation (magmatic association) with related carbonaceous-clayey and cherty deposits; 4 – carbonaceous-clayey and cherty deposits; 5 – volcanics of the contrast and continuous VMS-bearing formations; 6 – volcanics of the basalt-andesite-basaltic formation of basaltoid belts; 7 – sedimentary deposits, including flyschoids and turbidites; 8 – deep faults; 9 – ore deposits (a – zinc-copper VMS, b – iron-manganese, c – porphyry copper, d – vein-type polymetallic)

орит-плагиогранитной формаций нижнедевонского возраста. С массивами плутоидов ассоциируют месторождения скарново-магнетитовой, медно-скарновой, меднопорфировой и золото-сульфидно-скарновой формаций.

К этому же типу геоструктур можно, с достаточной степенью условности, отнести Кони-Тайгоносскую (Удско-Мургалскую) раздвигово-шовную (рифтогенную) зону, отделяющую Охотоморскую литосферную плиту от Азиатского континента [7]. По существу, она представляет собой своеобразную структуру островодужного типа («андезитовая геосинклиналь», по В. Ф. Белому, или Удско-Мургалская островная дуга, по Л. М. Парфёнову) палеозойско-мезозойского возраста. В её пределах с позднего палеозоя по неокончилось формирование островодужных комплексов: вулканогенных и вулканогенно-терригенных базальт-андезитовых ($T-J_2$ и J_3-K_1),

базальтовых и габбро-гранодиорит-тоналит-плагиогранитных (K_1), участвующих в строении одноимённого ВПП, на которые в поздне-меловое время были наложены структурно-вещественные комплексы андезитовидного Охотско-Чукотского ВПП.

В юго-западном сегменте Удско-Мургалского ВПП, входящего в состав описываемой рифтогенной островной дуги (в пределах Кони-Пьягинского полуострова), известны несколько меднопорфировых проявлений – Лора (наиболее крупное), Прямой, Икрумунское, Викинг, Антара, Тальниковое I и II и другие, которые в пространстве и времени ассоциируют с порфировыми фазами диорит-гранодиорит-тоналитовых интрузивов. В Северо-Западном (Чукотском) отрезке этого пояса с интрузивными массивами той же формации сопряжены меднопорфировые проявления Базовое и Моренное. Все названные рудопроявления

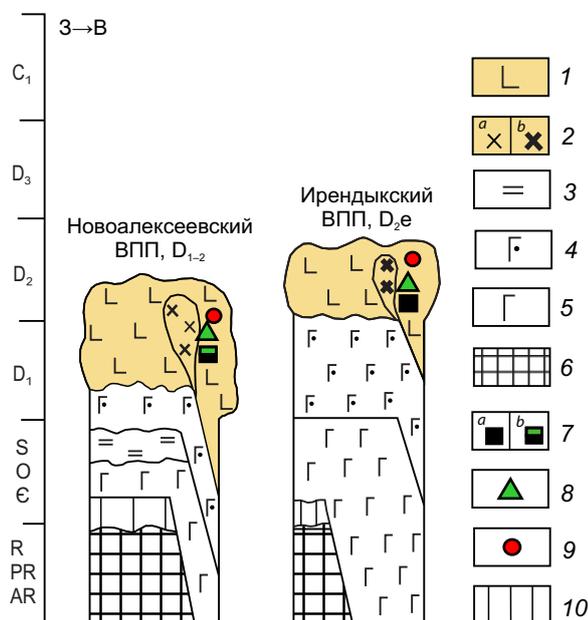


Рис. 7. Формационно-металлогенические ряды Новоалексеевского и Ирендыкского базальтоидных вулканоплутонических поясов [9]:

1 – базальт-андезибазальтовая и базальтовая формации ВПП; 2 – плутоногенные формации ВПП: габбро-диорит-(тоналит)-плагиогранитовая серия (а), в том числе габбро-диоритовая, диоритовая, диорит-плагиогранитовая и габбро-плагиогранодиорит-адамеллитовая формация (b), продуктивные на меднопорфировое и сопряжённое оруденение; 3 – терригенная формация; формационные комплексы фундамента ВПП: 4 – дифференцированные базальт-триолитовые колчеданоносные, 5 – однородные базальтовые и кремнисто-базальтовые (в сочетании с базит-гипербазитовыми и без них), 6 – гнейсовые и кристаллосланцевые (архейские и протерозойские); месторождения ВПП и их фундамента: 7 – скарновые (а – магнетитовые, b – медно-магнетитовые и меднорудные), 8 – меднопорфировые, 9 – золото-сульфидно-кварцевые жильно-штоткверковые и золото-порфировые; 10 – перерывы в осадконакоплении и магматизме

Fig. 7. Formational-metallogenic series of the Novoalekseevsky and Irendyk basaltoid volcano-plutonic belts [9]:

1 – basalt-andesibasalt and basalt volcanic associations of the VPBs; 2 – plutogenic formations (associations) of the VPBs, productive for porphyry copper and related mineralization: (a) gabbro-diorite-(tonalite)-plagiogranite series, including (b) gabbro-diorite, diorite, diorite-plagiogranite, and gabbro-plagiogranodiorite-adamellite formations; 3 – terrigenous formation; formational complexes of the VPB basement: 4 – differentiated basalt-rhyolite VMS-bearing, 5 – homogeneous basaltic and cherty-basalt (in combination with mafic-ultramafic rocks and without them), 6 – gneiss and crystalline schist (Archean and Proterozoic); ore deposits of the VPBs and their basement: 7 – skarn (a – magnetite, b – copper-magnetite and copper), 8 – porphyry copper, 9 – gold-sulfide-quartz vein-stockwork and porphyry gold; 10 – interruptions in sedimentation and magmatism

явления характеризуются низкими содержаниями меди при практически полном отсутствии золота и молибдена.

На основе проанализированных материалов по геотектоническому положению, строению и металлогении базальтоидных ВПП можно сделать следующие выводы.

1. Базальтоидные ВПП с золото-меднопорфировым и меднопорфировым оруденением образуются в позднюю стадию формирования островных дуг, что и определяет их геотектоническое положение.

2. Островные дуги с такими поясами формируются в различных палеотектонических обстановках – периокеанических, океанических и внутриконтинентальных рифтогенных

океанических. В первых двух обстановках базальтоидные ВПП располагаются над конвергентными границами тектонических плит (в надсубдукционной позиции), что, как кажется, имеет решающее значение для их образования. В рифтогенных обстановках возникновения островных дуг и принадлежащих им базальтоидных поясов формируются непрерывные временные серии заполнения рифтогенных («спрединговых») зон, переживших океанический режим развития.

3. В истории развития островных дуг в первых двух обстановках базальтоидные ВПП с золото-меднопорфировыми месторождениями могут возникать несколько раз в течение длительных временных интервалов. В тре-

твей, рифтогенной, базальтоидные пояса с меднопорфировыми объектами формируются однократно.

4. В базальтоидных ВПП периокеанических и океанических островных дуг различного возраста возникают как мелкие, так и крупные золото-меднопорфировые месторождения с незначительными содержаниями молибдена. В поясах рифтогенных структур образуются преимущественно мелкие меднопорфировые месторождения и проявления с убогими содержаниями золота и молибдена.

Последнее обстоятельство, с большей долей условности, может быть связано с существованием единых рудоносных магматических очагов в ранние и поздние этапы развития островных дуг и истощением их потенциала при формировании медноколчеданных месторождений. При этом лишь остаточные порции рудного вещества могли быть реализованы при формировании меднопорфировых объектов.

Авторы благодарны Т. А. Чуриловой за помощь в оформлении иллюстраций статьи.

Список литературы

1. *Бородаевская М. Б., Кривцов А. И.* О структурной и возрастной асимметрии Урала на ранних стадиях герцинского развития // Доклады АН СССР. – 1974. – Т. 217, № 1. – С. 161–164.
2. *Звездов В. С., Мигачёв И. Ф., Минина О. В.* Комплексные медно-порфировые рудно-магматические системы андезитоидных и базальтоидных вулcano-плутонических поясов // Отечественная геология. – 2023. – № 5. – С. 35–71.
3. *Кривцов А. И.* Геологические основы прогнозирования и поисков медно-порфировых месторождений. – М.: Недра, 1983. – 255 с.
4. *Кривцов А. И.* Металлогения андезитоидных вулcano-плутонических поясов. Часть II. – М.: Минприроды РФ, Геокарт, ЦНИГРИ, 1999. – 268 с.
5. *Кривцов А. И., Мигачев И. Ф., Попов В. С.* Медно-порфировые месторождения мира. – М.: Недра, 1986. – 235 с.
6. *Методическое руководство по оценке прогнозных ресурсов алмазов, благородных и цветных металлов.* Вып. «Медь» / А. И. Кривцов, И. Ф. Мигачев, А. Г. Волчков, Р. Н. Володин, В. С. Звездов, О. В. Минина, Ю. В. Никешин. – М.: ЦНИГРИ, 2002. – 212 с.
7. *Мигачев И. Ф.* Палеотектоническая позиция мезозойских вулcano-плутонических поясов востока России // Отечественная геология. – 2009. – № 4. – С. 18–29.
8. *Мигачёв И. Ф., Звездов В. С., Минина О. В.* Формационные типы медно-порфировых месторождений и их рудно-магматические системы // Отечественная геология. – 2022. – № 1. – С. 26–48.
9. *Минина О. В., Мигачёв И. Ф.* Медно-порфировые провинции и зоны Южного Урала (прогнозно-металлогеническое районирование) // Отечественная геология. – 2018. – № 4. – С. 26–41.
10. *Aurelio M. A.* Shear partitioning in the Philippines: Constraints from Philippine Fault and global positioning system data // The Island Arc. – 2000. – № 9. – P. 584–597.
11. *Braxton D. P., Cooke D. R., Dunlap J., Norman M., Reiners P., Stein H., Waters P.* From crucible to graben in 2.3 Ma: A high-resolution geochronological study of porphyry life cycles, Boyongan-Bayugo copper-gold deposits, Philippines // Geology. – 2012. – V. 40, № 5. – P. 471–474.
12. *Braxton D. P., Cooke D. R., Ignacio A. M., Waters P. J.* Geology of the Boyongan and Bayugo porphyry Cu-Au deposits: an emerging porphyry district in Northeast Mindanao, Philippines // Economic Geology. – 2018. – № 113 (1). – P. 83–131.
13. *Carlile J. C., Mitchell A. H. G.* Magmatic arcs and associated gold and copper mineralization in Indonesia // Journal of Geochemical Exploration. – 1994. – V. 50. – P. 91–142.
14. *Harrison R. L., Maryono A., Norris M. S., Rohrlach B. D., Cooke D. R., Thompson J. M., Creaser R. A.* Geochronology of the Tumpangpitu Porphyry Au-Cu-Mo and High-Sulfidation Epithermal Au-Ag-Cu Deposit: Evidence for Pre- and Postmineralization Diatremes in the Tujuh Bukit District, Southeast Java, Indonesia // Economic Geology. – 2018. – V. 113. – P. 163–192.
15. *Hedenquist J. W., Arribas A. J., Aoki M.* Zonation of Sulfate and Sulfide Minerals and Isotopic Composition in the Far Southeast Porphyry and Lepanto Epithermal Cu-Au Deposits, Philippines // Resource Geology. – 2017. – V. 67, № 2. – P. 174–196.



16. Maryono A., Harrison R. L., Cook D. R., Rompo I., Terence G. H. Tectonics and Geology of Porphyry Cu-Au Deposits along the Eastern Sunda Magmatic Arc, Indonesia // *Economic Geology*. – 2018. – V. 113. – P. 7–38.
17. Ozawa A., Tagami T., Listanco E. L., Arpa C. B., Sudod M. Initiation and propagation of subduction along the Philippine Trench: evidence from the temporal and spatial distribution of volcanoes // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2004. – № 23. – P. 105–111.
18. Stijadji L.D., Kajino S., Imai A., Watanabe K. Cenozoic Island arc magmatism in Java Island (Sunda Arc, Indonesia): clues on relationships between geodynamics of volcanic centers and ore mineralization // *Resource Geology*. – 2006. – V. 56, № 3. – P. 267–292.
19. Zhang Y., Tian J., Hollings P., Gong L., Alburo I., Berador A. E., Francisco D. G., Li J., Chen H. Mesozoic porphyry Cu-Au mineralization and associated adakite-like magmatism in the Philippines: insights from the giant Atlas deposit // *Mineralium Deposita*. – 2020. – № 55. – P. 881–900.

References

1. Borodaevskaya M. B., Krivtsov A. I. O strukturnoi i vozrastnoi asimmetrii Urala na rannikh stadiyakh gertsinskogo razvitiya [On the structural and age asymmetry of the Urals at the early stages of the Hercynian development], *Doklady AN SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences]*, 1974, V. 217, No 1, pp. 161–164. (In Russ.).
2. Zvezdov V. S., Migachev I. F., Minina O. V. Kompleksnye medno-porfirovye rudno-magmaticheskie sistemy andezitoidnykh i bazal'toidnykh vulkanoplutonicheskikh pojasov [Complex copper-porphyry ore-magmatic systems of andesitic and basaltoid volcano-plutonic belts], *Otechestvennaya geologiya [National geology]*, 2023, No 5, pp. 35–71. (In Russ.).
3. Krivtsov A. I. Geologicheskie osnovy prognozirovaniya i poiskov medno-porfirovykh mestorozhdenii [Geological foundations for forecasting and prospecting for copper-porphyry deposits], Moscow, Nedra Publ., 1983, 255 p.
4. Krivtsov A. I. Metallogeniya andezitoidnykh vulkano-plutonicheskikh pojasov. Chast' II [Metallogeny of andesitic volcano-plutonic belts. Part II], Moscow, Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, Geokart, TsNIGRI Publ., 1999, 268 p.
5. Krivtsov A. I., Migachev I. F., Popov V. S. Medno-porfirovye mestorozhdeniya mira [Copper-porphyry deposits of the world], Moscow, Nedra Publ., 1986, 235 p.
6. Krivtsov A. I., Migachev I. F., Volchkov A. G., Volodin R. N., Zvezdov V. S., Minina O. V., Nikeshin Yu. V. Metodicheskoe rukovodstvo po otsenke prognoznykh resursov almazov, blagorodnykh i tsvetnykh metallov. Vyp. Med' [Methodological guide for assessing the predicted resources of diamonds, precious and non-ferrous metals. Issue "Copper"], Moscow, TsNIGRI Publ., 2002, 212 p.
7. Migachev I. F. Paleotektonicheskaya pozitsiya mezozoiskikh vulkanoplutonicheskikh pojasov vostochno Rossii [Paleotectonic position of Mesozoic volcano-plutonic belts of eastern Russia], *Otechestvennaya geologiya [National geology]*, 2009, No 4, pp. 18–29. (In Russ.).
8. Migachev I. F., Zvezdov V. S., Minina O. V. Formatsionnye tipy medno-porfirovykh mestorozhdenii i ikh rudno-magmaticheskie sistemy [Formation types of porphyry copper deposits and their ore-magmatic systems], *Otechestvennaya geologiya [National geology]*, 2022, No 1, pp. 26–48. (In Russ.).
9. Minina O. V., Migachev I. F. Medno-porfirovye provintsii i zony Yuzhnogo Urala (prognozno-metallogenicheskoe raionirovanie) [Porphyry copper provinces and zones of the Southern Urals (forecast-metallogenetic zoning)], *Otechestvennaya geologiya [National geology]*, 2018, No 4, pp. 26–41. (In Russ.).
10. Aurelio M. A. Shear partitioning in the Philippines: Constraints from Philippine Fault and global positioning system data, *The Island Arc*, 2000, No 9, pp. 584–597.
11. Braxton D. P., Cooke D. R., Dunlap J., Norman M., Reiners P., Stein H., Waters P. From crucible to graben in 2.3 Ma: A high-resolution geochronological study of porphyry life cycles, Boyongan-Bayugo copper-gold deposits, Philippines, *Geology*, 2012, V. 40, No 5, pp. 471–474.
12. Braxton D. P., Cooke D. R., Ignacio A. M., Waters P. J. Geology of the Boyongan and Bayugo porphyry Cu-Au deposits: an emerging porphyry district in Northeast Mindanao, Philippines, *Economic Geology*, 2018, No 113 (1), pp. 83–131.

13. Carlile J. C., Mitchell A. H. G. Magmatic arcs and associated gold and copper mineralization in Indonesia, *Journal of Geochemical Exploration*, 1994, V. 50, pp. 91–142.
14. Harrison R. L., Maryono A., Norris M. S., Rohrlach B. D., Cooke D. R., Thompson J. M., Creaser R. A. Geochronology of the Tumpangpitu Porphyry Au-Cu-Mo and High-Sulfidation Epithermal Au-Ag-Cu Deposit: Evidence for Pre- and Post-mineralization Diatremes in the Tujuh Bukit District, Southeast Java, Indonesia, *Economic Geology*, 2018, V. 113, pp. 163–192.
15. Hedenquist J. W., Arribas A. J., Aoki M. Zonation of Sulfate and Sulfide Minerals and Isotopic Composition in the Far Southeast Porphyry and Lepanto Epithermal Cu-Au Deposits, Philippines, *Resource Geology*, 2017, V. 67, No 2, pp. 174–196.
16. Maryono A., Harrison R. L., Cook D. R., Rompo I., Terence G. H. Tectonics and Geology of Porphyry Cu-Au Deposits along the Eastern Sunda Magmatic Arc, Indonesia, *Economic Geology*, 2018, V. 113, pp. 7–38.
17. Ozawa A., Tagami T., Listanco E. L., Arpa C. B., Sudod M. Initiation and propagation of subduction along the Philippine Trench: evidence from the temporal and spatial distribution of volcanoes, *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, No 23, pp. 105–111.
18. Stijadji L.D., Kajino S., Imai A., Watanabe K. Cenozoic Island arc magmatism in Java Island (Sunda Arc, Indonesia): clues on relationships between geodynamics of volcanic centers and ore mineralization, *Resource Geology*, 2006, V. 56, No 3, pp. 267–292.
19. Zhang Y., Tian J., Hollings P., Gong L., Alburo I., Berador A. E., Francisco D. G., Li J., Chen H. Mesozoic porphyry Cu-Au mineralization and associated adakite-like magmatism in the Philippines: insights from the giant Atlas deposit, *Mineralium Deposita*, 2020, No 55, pp. 881–900.

Мигачёв Игорь Фёдорович (migatchev@tsnigri.ru)

доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, советник

Звездов Вадим Станиславович

доктор геолого-минералогических наук, начальник отдела

Конкин Виктор Дмитриевич

доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва, Россия

Дуговые разломы золоторудного поля Голден Вэлли зеленокаменного пояса Мидлендс (Зимбабве) и их роль в локализации оруденения

Игнатов П. А., Иванов А. А., Малютин С. А., Попов Е. М.

ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе», г. Москва, Россия

Аннотация. Анализ геолого-структурного положения месторождений золота и вольфрама в рудном поле Голден Вэлли зеленокаменного пояса Мидлендс (Зимбабве) показал, что большинство месторождений золота контролируется дуговыми нарушениями, образующими в совокупности полукольцевую структуру с размерами 9×11 км. Кроме того, эти разломы контролируют и размещение даек порфировидных гранитов, с которыми ассоциируют золоторудные жилы. Кварц-шеелитовые и золото-кварц-шеелитовые жилы вместе образуют вторую, менее отчётливую, полукольцевую структуру, сопоставимую по размерам с первой. Выделенные структуры сформированы вокруг изометричных массивов гранодиоритов позднеархейского возраста Лайон Хилл и Вайтвотерс и частично совмещены в пространстве. В магнитном поле также выявлены одно дополнительное дуговое нарушение и ряд линейных разломов. Это дуговое нарушение в совокупности с сочленёнными с ним ветвящимися жилами месторождений Голден Вэлли и Патчвэй представляет собой так называемую структуру «конского хвоста», характерную для золоторудных месторождений. Это нарушение, являющееся наиболее благоприятной структурой для локализации золоторудных жил, а также предполагаемые узлы пересечения дуговых и линейных разломов радиальной и северо-западной ориентировок, рассматриваются в качестве наиболее перспективных участков для постановки поисковых работ.

Ключевые слова: Зимбабве, архейские зеленокаменные пояса, дуговые разломы, полукольцевые структуры, магнитное поле, месторождение Голден Вэлли, золото, вольфрам, перспективы рудоносности.

Для цитирования: Игнатов П. А., Иванов А. А., Малютин С. А., Попов Е. М. Дуговые разломы золоторудного поля Голден Вэлли зеленокаменного пояса Мидлендс (Зимбабве) и их роль в локализации оруденения. Руды и металлы. 2024. № 3. С. 47–57. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10013.

Arc-shaped faults of the Golden Valley gold field of the Midlands greenstone belt in Zimbabwe and their role in localization of the ore mineralization

Ignatov P. A., Ivanov A. A., Malyutin S. A., Popov E. M.

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI), Moscow, Russia

Annotation. A detailed analysis of the geological and structural position of gold and tungsten deposits in the Golden Valley ore field of the Midlands greenstone belt has demonstrated that most of the gold deposits are controlled by arc-shaped faults that taken together form a semicircular structure with dimensions of 9×11 km. In addition, these arc-shaped faults apparently control the distribution of dikes of porphyry granites, that are associated with gold ore veins. Quartz-scheelite and gold-quartz-scheelite veins together form a second, less distinct, semicircular structure comparable in size to the first one. The highlighted structures were formed around isometric Late Archean granodiorite massifs, Lion Hill and Whitewaters, respectively, and are partially overlapped in space. The magnetic field, also, reveals one additional arc-shaped fault and a series of linear faults. This arc-shaped fault, in conjunction with its associated branching veins of the Golden Valley and Patchway deposits, represents the so-called “horsetail” structure that is characteristic for gold deposits. This fault that is the most favorable structure for localization of gold ore veins, as well as the proposed junctions of arc-shaped and linear faults of radial and northwestern orientations, are considered as the most promising areas where geological prospecting is recommended.

Keywords: Zimbabwe, Archean greenstone belts, arc-shaped faults, semicircular structures, magnetic field, Golden Valley deposit, gold, tungsten, ore-bearing potential.

For citation: Ignatov P. A., Ivanov A. A., Malyutin S. A., Popov E. M. Arc-shaped faults of the Golden Valley gold field of the Midlands greenstone belt in Zimbabwe and their role in localization of the ore mineralization. Ores and metals, 2024, № 3, pp. 47–57. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10013.



Введение. Более 85 % месторождений золота в комплексах древних зеленокаменных поясов кратона Зимбабве относятся к жильным и приурочены к разрывным нарушениям [12].

Помимо линейных, широко распространены дуговые и полукольцевые нарушения, для которых характерны элементы фрактальности в виде структур с диаметром от десятков до 170 км. Роль этих нарушений в локализации оруденения изучена недостаточно, она отмечена лишь в редких публикациях [9]. Но существенного значения указанным нарушениям никогда не придавалось. Главными рудоконтролирующими и рудовмещающими структурами считались нарушения сдвигового типа [3, 11, 12, 14, 17, 22, 23]. В настоящей работе основное внимание уделено нарушениям дугообразной формы и их рудоконтролирующей роли на примере рудного поля Голден Вэлли зеленокаменного пояса Мидлендс.

Фактический материал, на базе которого проводились исследования, включал геологическую и тектоническую карты, а также карту полезных ископаемых Зимбабве м-ба 1 : 1 000 000 [19–21] и геологическую карту района Кадома м-ба 1 : 1 000 000 [4], геолого-структурные схемы, материалы ряда публикаций [7, 8, 12–15, 24] и результаты аэромагнитной съёмки [18]. Пространственные закономерности локализации оруденения проанализированы с использованием геоинформационной системы QGIS. В ГИС-проекте совмещены все доступные картографические материалы по району Голден Вэлли.

Результаты исследований. Золоторудное поле Голден Вэлли расположено в районе Гатума в 15 км от г. Кадома. Оно занимает плоский водораздел между верховьями рек Мариан на юго-западе и Шаган на северо-востоке. Северный фланг рудного поля располагается в верховьях небольшой реки Литл Мзое. Район находится на северо-западе наиболее продуктивной золоторудной области Мидлендс, занимающей центральное положение в металлогеническом поясе кратона Зимбабве [1, 2]. В области известно 240 коренных месторождений золота, преимущественно жильного типа [3, 21].

Главными геологическими элементами позднеархейского зеленокаменного пояса Мидлендс являются покровы метабазалтов и серпентинитов, образовавшихся по коматиитам и, в меньшей мере, дацитов, прорванные позднеархейскими интрузивами тоналит-трондьемит-гранодиоритового комплекса Сесомби и монцонит-гранодиорит-калиевогранитного комплекса Чилиманзи с возрастом, соответственно, 2667–2680 и 2601±15 млн лет [16, 22]. Гранитоиды, очевидно, внедрялись вдоль осевой зоны крупной антиклинали северного и северо-восточного простирания [15].

Среднее по запасам месторождение Голден Вэлли с накопленной добычей 31 т непосредственно контактирует с месторождением Патчвэй, где добыто 11,3 т металла. Рудные жилы этих месторождений занимают два субпараллельных яруса с падением на северо-запад под углами 30–35°, оруденение в них в разрезе частично перекрывается, имея широтный тренд [15]. В плоскости жилы золоторудная зона Голден Вэлли по простиранию и падению занимает примерно 1×1 км. Продуктивная зона Патчвэй прослежена далее на север на расстояние порядка 2,5 км, а по падению на 1 км [15, 23].

Эти месторождения сопровождаются серией мелких по запасам объектов (таблица). Восточнее и юго-восточнее Голден Вэлли располагаются месторождения Руж, Эназе Эвент, Биг Бэн, Дредноут, Глазго, Хоршпоу (Веллингтон) и Аврора, а западнее и юго-западнее размещены месторождения Гамбург, Гэлэкси, Симингтон, Буффало, Мастерпис, Алладин и др. (рис. 1).

Большинство месторождений рассматриваемой области занимает площадь 18×10 км, что соответствует золоторудному полю, охватывающему частично массив Вайтвотерс и полностью его сателлит – массив Лайон Хилл. Данные абсолютного возраста этих массивов отсутствуют, однако известно, что массив Вайтвотерс является, по меньшей мере, двухфазным. Первая фаза представлена тоналитами, а вторая, слагающая его южную часть, калиевыми гранитами Грандер, возможно, относящимися к комплексу Чилиманзи [15]. Почти



Таблица. Данные по накопленной добыче золота на месторождениях рудного поля Голден Вэлли

Table. Data on the cumulative gold production at mineral deposits of the Golden Valley ore field

№№ п/п	Название месторождения	Накопленная добыча, кг	Содержание Au, г/т
1	Golden Vally (Голден Вэлли)	31 057	22,3
2	Patchway (Патчвей)	15 337	11,3
3	Masterpiece (Мастерпис)	1061	17,2
4	Glasgow (Глазго)	928	11,7
5	Rouge (Руж)	546	9,3
6	Big Ben (Биг Бэн)	460	12,9
7	Aurora (Аврора)	430	4,3
8	Symington (Симингтон)	388	5,7
9	Dreadnaught (Дредноут)	331	4,2
10	Galaxy (Гэлэкси)	283	8,9
11	Alladin (Алладин)	259	11,8
12	Hamburg (Гамбург)	232	7,4
13	Horseshoe (Хорсшоу)	176	9,7
14	Another Event (Эназе Эвент)	116	7,7
15	Chance Group (группа Чанс)	110	9,2
16	Profiteer Group (группа Профитер)	48	4,2

все месторождения расположены в позднеархейской толще порфиритов и серпентинитов серии Верхняя Булавайо [4]. Лишь некоторые рудные жилы локализованы в дацитах той же серии и в гранитоидных массивах. На западе рудное поле ограничено региональным разломом Лили север-северо-восточного простирания, в котором выделяются два параллельных шва. В центре рудного поля расположена безрудная кварцевая жила длиной до 4 км [15]. Согласно тектонической карте Зимбабве м-ба 1 : 1 000 000, эта жила маркирует северо-западный разлом второго порядка, прослеженный до северного фланга месторождения Патчвэй (см. рис. 1).

Большое значение в контроле золотого оруденения в рудном поле Голден Вэлли придаётся сдвиговым нарушениям [14, 15]. С этим можно согласиться, однако более важная роль в локализации оруденения принадлежит дуговым разломам, особенно, участкам их изгиба и сопряжения с другими дуговыми и линейными радиальными нарушениями. Так, многие золоторудные жилы (месторождения), распо-

ложенные вокруг массива Лайон Хилл, образуют почти замкнутую прерывистую цепочку овальной конфигурации, скорее всего свидетельствующую о наличии здесь полукольцевого разрывного нарушения (см. рис. 1).

Важно подчеркнуть, что простирание золото-сульфидно-кварцевых жил, их сближенных серий и линейных зон прожилкования закономерно изменяется по овалу с юго-восточного (Алладин) на север-северо-восточное (Гэлэкси). Затем на северо-восточное (Эрин), далее на субширотно-северо-восточное (Руж), субширотно-северо-западное (Эназе Эвент, Биг Бэн и Дредноут) и, наконец, на юго-западное (Глазго и Хорсшоу). Главные жилы месторождений золота Голден Вэлли и Патчвэй, расположенные в северо-западной части полукольца, имеют север-северо-восточное простирание, обусловленное наличием дугообразных нарушений меньшего диаметра (см. рис. 1).

Благоприятными для локализации оруденения являются узлы пересечения дуговых и линейных разломов. К таким участкам приу-

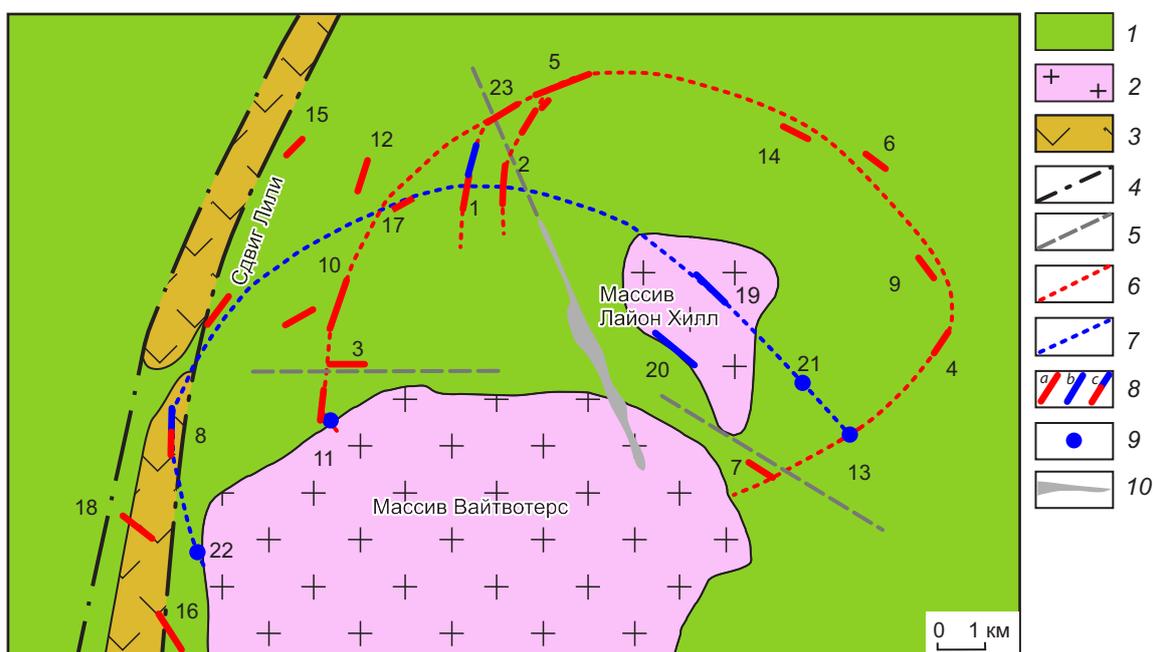


Рис. 1. Схема полукольцевого расположения жильных месторождений вольфрама и золота в рудном поле Голден Вэлли (увеличенный фрагмент карты золоторудных месторождений Зимбабве м-ба 1 : 1 000 000 [19] с учётом геологической карты и схемы м-ба 1 : 100 000 [4, 15]):

1 – серпентиниты и порфириды зеленокаменного пояса Мидлендс, поздний архей; 2 – дациты позднего архея; 3 – гранитоиды массивов Вайтвотерс и Лайон Хилл, поздний архей; 4 – сдвиговая зона регионального разлома Лили; 5 – предполагаемые радиальные разломы; 6 – контуры предполагаемого полукольцевого нарушения и других дуговых разломов преимущественно с золото-кварцевыми жилами; 7 – контур предполагаемого полукольцевого нарушения с кварц-шеелитовыми и золото-кварц-шеелитовыми жилами; 8 – жилы: золото-кварцевые (а), кварц-шеелитовые (b), золото-кварц-шеелитовые (с), мощность жил условная, длина соответствует выходам на дневную поверхность; 9 – рудопроявления вольфрама; 10 – протяжённая безрудная кварцевая жила; месторождения и рудопроявления: 1 – Голден Вэлли, 2 – Патчвэй, 3 – Мастерпис, 4 – Глазго, 5 – Руж, 6 – Биг Бэн, 7 – Аврора, 8 – Симингтон, 9 – Дрэднот, 10 – Гэлэкси, 11 – Алладин, 12 – Гамбург, 13 – Хорсшоу, 14 – Эназе Эвент, 15 – группа Чанс, 16 – группа Профитер, 17 – Эрин, 18 – Буффало, 19 – группа Лайон Хилл, 20 – Тюнгстен, 21 – W35, 22 – W6, 23 – Базил Вейн

Fig. 1. Schematic map showing the semi-circular arrangement of tungsten and gold vein deposits in the Golden Valley ore field (enlarged fragment of the map of gold ore deposits of Zimbabwe, scale 1 : 100 000 [19] with allowance made for the geological map and the scheme, scale 1 : 100 000 [4, 15]):

1 – serpentinites and porphyrites of the Midlands greenstone belt, Late Archean; 2 – dacites of the Late Archean; 3 – granitoids of the Whitewaters and Lion Hill massifs, Late Archean; 4 – shear zone of the regional Lily fault; 5 – inferred radial faults; 6 – contours of the inferred semi-circular fault and other arc faults mainly with gold-quartz veins; 7 – lines of the inferred semi-circular fault with quartz-scheelite and gold-quartz-scheelite veins; 8 – veins: gold-quartz (a), quartz-scheelite (b), gold-quartz-scheelite (c), the thickness of the veins is conventional, the length corresponds to the outcrops on the daylight surface; 9 – tungsten ore occurrences; 10 – extended barren quartz vein; ore deposits and occurrences: 1 – Golden Valley, 2 – Patchway, 3 – Masterpiece, 4 – Glasgow, 5 – Rouge, 6 – Big Ben, 7 – Aurora, 8 – Symington, 9 – Dreadnought, 10 – Galaxy, 11 – Alladin, 12 – Hamburg, 13 – Horseshow, 14 – Enaze Event, 15 – Chance group, 16 – Profiteer group, 17 – Erin, 18 – Buffalo, 19 – Lion Hill group, 20 – Tyungsten, 21 – W35, 22 – W6, 23 – Basil Vein

рочены жилы месторождений Мастерпис (на западе) и Аврора (на юго-востоке), имеющие резко несогласное простирание относительно овального тренда. Жилы месторождения Мастерпис простираются в запад-северо-западном направлении, а месторождения Аврора – направлены на северо-запад. Эти направления могут соответствовать радиальным трещинам.

К северу от массива Вайтвотерс намечается ещё одна менее отчётливая полукольцевая структура, трассируемая кварцево-шеелитовыми и кварц-шеелит-золоторудными жилами месторождений и рудопроявлений W6, Симингтон, Эрин, группы Лайон Хилл, W35 и др. (см. рис. 1). В точке пересечения выделенных колец располагается месторождение Эрин. Оба овальных полукольца сопоставимы по размерам. Выделенная дугообразная структура может быть связана не только с коническим тектоническим нарушением, но и с антиклинальным залеганием стратифицированных рудовмещающих толщ. Однако, на имеющейся геологической карте рудного поля отсутствуют данные о стратификации зеленокаменных пород.

Судя по расположению шахт, золоторудные жилы на востоке первого полукольца характеризуются падением в восточных румбах [4, 19]. Жилы, расположенные на западе, падают в западном направлении. То есть все золоторудные тела в рудном поле Голден Вэлли залегают периклинально и падают от изометричного массива Лайон Хилл.

Дугообразные рудовмещающие зоны, установленные на месторождениях Голден Вэлли, Патчвэй и др., также падают на запад и северо-запад с углами 30° (Патчвэй), 35° (Голден Вэлли), 35° (Базил Вейн), 47° (Кабанга) и 70° (Руж) [15] (рис. 2).

Наибольшая продуктивность золотой минерализации в плоскости рудных жил на месторождениях Голден Вэлли и Патчвэй имеет широтный тренд [15]. Это следует связать с максимальным изгибом и соответствующим расширением дуговых конических рудовмещающих разломов. Дугообразные изгибы даек порфириовидных гранитов вместе с золото-

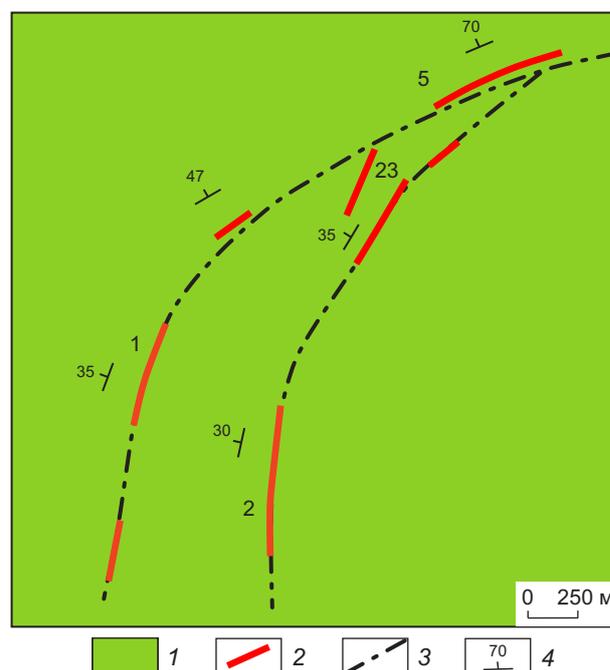


Рис. 2. Дуговые рудовмещающие разломы в пределах шахтных полей золоторудных месторождений Голден Вэлли и Патчвэй. Позиция и элементы залегания золоторудных жил, по Херрингтону [15]:

1 – серпентиниты и порфириды позднего архея; 2 – кварцево-сульфидно-золоторудные жилы месторождений (мощность рудных жил условная, длина соответствует выходам на дневную поверхность); 3 – дуговые разломы, выделенные по дайкам порфириовидных гранитов и сопровождающим их рудным жилам; 4 – элементы залегания жил. Номера месторождения см. рис. 1

Fig. 2. Arc-shaped ore-hosting faults within mine fields of the Golden Valley and Patchway gold deposits. Position and attitudes of gold ore veins, after Herrington [15]:

1 – Late Archean serpentinites and porphyrites; 2 – quartz-sulfide-gold veins of the ore deposits (the thickness of the ore veins is conventional, the length corresponds to the outcrops on the daylight surface); 3 – arc-shaped faults identified by dikes of porphyry granite and their accompanying ore veins; 4 – attitudes of the veins. For the mineral deposit numbers see Fig. 1

рудными кварц-сульфидными жилами установлены на руднике Эрин [15] (рис. 3).

Приведённые примеры дугообразных рудовмещающих разломов показывают, что они

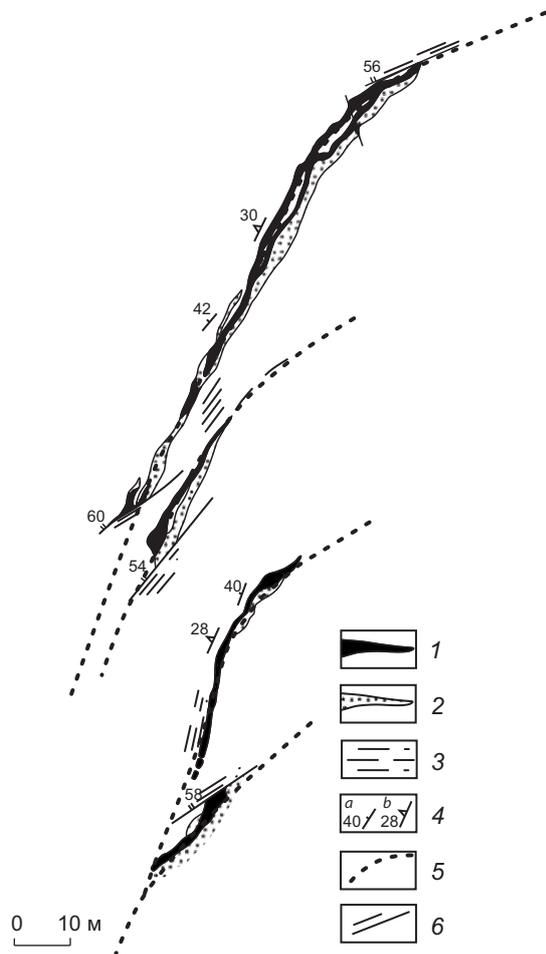


Рис. 3. Дугообразные рудные жилы в контактах даек порфиридных гранитов на плане горизонта 28 Северной залежи рудника Эрин (по Херрингтону [15] с добавлениями авторов):

1 – кварцево-сульфидно-золоторудные жилы; 2 – дайки порфиридных гранитов; 3 – участки расланцевания; 4 – элементы залегания золоторудных жил (а), порфиридных гранитов (b); 5 – фрагменты рудовмещающих дуговых разломов; 6 – пострудные нарушения

Fig. 3. Arc-shaped ore veins at the contacts of dikes of porphyry granite on the plan of Horizon 28 of the Northern lode of the Erin mine (modified after Herrington [15]):

1 – quartz-sulfide-gold ore veins; 2 – porphyry granite dikes; 3 – schistosity zones; 4 – attitudes of the gold ore veins (a), porphyry granites (b); 5 – fragments of ore-hosting arc-shaped faults; 6 – post-mineral disturbances

могут иметь длину от десятков метров до первых километров и по падению прослеживаться до километра.

Как видно на погоризонтном плане рудника Эрин и отмечено на главных месторождениях Голден Вэлли и Патчвэй, рудные жилы тесно пространственно ассоциируют с дорудными дайками порфиридных гранитов, которые также выполняют дуговые и сдвиговые нарушения и контролируют оруденение [15]. Возможно, жилы близки дайкам по возрасту. Эти дайки, также как и массивы гранитоидов комплексов Сесомби и Чилиманзи, оторваны во времени от вулканитов зеленокаменных поясов и прорывают терригенные отложения серии Шамва, перекрывающие вулканогенные породы серии Верхняя Булавайо. Возрастные соотношения их с гранитоидами комплексов Сесомби и Чилиманзи не выяснены. Единичные определения возраста дайки порфиридных гранитов на месторождении Форд в районе Квекве противоречивы – 2541±17 млн лет [5] и 2645,2±1,5 млн лет [6]. Предполагаем, что эти дайки могут относиться к жильным отщеплениям комплекса Чилиманзи.

Следует подчеркнуть несколько различную позицию золоторудных и вольфрамовых месторождений. Она чаще не совпадает, при этом вольфрамовые месторождения преимущественно располагаются в гранитоидах, а золоторудные – во вмещающих массивы породах. Иногда минерализация вольфрама и золота совмещена в пространстве, как в жилах месторождений Голден Вэлли и Симингтон.

Существуют различные точки зрения на возраст оруденения и связь его с магматизмом. Согласно первой, шеелитовые и золоторудные месторождения связаны с гранитоидами комплекса Сесомби [10]. При этом возраст вольфрамового и золотого оруденения составляет 2,66±0,05 млрд лет, что указывает на единый этап рудообразования.

В последние годы многие исследователи высказывались в пользу наличия более позднего золотого оруденения, возникшего после внедрения монцонит-гранодиорит-калиево-гранитного комплекса Чилиманзи и его жильных фаз – даек монцонитов, гранит-аплитов,

пегматитов и, возможно, порфиридных гранитов [5, 6, 16, 17]. В этом случае могут встречаться месторождения, образовавшиеся в результате наложения минерализации разных этапов, а шеелит в некоторых золоторудных жилах может быть переотложенным.

Следует отметить, что все вопросы возраста и связи оруденения с магматизмом являются недостаточно изученными и дискуссионными, так как выводы базируются на единичных определениях абсолютного возраста, которые во многом противоречивы. Конкретные факты возрастных соотношений жил разного состава между собой, а также с гранитоидами комплекса Чилиманзи и их жильными отщеплениями, включая пегматиты, не приводятся.

Наличие дугообразных и линейных нарушений подтверждается и геофизическими исследованиями. По данным аэрогеофизической съёмки, выполненной в 1983 г., с высотой полёта около 300 м, магнитное поле рассматриваемой площади (рис. 4) спокойное. Диапазон значений составляет 20–50 нТл. Слабая выраженность в структуре магнитного поля геологических объектов связана с небольшой контрастностью магнитных свойств пород и большой высотой полёта.

На западе рассматриваемой площади отмечается линейная положительная аномалия магнитного поля, приуроченная к выходам дацитов позднего архея, маркирующим региональный разлом Лили. Стоит отметить, что в магнитном поле проявлен только северный фрагмент тела дацитов. Интрузивные массивы Вайтвотерс и Лайон Хилл в магнитном поле не проявляются.

К востоку от разлома Лили отчётливо намечается протяжённое в северо-западном направлении дуговое нарушение, выделяющееся по небольшому градиенту магнитного поля. С этим нарушением на востоке сочленены дуговые нарушения с жилами месторождений Голден Вэлли и Патчвэй, образуя в совокупности структуру «конского хвоста». Таким образом, положение этих наиболее крупных месторождений определяется зонами сопряжения дугового разлома, выделенного по

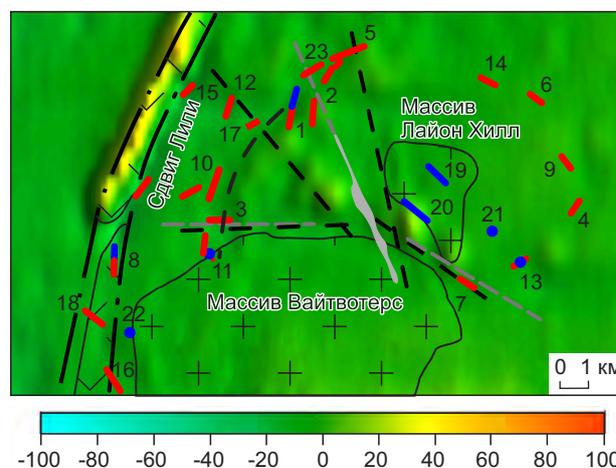


Рис. 4. Фрагмент локального магнитного поля района месторождения Голден Вэлли:

пунктир – нарушения по данным магнитной съёмки; остальные усл. обозн. см. рис. 1

Fig. 4. Fragment of the local magnetic field of the Golden Valley deposit area:

The dotted line are disturbances according to magnetic survey data; for other symbols see Fig. 1

геофизическим данным, с дуговыми разломами, вмещающими жилы этих месторождений.

Полукольцевую структуру пересекают два тектонических нарушения северо-западного и север-северо-западного направлений, которые в магнитном поле отражены цепочкой локальных аномалий и линейной аномалией низкой интенсивности. К северу от массива Вайтвотерс намечается широтное нарушение. Оно выделено на основе смены спокойного характера магнитного поля над массивом на слабо аномальное поле над вмещающими массив породами. Помимо север-северо-западного нарушения, проходящего через месторождение Руж, остальные разломы, по-видимому, соответствуют радиальным разломам выделенной полукольцевой структуры.

Надо обратить внимание на наличие серии положительных аномалий слабой интенсивности около 25–30 нТл в виде северо-западной цепочки, расположенной севернее массива Вайтвотерс. Одна из них находится меж-

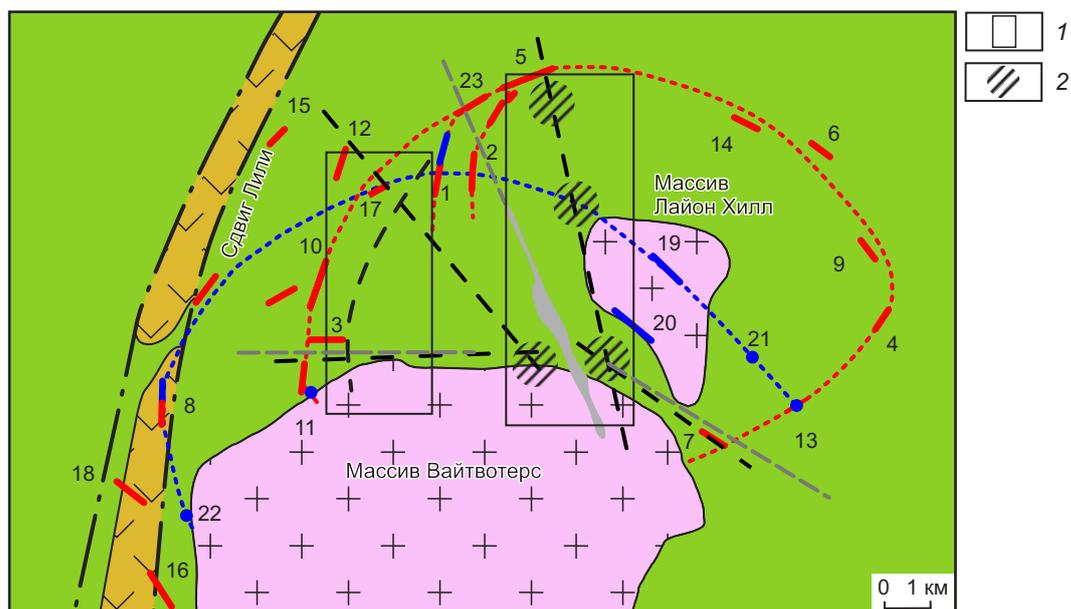


Рис. 5. Геолого-структурная схема с элементами прогноза рудного поля Голден Вэлли (зеленокаменный пояс Мидлендс):

1 – перспективные площади; 2 – наиболее благоприятные участки для локализации оруденения; остальные усл. обозн. см. рис. 1 и рис. 4

Fig. 5. Schematic geological structural map of the Golden Valley ore field in the Midlands greenstone belt with elements of forecast:

1 – promising areas; 2 – the most favorable areas for mineralization localization; for other symbols see Fig. 1 and Fig. 4

ду этим массивом и его сателлитом Лайон Хилл. Природа их остаётся неясной.

Имеющиеся данные позволяют считать дуговые нарушения и узлы их пересечения между собой и сдвиговыми линейными разломами наиболее благоприятными структурами для локализации оруденения и рекомендовать постановку первоочередных поисковых работ на их площадях (рис. 5).

Наиболее перспективной структурой считается протяжённое дуговое нарушение, выявленное по результатам аэромагнитной съёмки. Оно сопряжено с дугообразными жилами самых крупных месторождений – Голден Вэлли и Патчвей. Вероятность обнаружения в нём золотого оруденения достаточно большая. В качестве перспективной выделена также меридиональная полоса в центральной части поля шириной до 3 км, в пределах которой расположено четыре возможных узла пересече-

ния разрывных дуговых и линейных разломов.

Первый участок, расположенный в юго-западной части полосы, представляет собой возможный узел пересечения линейного разлома северо-западного простирания с радиальным нарушением широтного направления. Восточнее намечены ещё три участка, приуроченные к линейному нарушению северо-западного простирания и расположенные в местах его пересечения с дуговыми и радиальными трещинами полукольцевых структур (см. рис. 5). Во всех этих участках возможно выявление не только жильного оруденения, но и прожилково-вкрапленного штокверкового типа.

Выводы. Показано значение дуговых нарушений в локализации жильных месторождений золота и вольфрама рудного района Голден Вэлли. Выделены две частично совме-



щённые полукольцевые структуры, трассируемые закономерно меняющимися простирание рудными жилами. Центры структур находятся в северной части массива Вайтвотерс и его сателлите Лайон Хилл комплекса Сесомби.

По градиенту магнитного поля, установленному в результате аэромагнитной съёмки, выделен протяжённый дуговой разлом. Это нарушение, сопряжённое с дуговыми разломами, вмещающими золоторудные жилы месторождений Голден Вэлли и Патчвэй, является наиболее перспективным для обнаружения нового золоторудного месторождения.

Список литературы

1. *Игнатов П. А., Малютин С. А., Иванов А. А., Десяткин А. С., Ланчак М. М.* Кольцевые и линейные золоторудные районы Зимбабве, и оценка остаточных ресурсов золота // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2023. – № 65 (6). – С. 14–25.
2. *Игнатов П. А., Малютин С. А., Таванда Маримо, Ланчак М. М.* Основные черты исторической и региональной металлогении кратона Зимбабве // Горный журнал. – 2024. – № 5. – С. 28–37.
3. *Степанов В. А.* Золоторудные месторождения провинции Зимбабве // Региональная геология и металлогения. – 2021. – № 85. – С. 58–66.
4. *Bliss N. W.* The geology of the country around Gatooma, Rhodesia // Rhodesian Geological Survey Bulletin. – 1970. – V. 64. – 240 p.
5. *Buchholz P., Herzig P., Friedrich G, Frei R.* Granite-hosted gold mineralization in the Midlands greenstone belt: a new type of low-grade gold deposit in Zimbabwe // Mineralium Deposita. – 1998. – V. 17. – P. 437–460.
6. *Buchholz Peter, Oberthür Thomas, Lüders Volker, Wilkinson Jamie.* Multistage Au-As-Sb Mineralization and Crustal-Scale Fluid Evolution in the Kwekwe District, Midlands Greenstone Belt, Zimbabwe: A Combined Geochemical, Mineralogical, Stable Isotope, and Fluid Inclusion Study // Economic Geology. – 2007. – V. 102. – P. 347–378.
7. *Catchpole S. J.* Gold mineralisation related to shear zones in the Venice Group of mines near Kadoma, Zimbabwe // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 1987. – P. 71–88.
8. *Collender F. D.* The geology of the Cam & Motor mine, southern Rhodesia / The geology of some ore deposits in Southern Africa. Geological Society of South Africa, Special Publications. – 1964. – №. 2. – P. 15–27.
9. *Danhaeusser C. R.* The nature and distribution of Archaean gold mineralisation in southern Africa // Minerals Science and Engineering. – 1976. – № 3. – P. 46–84.
10. *Darbyshire D. P. F., Pitfield P. E. J., Campbell S. D. G.* Late Archean and Early Proterozoic gold-tungsten mineralization in the Zimbabwe Archean craton: Rb-Sr and Sm-Nd isotope constraints // Geology. – 1996. – № 24. – P. 19–22.
11. *Fisher N. J., Porter C. W., Fabian W. M. B. & Carter A. H. C.* The tectonic and magmatic framework of Archaean lode-gold mineralisation in the Midlands greenstone belt, Zimbabwe / Proceedings of Brazil Gold '91, An International Symposium on the Geology of Gold, Belo Horizonte, 1991. – P. 359–366.
12. *Foster R. P., Mann A. G., Stowe C. W., Wilson J. F.* Archean gold mineralization in Zimbabwe // Mineral deposits of Southern Africa. – 1986. – V. 1. – P. 43–112.
13. *Foster R. P.* Tectonic, thermal and chemical evolution of a late Archaean auriferous shear zone, Dalny mine, Zimbabwe / GAC-MAC Annual Meeting, Program with Abstracts. – 1990. – A 22.
14. *Herrington R. J.* The relationship between fluids and structure at the Patchway gold mine, Zimbabwe. PhD Thesis. – London : Department of Geology, Royal School of Mines, Imperial College, 1991. – 378 p.
15. *Herrington R. J.* Late Archaean structure and gold mineralization in the Kadoma region of the Midlands greenstone belt, Zimbabwe. URL:

<http://sp.lyellcollection.org>. University Library on June 20, 2015. – P. 173–191.

16. *Kalbskopf S., Nutt T.* Lithological contrasts and constraints on gold mineralisation in granitoids in the Zimbabwe craton: structural controls and implications for exploration / *Economic Geology Research Institute Information Circular* № 370. – Johannesburg : University of the Witwatersrand, 2003. – 24 p.
17. *Klemm D. D., Kräutner H. G.* Hydrothermal alteration and associated mineralization in the Freda-Rebecca gold deposit – Bindura District, Zimbabwe // *Mineralium Deposita*. – 2000. – № 35. – P. 90–108.
18. *Mekonnen T. K.* Interpretation and Geodatabase of Dykes Using Aeromagnetic Data of Zimbabwe and Mozambique. M. Sc. Thesis. – Delft : ITC, 2004. – 80 p.
19. *Mineral Resources of Zimbabwe. Gold deposits.* Scale 1 : 1 000 000. Compiled by D. S. Bartholomew 1984–1988. Drawn in the Geological Survey Office, Harare, Zimbabwe.
20. *Mineral resources of Zimbabwe: Base metal and industrial mineral deposits.* Scale 1 : 1 000 000. Compiled by D. S. Bartholomew 1984–1986. Drawn in the Geological Survey Office, Harare, Zimbabwe.
21. *Mineral resources. Map of Zimbabwe: precious metals deposits.* Scale 1 : 1 000 000. Compiled by P. E. J. Pitfield. 2010. British Geological Survey.
22. *Nutt T. H. C.* Gold mineralization in the Broomstock Extension and Indarama mines and their bearing on the genesis of the Kwekwe Sherwood Block goldfield // *Annals of the Geological Survey of Zimbabwe*. – 1984. – V. 10. – P. 107–120.
23. *Rankin A. H., Shepher T. J.* Fluid chemical and structural evolution of gold-quartz veins, Patchway mine, Zimbabwe / *Proceedings of the 8th Quadrennial IAGOD Symposium*. – 1993. – P. 681–694.
24. *Ward J. W. H.* Geological aspects of the Patchway gold mine, Rhodesia / *Transaction of the Geological Society of South Africa*. – 1968. – P. 147–158.
25. *Wilson J. E.* Geological setting of Archaean gold deposits in Zimbabwe / *Gold '82 : Geology, geochemistry and genesis of gold deposits*. – Rotterdam : Balkema, 1984. – P. 521–551.

References

1. Ignatov P. A., Malyutin S. A., Ivanov A. A., Desyatkin A. S., Lanchak M. M. Kol'tsevye i lineinye zolotorudnye raiony Zimbabwe, i otsenka ostatochnykh resursov zolota [Ring and linear gold mining areas of Zimbabwe, and assessment of residual gold resources], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration]*, 2023, No 65 (6), pp. 14–25. (In Russ.).
2. Ignatov P. A., Malyutin S. A., Tavanda Marimo, Lanchak M. M. Osnovnye cherty istoricheskoi i regional'noi metallogenii kratona Zimbabwe [Main features of historical and regional metallogeny of the Zimbabwe craton], *Gornyi zhurnal [Mining journal]*, 2024, No 5, pp. 28–37. (In Russ.).
3. Stepanov V. A. Zolotorudnye mestorozhdeniya provintsii Zimbabwe [Gold ore deposits of the Zimbabwe province], *Regional'naya geologiya i metallogeniya [Regional geology and metallogeny]*, 2021, No 85, pp. 58–66. (In Russ.).
4. Bliss N. W. The geology of the country around Gatooma, Rhodesia, *Rhodesian Geological Survey Bulletin*, 1970, V. 64, 240 p.
5. Buchholz P., Herzig P., Friedrich G., Frei R. Granite-hosted gold mineralization in the Midlands greenstone belt: a new type of low-grade gold deposit in Zimbabwe, *Mineralium Deposita*, 1998, V. 17, pp. 437–460.
6. Buchholz Peter, Oberthür Thomas, Lüders Volker, Wilkinson Jamie. Multistage Au-As-Sb Mineralization and Crustal-Scale Fluid Evolution in the Kwekwe District, Midlands Greenstone Belt, Zimbabwe: A Combined Geochemical, Mineralogical, Stable Isotope, and Fluid Inclusion Study, *Economic Geology*, 2007, V. 102, pp. 347–378.
7. Catchpole S. J. Gold mineralisation related to shear zones in the Venice Group of mines near Kadoma, Zimbabwe, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 1987, pp. 71–88.
8. Collender F. D. The geology of the Cam & Motor mine, southern Rhodesia. In: The geology of some ore deposits in Southern Africa. Geological Society of South Africa, Special Publications, 1964, No. 2, pp. 15–27.
9. Danhaeusser C. R. The nature and distribution of Archaean gold mineralisation in southern Africa, *Minerals Science and Engineering*, 1976, No 3, pp. 46–84.
10. Darbyshire D. P. F., Pitfield P. E. J., Campbell S. D. G. Late Archean and Early Proterozoic gold-tungsten mineralization in the Zimbabwe Archean craton:



- Rb-Sr and Sm-Nd isotope constraints, *Geology*, 1996, No 24, pp. 19–22.
11. Fisher N. J., Porter C. W., Fabian W. M. B. & Carter A. H. C. The tectonic and magmatic framework of Archaean lode-gold mineralisation in the Midlands greenstone belt, Zimbabwe. In: Proceedings of Brazil Gold '91, An International Symposium on the Geology of Gold, Belo Horizonte, 1991, pp. 359–366.
 12. Foster R. P., Mann A. G., Stowe C. W., Wilson J. F. Archean gold mineralization in Zimbabwe, *Mineral deposits of Southern Africa*, 1986, V. 1, pp. 43–112.
 13. Foster R. P. Tectonic, thermal and chemical evolution of a late Archaean auriferous shear zone, Dalny mine, Zimbabwe. In: GAC-MAC Annual Meeting, Program with Abstracts, 1990, A 22.
 14. Herrington R. J. The relationship between fluids and structure at the Patchway gold mine, Zimbabwe. PhD Thesis, London: Department of Geology, Royal School of Mines, Imperial College, 1991, 378 p.
 15. Herrington R. J. Late Archaean structure and gold mineralization in the Kadoma region of the Midlands greenstone belt, Zimbabwe. URL: <http://sp.lyellcollection.org>. University Library on June 20, 2015, pp. 173–191.
 16. Kalbskopf S., Nutt T. Lithological contrasts and constraints on gold mineralisation in granitoids in the Zimbabwe craton: structural controls and implications for exploration. In: Economic Geology Research Institute Information Circular № 370, Johannesburg: University of the Witwatersrand, 2003, 24 p.
 17. Klemm D. D., Kräutner H. G. Hydrothermal alteration and associated mineralization in the Fre-da-Rebecca gold deposit – Bindura District, Zimbabwe, *Mineralium Deposita*, 2000, No 35, pp. 90–108.
 18. Mekonnen T. K. Interpretation and Geodatabase of Dykes Using Aeromagnetic Data of Zimbabwe and Mozambique. M. Sc.Thesis. – Delft : ITC, 2004. – 80 p.
 19. Mineral Resources of Zimbabwe. Gold deposits. Scale 1 : 1 000 000. Compiled by D. S. Bartholomew 1984–1988. Drawn in the Geological Survey Office, Harare, Zimbabwe.
 20. Mineral resources of Zimbabwe: Base metal and industrial mineral deposits. Scale 1 : 1 000 000. Compiled by D. S. Bartholomew 1984–1986. Drawn in the Geological Survey Office, Harare, Zimbabwe.
 21. Mineral resources. Map of Zimbabwe: precious metals deposits. Scale 1 : 1 000 000. Compiled by P. E. J. Pitfield, British Geological Survey, 2010.
 22. Nutt T. H. C. Gold mineralization in the Broomstock Extension and Indarama mines and their bearing on the genesis of the Kwekwe Sherwood Block goldfield, *Annals of the Geological Survey of Zimbabwe*, 1984, V. 10, pp. 107–120.
 23. Rankin A. H., Shepherd T. J. Fluid chemical and structural evolution of gold-quartz veins, Patchway mine, Zimbabwe. In: Proceedings of the 8th Quadrennial IAGOD Symposium, 1993, pp. 681–694.
 24. Ward J. W. H. Geological aspects of the Patchway gold mine, Rhodesia. In: Transaction of the Geological Society of South Africa, 1968, pp. 147–158.
 25. Wilson J. E. Geological setting of Archaean gold deposits in Zimbabwe. In: Gold '82: Geology, geochemistry and genesis of gold deposits, Rotterdam, Balkema, 1984, pp. 521–551.

Игнатов Пётр Алексеевич (petrignatov@gmail.com)

доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой

Иванов Андрей Александрович

кандидат геолого-минералогических наук, доцент

Малютин Сергей Александрович

кандидат геолого-минералогических наук, доцент

Попов Егор Михайлович

аспирант

ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе», г. Москва, Россия



СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.43 : 552.08 (470.5)

Особенности вещественного состава первичных, смешанных и окисленных медных руд в габброидах Волковского массива (Средний Урал, Россия)

Морохин А. И.¹, Шумилова Т. Г.¹, Светов С. А.²

¹ Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия

² Институт геологии КарНЦ РАН, г. Петрозаводск, Россия

Аннотация. Магматические месторождения меди уральского типа в габбро относятся к особому типу медных месторождений, разработка которых существенно зависит от степени окисления руд, не всегда являющейся однозначной. На Волковском месторождении Cu-Fe-V руд (Средний Урал, Россия) известны три технологические сорта медных руд – первичные, окисленные и смешанные, выделенные по относительному содержанию Cu^{2+} в общем балансе меди в руде. В статье приводятся петрологические, петрохимические, геохимические и минералогические характеристики разновидностей сортов медных руд Северо-Западного участка Волковского месторождения. Показано, что критерий выделения сортов медных руд по относительному содержанию Cu^{2+} не отражает реальной степени гипергенного окисления в рамках выделенных технологических сортов. Результаты исследований указывают на необходимость более детального изучения минералогии сульфидов меди для выяснения специфики окислительно-восстановительных условий формирования и корректировки показателей первичной и гипергенной степени окисления меди, возможности установления новых критериев для определения границ технологических сортов медных руд на примере Волковского месторождения.

Ключевые слова: месторождения меди, Волковское месторождение, медная минерализация, медные руды, сульфиды меди, борнит, технологические сорта медных руд.

Для цитирования: Морохин А. И., Шумилова Т. Г., Светов С. А. Особенности вещественного состава первичных, смешанных и окисленных медных руд в габброидах Волковского массива (Средний Урал, Россия). Руды и металлы. 2024. № 3. С. 58–81. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10014.

Compositional peculiarities of the primary, mixed, and oxidized copper ores in gabbroids of the Volkovsky massif (Middle Urals, Russia)

Morokhin A. I.¹, Shumilova T. G.¹, Svetov S. A.²

¹ Institute of Geology of Komi SC UB RAS, Syktывkar, Russia

² Institute of Geology KarRC RAS, Petrozavodsk, Russia

Annotation. The Ural type magmatic copper deposits in gabbro are assigned to a specific type of copper deposits which exploitation substantially depends on the oxidation degree of the ores, that is often not unambiguous. At the Volkovskoe Cu-Fe-V deposit (Middle Urals, Russia), three technological grades of the copper ores are known, the primary, oxidized, and mixed ones, that are distinguished based on the relative content of Cu^{2+} in the total copper balance. This paper presents petrological, petrochemical, geochemical, and mineralogical characteristics of natural varieties of the copper ores of the Northwestern zone of the Volkovskoe deposit. It is demonstrated that the criterion for distinguishing the technological grades of the copper ores by the relative Cu^{2+} content does not reflect the real degree of the supergene oxidation for the selected technological varieties. The results of our research suggest a necessity of studying the copper sulfides in more detail to clarify peculiarities of the redox conditions of the ore formation, to correct the indicators of the primary and supergene copper oxidation degree, which may provide new criteria to determine the boundaries between the technological grades of copper ores, using the Volkovskoe ore deposit as an example.

Keywords: copper deposits, Volkovskoe deposit, copper mineralization, copper ores, copper sulfides, bornite, technological grades of copper ores.

For citation: Morokhin A. I., Shumilova T. G., Svetov S. A. Compositional peculiarities of the primary, mixed, and oxidized copper ores in gabbroids of the Volkovsky massif (Middle Urals, Russia). Ores and metals, 2024, № 3, pp. 58–81. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10014.



Введение. Изучению медных руд и минералов меди в целях улучшения обогатимости руд в мире в целом уделяется большое внимание [24, 35]. Флотация является основным промышленным методом извлечения сульфидов меди, в связи с этим активно изучаются их поверхностные свойства, в том числе электрохимическая активность [35, 37]. Важную роль при флотационном обогащении играет степень окисленности сульфидов, которая определяет их гидрофобные свойства и характер взаимодействия с флотореагентами [24, 32], что в итоге отражается на показателях обогащения, таких как извлечение и выход полезного компонента. В связи с этим изучение степени окисленности медных руд имеет первостепенное значение при разработке сульфидных месторождений.

В настоящее время известно шесть основных типов промышленных месторождений меди – медно-никелевые магматические, медистые песчаники, медноколчеданные, медно-порфировые, скарновые, кварцево-сульфидные, – отличающиеся генетическими особенностями формирования оруденения [8]. Среди перечисленных медно-никелевые магматические месторождения, несущие, как правило, ещё и попутные существенные запасы благородных металлов, наиболее важны и широко эксплуатируются как за рубежом, так и в России (в том числе Бушвельд (ЮАР), Садбери, Томпсон (Канада), Стиллуотер (США), Камбалда (Австралия) и другие [11]). В России магматические месторождения меди находятся в Норильском районе, включая Талнахское, Октябрьское, Норильск-1, на Кольском полуострове – месторождения Печенгского, Мончегорского, Аллареченского рудных полей. Данный тип месторождений генетически связан с дифференцированными ультраосновными и основными магматическими массивами.

В группе месторождений меди магматического генезиса выделяются медно-железо-ванадиевые месторождения в габброидах, которые немногочисленны и обычно невелики по запасам меди. В то же время Волковское медно-железо-ванадиевое месторождение является наиболее типичным и одним из круп-

нейших на Урале [6], в нём находится 0,8 % общероссийских запасов меди.

Своеобразие руд волковского типа заключается в особенностях геохимической специализации и парагенетических ассоциаций рудной минерализации – в частности в отсутствии пирротина и пентландита, вместо магнетита обычно присутствует титаномагнетит, как правило, парагенетически связанный с апатитом, широко распространён гипогенный борнит. Руды в целом отличаются явно повышенными содержаниями железа, титана, ванадия и фосфора. Подобные руды довольно широко развиты на Урале, например, они были описаны на севере (от Серовского до Тагильского районов) и юге Урала (Верхне-Уральский район), около 20 месторождений в Баранчинском массиве, на Серебрянском и Золотом камне, в Павдинской даче, в Верхне-Уральском районе [6].

Волковское месторождение – крупный объект, обеспечивающий запасы и добычу меди на многие десятилетия. Объект, известный с 1812 г., изучался многими исследователями, сведения о геологическом строении месторождения, вещественном составе вмещающих пород и руд содержатся в работах [14, 23], петрология описывалась В. И. Маеговым, Д. С. Штейнбергом, М. В. Ерёминой [7, 21]. Выделяется четыре участка – Северо-Западный, Волковский, Промежуточный и Лаврово-Николаевский (рис. 1, б). Освоение месторождения началось с Лаврово-Николаевского карьера, разработка которого проводилась с 1981 по 2010 г. За этот период добыто 24,5 млн т руды. С 2010 г. ведётся эксплуатация 2-й очереди Волковского месторождения на Северо-Западном участке, добыча производится ОГГ ОАО «Святогор». В настоящее время ведутся подготовительные работы по вводу в эксплуатацию 3-й очереди, обеспеченной запасами до 2040 г.

Отработка медных руд проводится в соответствии с тремя промышленными технологическими сортами, выделенными в зависимости от степени окисления меди в руде, а именно – по относительному содержанию двухвалентной меди (Cu^{2+} , далее по тексту «окисленная медь» – термин, используемый на ме-

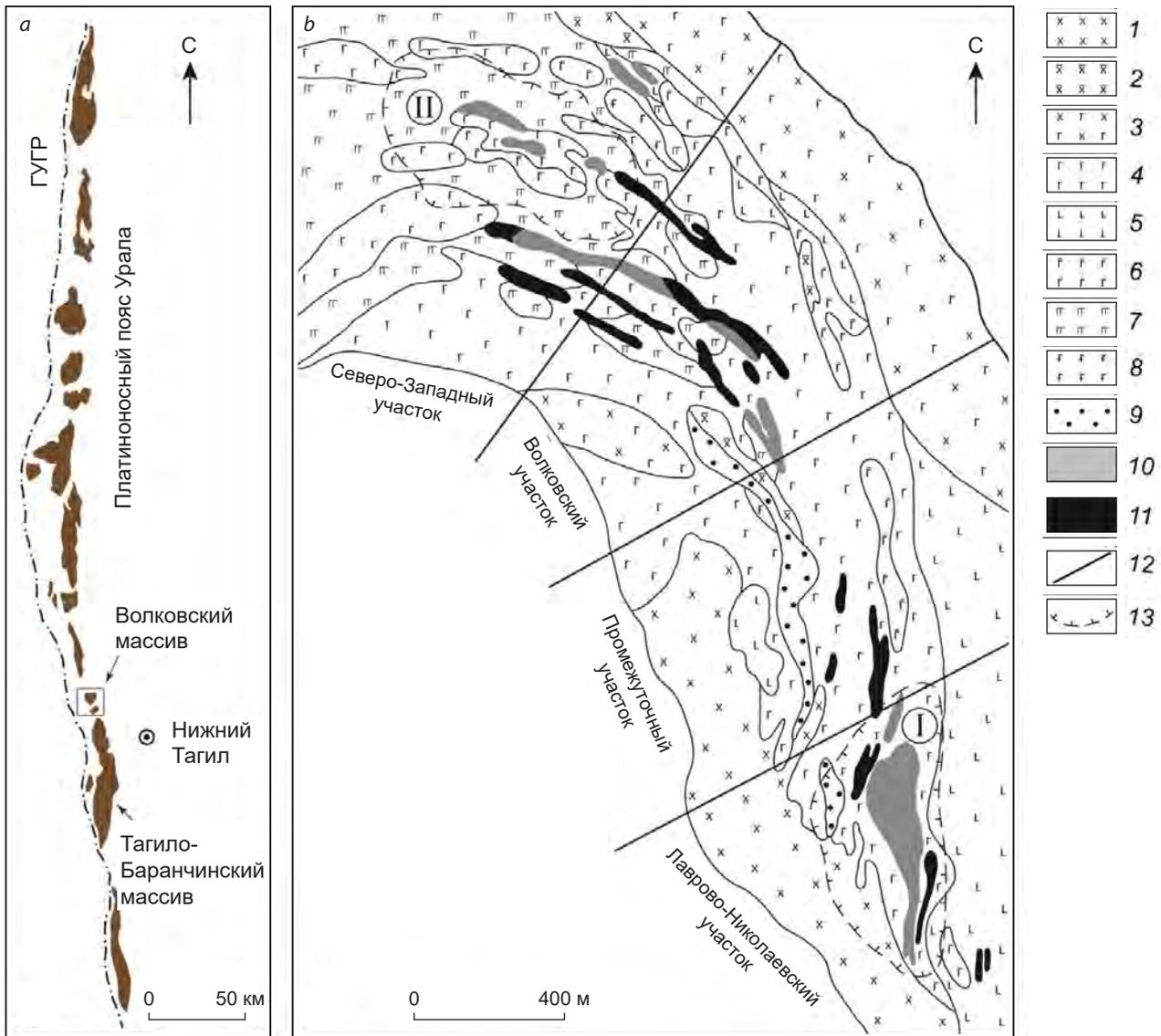


Рис. 1. Геологическая позиция Волковского месторождения: а – положение Волковского массива в Платиноносном поясе Урала; б – схема геологического строения Волковского месторождения, по [20] с дополнениями:
 1 – диориты пироксеновые и роговообманковые; 2 – диориты кварцсодержащие; 3 – габбро-диориты; 4 – габбро пироксеновые габбровой структуры; 5 – габбро пироксеновые офитовой структуры; 6 – габбро биотитсодержащие; 7 – габбро оливинные и оливинсодержащие; 8 – габбро гиперстенсодержащие; 9 – комплекс мелкозернистых пород (ороговикованные габбро и диориты); 10 – ванадиево-железо-медные руды; 11 – ванадийсодержащие железные руды; 12 – границы между участками; 13 – карьеры: I – Лаврово-Николаевский, II – Северо-Западный; ГУГР – Главный Уральский глубинный разлом

Fig. 1. Geological position of the Volkovskoe deposit: а – position of the Volkovskiy massif in the Ural Platinum Belt; б – schematic map showing the geological structure of the Volkovskoe deposit, modified after [20]:

1 – pyroxene and hornblende diorites; 2 – quartz-containing diorites; 3 – gabbro-diorites; 4 – pyroxene gabbro with gabbro structure; 5 – pyroxene gabbro with ophitic structure; 6 – biotite-containing gabbro; 7 – olivine and olivine-containing gabbro; 8 – hypersthene-containing gabbro; 9 – complex of fine-grained rocks (hornified gabbro and diorites); 10 – vanadium-iron-copper ores; 11 – vanadium-containing iron ores; 12 – boundaries between zones; 13 – open pits: I – Lavrovo-Nikolaevskiy, II – Northwestern; ГУГР – Main Uralian Fault



сторождении), которая существенно влияет на показатели обогащения [3, 32]. Содержание Cu^{2+} (отн. %) определяется по формуле: Cu^{2+} (мас. %) \cdot 100 % / $\text{Cu}_{\text{общ}}$ (мас. %). По данному критерию на Волковском месторождении выделяются три технологические сорта медных руд: первичные – менее 20 %, смешанные – от 20 до 50 %, окисленные – с относительным содержанием Cu^{2+} более 50 %. Согласно данным показателям определены границы между сортами и рассчитаны соответствующие балансовые запасы. Обогащение смешанных и первичных медных руд осуществляется флотационным способом на обогатительной фабрике медеплавильного комбината АО «Святогор», окисленные руды в настоящее время складываются отдельно.

Описание минерального состава и структурно-текстурных особенностей руд Волковского месторождения в целом приводилось ранее в работах [14, 21]. Наиболее подробное первичное описание рудообразующих минералов было изложено в публикации С. А. Кашина [6], позднее медносульфидное оруденение изучалось К. Д. Тимоховым [20], данные о минералого-геохимических и структурно-морфологических особенностях рудных ассоциаций месторождения представлены в работах [6, 14, 15], минералого-технологические исследования медных руд месторождения были выполнены В. М. Изоитко [3]. При этом анализ состава и структуры борнита и более детальные минералогические исследования медной минерализации непосредственно по технологическим сортам руд в вышеуказанных работах не проводились, в то время как эти аспекты являются принципиально важными для решения имеющейся проблемы определения границы между первичными и смешанными сортами руд, что влияет на корректность отработки месторождения – добычу и выбор режимов обогащения.

Степень окисленности руд имеет принципиальное значение при оценке и отработке месторождений меди. Она оказывает большое влияние на показатели обогащения и учитывается при оконтуривании технологических сортов балансовых руд, так как от окисленно-

сти руд зависят поверхностные свойства сульфидов меди, определяющие флотационные свойства при обогащении. Окисленные руды на практике определяются по относительному содержанию окисленной меди (Cu^{2+}). Степень окисления медных руд, как правило, связывается с поверхностными процессами гипергенного изменения с образованием типичных медных минералов зоны окисления. Несмотря на сравнительно хорошую технологическую изученность медных руд, что было рассмотрено в работе [3], в настоящее время расположение границ рудоносных горизонтов в рамках выделенных разновидностей промышленных сортов медных руд Волковского месторождения по степени окисления меди остаётся неоднозначным, что оказывает влияние на ход отработки месторождения. Поскольку характер окисления медных руд имеет принципиальное значение для разработки всех сульфидных месторождений меди (магматических медно-никелевых, медно-порфировых, медистых песчаников, медноколчеданных), то изучение первичной и гипергенной окисленности борнитовых руд необходимо для геолого-технологической оценки и других медных месторождений Урала, и в целом для России и мира, включая разные генетические объекты.

Целью исследований на данном этапе является изучение минералогической, петро- и геохимической специфики борнитовых руд на примере сортов медных руд Волковского месторождения с применением комплекса современных методов для выяснения характера медной минерализации в рудах разной степени гипергенной окисленности и причины несоответствия границ балансовых сортов медных руд при использовании в качестве критерия содержания Cu^{2+} .

Геологическая позиция Волковского месторождения и общая характеристика руд. Волковское месторождение комплексных медно-железо-ванадиевых руд расположено в 26 км к северо-западу от г. Нижний Тагил (Средний Урал, Россия) и локализуется в северо-восточной части одноимённого Волковского дифференцированного габбро-диоритового массива

(O_3-D_1), входящего в состав Платиноносного пояса Урала (см. рис. 1).

В пределах месторождения выделяется непрерывный ряд пород [21]: битовнитовое габбро (An_{70-90}), лабрадорское габбро (An_{55-70}), габбро-диориты (An_{45-55}), диориты (An_{30-45}). Перечисленные виды пород располагаются симметрично по обе стороны от центра месторождения. Наиболее основные габбро слагают Северо-Западный, Волковский участки и центр Промежуточного. В направлении на запад и восток они постепенно сменяются лабрадорскими габбро, а затем габбро-диоритами и диоритами. Более всего на месторождении распространены пироксеновые габбро, на Северо-Западном участке преимущественно – оливиновые и оливинсодержащие габбро.

Рудная минерализация в габбро представлена субпараллельными кулисообразно расположенными рудными телами протяжённостью 5 км, характеризующимися постепенно меняющимся простиранием от северо-западного на севере до субмеридионального на юге с углами падения от 75° до $30^\circ-50^\circ$ [14]. Тела не имеют резких границ, их контуры устанавливаются на основе химических анализов проб, бортовые содержания – 14 % железа и 0,4 % меди [15].

Руды месторождения – комплексные, основные полезные компоненты – медь, железо, ванадий, фосфор [17]. Главными носителями меди в рудах являются борнит (75–80 % от общего содержания меди в руде), халькопирит (20–25 %) и в незначительном количестве присутствует халькозин (2–3 %). Выделяются три рудные ассоциации, соответствующие природным типам руд – апатит-титаномагнетитовая (промышленный тип – железо-ванадиевые руды), борнит-халькопиритовая (промышленный тип – медно-железо-ванадиевые руды) и пирит-халькопиритовая минерализация, сформировавшаяся в зонах мелкой трещиноватости, преимущественно развитых только на Лаврово-Николаевском участке и частично наложенных на первые две ассоциации [14].

Собственно апатит-титаномагнетитовое и борнит-халькопиритовое оруденение приуро-

чено к мезо- и меланократовому габбро с такситовой текстурой [6, 20]. Эта разновидность габбро неоднородна как по составу, так и по структуре, характеризующейся неравномерным распределением цветных и бесцветных минералов; встречаются шпирообразные выделения (2–5 см) тонкозернистого сложения с отчётливыми границами.

Состав и петро-геохимические особенности пород месторождения, титаномагнетитовых и медно-титаномагнетитовых руд, а также условия их образования, приведены в статье [15]. Детальное изучение медной минерализации проводилось ещё в конце 40-х годов С. А. Кашиным [6], позднее работы сфокусировались на изучении благороднометалльной минерализации в медных рудах [9, 13] и генетических вопросов рудоносности в целом [1, 10]. Существенно меньше внимания уделялось непосредственно медным рудам и особенно сульфидам меди [3, 12].

Медная минерализация, по данным [12], связывается с тремя морфологическими типами оруденения: 1 – неравномерной халькопирит-борнитовой вкрапленностью в такситовом габбро; 2 – гнездовой и шпировой халькопиритовой, борнитовой и халькопирит-борнитовой минерализацией; 3 – прожилковой и жильной халькопиритовой и борнитовой минерализацией.

Основными носителями меди на Волковском месторождении являются борнит и халькопирит [3, 6, 12]. Причём в отличие от борнита других сульфидных месторождений колчеданного типа борнит уральских базитов имеет преимущественно гипогенную природу. В то же время, генезис медной сульфидной минерализации до сих пор обсуждается, хотя большинство исследователей полагает, что основная часть борнита на Волковском месторождении образовалась из остаточного обогащённого флюидом магматического расплава на эпигенетической стадии магматического процесса [6, 15]. Считается, что некоторая часть борнита сформировалась непосредственно на ранней магматической стадии, образуя единичные идиоморфные кристаллы в апатите и магнетите. Образование халь-



Рис. 2. Точки опробования сортов медных руд (показаны стрелками) в выделенных горизонтах балансовых первичных, смешанных и окисленных руд Северо-Западного карьера Волковского месторождения:

параметры карьера на момент опробования: средняя отметка поверхности – 310 м, глубина карьера – 60 м, высота уступа – 10 м, ширина карьера на поверхности – 450 м, длина карьера на поверхности – 1035 м. На рисунке показана северо-западная часть карьера, северный борт. Границы между сортами руд приняты согласно выделенным балансовым блокам, на рисунке обозначены условно

Fig. 2. Points of sampling of technological grades of copper ores (shown by arrows) in selected horizons of primary, mixed, and oxidized balance ores within the Northwestern open pit of the Volkovskoe deposit:

parameters of the open pit as for the sampling time: average surface mark, 310 m; open pit depth, 60 m; ledge height, 10 m; open pit width on the surface, 450 m; open pit length on the surface, 1035 m. The figure is for the northwestern portion of the open pit, northern side. The boundaries between the technological grades of the ores are accepted according to the allocated balance ore blocks and are figured conditionally

копирита происходит сразу после борнита, но в основном несколько позднее борнитовой минерализации [6].

Разновидности минералов меди и их взаимоотношения в породах месторождения описывались ранее в работе [6]. Были установлены некоторые типоморфные особенности медной минерализации, в частности, избыточное содержание железа в борните, твёрдые растворы борнита с халькопиритом, несколько генераций борнита, халькопирита и халькозина. В области технологической минералогии в целях повышения показателей обогащения медных руд Волковского месторождения в конце 80-х годов были проведены исследования сотрудниками МЕХАНОБР (г. Санкт-Петербург), предложены технологические решения для обогащения руд, выделены разновидности борнита, которые, впрочем, не были детально изучены [3]. Однако,

принимая во внимание слабую обнажённость руд, отсутствие в то время достаточного материала с глубоких горизонтов, а также учитывая несовершенство аналитических методов, вопросы многообразия разновидностей минералов меди и его причины не были до конца изучены.

Методы исследований. В настоящее время на Волковском месторождении из руд добывается только медь, поэтому в нашей работе приводятся результаты изучения медных руд в пределах Северо-Западного участка, относящихся к разным технологическим сортам в рамках выделенных балансовых границ: первичные, смешанные и окисленные (рис. 2). Зона окисленных медных руд выделяется в приповерхностной зоне со средней мощностью 25–30 м, ниже располагаются смешанные руды с мощностью около 20 м, ещё ниже – первичные руды.

Опробование проведено в границах выделенных горизонтов промышленных балансовых блоков первичных, смешанных и окисленных сортов медных руд по данным эксплуатационной разведки в действующем карьере на Северо-Западном участке Волковского месторождения (см. рис. 2). Для исследований было отобрано девять дубликатов проб эксплуатационной разведки промышленных сортов медных руд (по три штуфных образца массой 1 кг, объединённых в одну пробу; всего было изучено девять усреднённых проб – по три для каждого сорта руд). В целях получения представительных аналитических данных по валовым пробам отобранные образцы подвергались усреднению посредством дробления, перемешивания и квартования для анализа валового петрохимического состава, геохимической специализации, содержания общей и окисленной меди (Cu^{2+}). Кроме того, из дополнительно отобранных штуфных образцов с видимыми выделениями борнита были изготовлены двусторонне-полированные прозрачные шлифы (тонкие прозрачные срезы петрографической толщины, полированные с двух сторон, наклеенные на стекло с использованием эпоксидной смолы, без покровного стекла), аншлифы и полированные шайбы для сканирующей электронной микроскопии и микрорентгеноспектральных исследований.

Минераграфические исследования и анализ особенностей минерального состава сортов медных руд произведены в аншлифах и в двусторонне-полированных шлифах с помощью оптических поляризационных микроскопов ПОЛАМ Р-312 и Nikon Eclipse E400 POL в проходящем, отражённом и комбинированном свете.

Валовый элементный состав медных руд определён посредством мокрой химии по аттестованным методикам методом определения порообразующих элементов (силикатный анализ) согласно инструкции № 138-Х научного совета по аналитическим методам [4] и методом определения закисного железа (Инструкция № 50-Х по определению закиси железа объёмным бихроматным методом) [5]. Исследования проводились в лаборатории

химии минерального сырья ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (аналитик О. В. Кокшарова).

Определения окисленной меди (Cu^{2+}) и благородных металлов выполнены в ходе лабораторных испытаний проб эксплуатационной разведки в лаборатории Красноуральского медеплавильного комбината ОАО «Святогор», максимально экспрессно после опробования. Анализ содержания Cu^{2+} произведён с помощью йодометрического анализа методом титрования (ГОСТ 15934.1-91), погрешность определения составила от 3,5 отн. % для максимальных содержаний меди в руде (2,61 вес. %) до 11 отн. % для минимальных (0,38 вес. %). Определение Cu^{2+} проводилось максимально оперативно после измельчения проб. Определение содержаний благородных металлов и $\text{Cu}_{\text{общ}}$ выполнены с помощью атомно-абсорбционной спектрометрии. Степень окисленности медной руды ($\text{Cu}_{\text{ок}}$) оценивалась по относительному содержанию Cu^{2+} по формуле: $\text{Cu}_{\text{ок}} = \text{Cu}^{2+} (\text{мас. \%}) \cdot 100 \% / \text{Cu}_{\text{общ}} (\text{мас. \%})$.

Содержание микроэлементов в сортах медных руд определено методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на спектрометре ICP-MS X Series 2 (ЦКП ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск) по методике, детально описанной в работе [19].

Анализ особенностей элементного состава борнита и сопутствующих сульфидов был охарактеризован при помощи сканирующего электронного микроскопа JSM-6400 Jeol (Япония) с энергодисперсионным спектрометром Link ISIS-200 (аналитик В. Н. Филиппов) и сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 TESCAN (Tescan, Чехия) с энергодисперсионным спектрометром VEGA 3LMN, INCAENERGY 450 (аналитик Е. М. Тропников). Погрешность определения 2σ (мас. %): Fe – 0,16, Cu – 0,39, S – 0,17. В качестве стандартов Cu и Fe использовались чистые металлы Cu и Fe. Для S в качестве стандарта использован FeS_2 . Исследования проводились в ЦКП «Геонаука» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар).

Результаты.

Петро- и геохимическая характеристика сортов медных руд. По данным силикатного анализа в первичных и смешанных рудах до-



ля кремнезёма составляет 26,90–29,56 мас. %, в окисленных рудах – 22,80 мас. %. По химическому составу первичные и смешанные руды достаточно однородны, содержат Al_2O_3 в количестве 8,48–10,03 мас. %. Сумма щелочей ($Na_2O + K_2O$) составляет 0,55–0,79 мас. %. Концентрации CaO и MgO присутствуют в рудах в заметных количествах, CaO достигает 16,62 мас. %, на долю MgO приходится до 6,77 мас. %, в окисленных рудах доля окиси магнезия составляет 5,46 мас. %. Руды чётко различаются по содержанию Fe_2O_3 и TiO_2 : наиболее высокие содержания Fe_2O_3 и TiO_2 установлены в пробах окисленных руд – до 21,29 и 2,95 мас. % соответственно. По содержанию P_2O_5 первичные и смешанные руды мало отличаются (до 5,78 мас. %), в окисленных концентрация окиси фосфора составляет 7,47 мас. %. По содержанию золота и серебра руды практически аналогичны (Au – до 0,2 г/т, Ag до 8,13 г/т). В табл. 1 приведены усреднённые данные по девяти образцам для каждого типа руд.

Количество Cu^{2+} в смешанных рудах в среднем составляет 28,1 отн. %, а в окисленных – 84,8 отн. %. Такой показатель подтверждает, что исследованные пробы окисленных и смешанных руд однозначно соответствуют выделенным сортам медных руд месторождения. На долю окисленной меди в пробах из горизонта балансовых «первичных руд» приходится в среднем 34,4 отн. % Cu^{2+} , что существенно больше по сравнению с установленным требованием < 20 отн. % Cu^{2+} для балансовых первичных руд.

На диаграмме соотношения меди и железа по степени окисления ($Cu^{2+}/Cu_{общ.}$ и Fe_2O_3/FeO) составы разновидностей медных руд отчётливо образуют две обособленные группы (рис. 3). Для первичных и смешанных руд характерно близкое расположение фигуративных точек, тогда как для окисленных руд они существенно дистанцированы. Помимо этого, в окисленных рудах наблюдаются значения Fe_2O_3/FeO в пределах от 1,6 до 1,9, в первичных и смешанных рудах этот показатель составляет 0,8–1,3.

Результаты анализа РЗЭ в разновидностях медных руд представлены в табл. 1 и на

диаграмме (рис. 4), где они нормированы по отношению к средним значениям для примитивной мантии [30]. Разновидности медных руд характеризуются однотипным распределением РЗЭ и имеют общий отрицательный наклон кривой, что свидетельствует об их относительном обогащении лёгкими элементами по сравнению со средними и тяжёлыми ($La/Yb = 9,6–12,6$). По характеру наблюдаемого спектра распределения РЗЭ сорта медных руд в основном схожи, однако окисленные руды заметно отличаются повышенными значениями концентраций редкоземельных элементов. Тренд распределения РЗЭ на спайдерграмме (см. рис. 4) указывает на то, что сорта медных руд относятся к одному комплексу магматических пород, первичные и смешанные руды характеризуются аналогичными условиями образования.

В спектрах распределения нормированных содержаний высокозарядных элементов в разных сортах руд отмечаются явно выраженные минимумы для Zr , Nb , Ta , Hf , наиболее сильно проявленные в окисленных рудах (см. рис. 4). Медные руды обладают повышенными содержаниями Sr , Ba , Th и U (см. табл. 1), соответственно на спектрах распределения нормированных содержаний микроэлементов видны значительные отличия в топологии трендов (см. рис. 4). На спайдерграмме отчётливо фиксируются максимумы Th и U в окисленных рудах, что определяется большей инертностью этих элементов в гипергенных условиях.

Минералого-петрологическая характеристика сортов медных руд. Ниже приводится макро- и микроскопическое описание сортов медных руд в пределах Северо-Западного участка месторождения, позволяющее установить характер преобразования минерального состава руд по мере увеличения степени вторичных изменений.

Первичные руды представлены меланократовой разностью рудоносного габбро с такситовой текстурой. Преобладающая часть габбро имеет неравномерно-среднезернистую интерстициальную структуру с встречающимися крупными кристаллами пироксена (диопсид) (рис. 5, а, б). Часто порода содержит мелкую

Табл. 1. Состав изученных сортов медных руд

Table 1. Composition of the studied technological grades of the copper ores

п/п	Компонент	Сорт медных руд								
		Первичные			Смешанные			Окисленные		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	SiO ₂	22,78	30,16	27,76	32,10	24,86	31,72	33,98	17,54	16,90
2	TiO ₂	2,54	1,92	2,07	1,97	2,12	1,88	1,75	3,35	3,77
3	Al ₂ O ₃	5,23	12,16	8,07	9,97	8,86	11,28	10,05	4,58	4,47
4	Fe ₂ O ₃	19,20	13,83	11,45	12,99	15,47	10,66	12,92	27,28	23,69
5	FeO	14,86	10,47	14,75	11,71	13,02	11,80	8,22	14,44	13,65
6	MnO	0,30	0,24	0,29	0,28	0,26	0,29	0,27	0,36	0,35
7	CaO	16,70	16,47	16,47	14,85	15,54	14,85	16,7	14,85	18,33
8	MgO	6,82	6,57	6,82	7,14	6,89	6,29	6,69	4,89	4,81
9	K ₂ O	0,12	0,12	0,1	0,16	0,05	0,14	0,18	0,05	0,05
10	Na ₂ O	0,31	0,51	0,51	0,76	0,38	0,91	0,9	0,26	0,22
11	P ₂ O ₅	6,58	4,57	6,21	4,29	7,27	4,44	5,06	7,54	9,82
12	ппп	0,67	1,06	1,07	1,10	2,14	2,02	1,28	1,52	0,58
13	Сумма	97,65	98,71	98,78	97,8	97,92	98,29	98,54	99,07	97,63
14	H ₂ O	0,21	0,34	0,23	0,22	0,5	0,22	0,48	0,59	0,34
15	CO ₂	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
16	Cu ²⁺	35,03	47,45	20,99	31,7	28,12	27,48	91,3	78,43	97,67
17	Cu _{общ.}	1,54	0,63	3,21	0,48	1,06	2,01	0,54	2,41	0,99
18	Cu ²⁺ /Cu _{общ.}	0,5	0,9	0,3	0,5	0,4	0,3	10,5	3,6	41,9
19	Au	0,13	0,21	0,21	0,07	0,09	0,15	0,04	0,13	0,10
20	Ag	7,4	4,1	12,9	3,3	5,7	8,2	2,8	8,1	8,8
21	Pd	<0,1	<0,1	>0,3	<0,1	<0,1	>0,3	0,1	0,1	0,1
22	Li	1,23	1,93	1,60	2,18	2,20	2,63	1,61	1,81	1,70
23	Be	0,01	0,09	0,01	0,18	0,13	0,15	0,16	0,01	0,07
24	Sc	31,02	29,43	33,98	33,07	25,88	32,17	48,19	30,05	25,04
25	Cr	3,92	3,06	6,76	2,66	6,00	7,28	4,27	10,18	8,53
26	Co	90,36	74,26	75,19	75,56	88,58	68,72	60,67	103,5	94,01
27	Ni	18,69	16,27	21,16	16,54	19,56	19,42	12,59	30,30	20,54
28	Zn	178,7	133,5	144,6	139,8	165,1	145,8	144,4	215,0	246,9
29	Rb	1,61	1,45	1,75	2,59	0,61	2,59	2,76	0,14	0,80
30	Sr	532	1041	759	804	742	1107	908	415	726
31	Y	25,78	17,92	25,15	18,52	27,95	20,56	22,84	36,11	43,06
32	Zr	9,09	6,39	9,43	9,93	8,21	11,49	8,71	4,36	3,41
33	Nb	0,57	0,35	0,48	0,59	0,52	0,66	0,42	0,21	0,24
34	Mo	0,39	0,35	0,48	0,41	0,32	0,90	0,27	0,30	0,43
35	Cd	0,21	<PO	0,39	0,17	0,17	0,37	0,16	0,26	0,15
36	Sn	0,24	0,23	0,22	0,28	0,30	0,34	0,29	1,27	1,18
37	Sb	0,03	0,05	0,07	0,06	0,05	0,10	0,14	0,13	0,09



Продолжение табл. 1

п/п	Компонент	Сорт медных руд								
		Первичные			Смешанные			Окисленные		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
38	Te	1,62	0,73	2,86	0,48	0,92	2,50	5,28	1,42	0,80
39	Se	13,48	4,48	25,92	2,48	8,45	16,40	<PO	4,59	<PO
40	Cs	0,09	0,06	0,24	0,12	0,08	0,20	0,09	0,09	0,03
41	Ba	24,42	39,2	38,32	55,50	22,25	79,02	58,67	11,80	30,26
42	La	19,11	12,89	17,68	13,61	21,97	14,53	14,65	24,57	34,36
43	Ce	50,05	34,36	47,63	34,93	56,68	37,70	39,04	64,44	89,08
44	Pr	7,98	5,53	7,47	5,51	8,99	6,03	6,28	10,50	13,74
45	Nd	43,85	30,76	41,73	30,15	48,04	32,71	35,26	58,15	75,24
46	Sm	11,78	8,32	11,40	8,20	12,71	8,83	9,88	15,74	19,73
47	Eu	3,17	2,37	3,17	2,29	3,41	2,49	2,76	4,14	5,03
48	Gd	11,14	7,89	10,73	7,53	11,98	8,38	9,20	15,54	18,61
49	Tb	1,33	0,96	1,27	0,93	1,43	1,02	1,12	1,76	2,12
50	Dy	6,42	4,50	6,24	4,56	6,83	4,97	5,47	8,63	10,31
51	Ho	1,10	0,78	1,07	0,78	1,15	0,85	0,96	1,49	1,75
52	Er	2,62	1,85	2,57	1,91	2,83	2,05	2,30	3,53	4,23
53	Tm	0,30	0,21	0,30	0,22	0,30	0,24	0,26	0,39	0,49
54	Yb	1,67	1,18	1,65	1,25	1,76	1,38	1,52	2,24	2,72
55	Lu	0,23	0,17	0,23	0,18	0,25	0,19	0,21	0,29	0,40
56	Hf	0,33	0,24	0,35	0,34	0,30	0,41	0,38	0,20	0,17
57	Ta	0,04	0,05	0,03	0,05	0,05	0,06	0,05	0,01	0,02
58	W	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,05	0,03	0,19	0,20
59	Tl	0,04	0,04	0,04	0,06	0,05	0,05	0,06	2,09	2,00
60	Pb	2,21	0,94	1,94	3,47	3,21	3,66	1,38	4,65	1,73
61	Bi	0,18	0,05	0,17	0,14	0,16	0,27	0,08	0,81	0,16
62	Th	0,54	0,33	0,49	0,45	0,54	0,51	0,38	0,48	0,74
63	U	0,19	0,10	0,17	0,16	0,17	0,18	0,14	0,24	0,39

Примечание. Компоненты 1–18 приведены в мас. %, 19–63 – в г/т; PO – предел обнаружения.

рассеянную вкрапленность титаномагнетита (0,14–0,6 см), иногда сплошные титаномагнетитовые участки. Сульфиды меди в габбро образуют неравномерную вкрапленность, сложенную борнитом, иногда в сростании с халькопиритом и дигенитом. Величина вкрапленников изменяется от долей миллиметра до 0,6 см в поперечнике.

В составе первичной руды преобладает рудная минерализация, представленная титаномагнетитом (30–40 об. %) и сульфидами меди (до 5 об. %). Породообразующие минералы –

пироксен (20–25 об. %), плагиоклаз (15–20 об. %), в единичных зёрнах присутствуют роговая обманка, биотит и оливин. Кроме того, в состав первичной руды входит большое количество апатита (10–15 об. %). Наблюдаются высокая степень вторичных изменений габбро – сосюритизация и серицитизация, а также значительные содержания хлорита, амфибола и эпидота.

Пироксен (диопсид) представлен зёрнами ксеноморфной, реже изометричной формы, размером 0,04–1,4 см, местами содержит вклю-

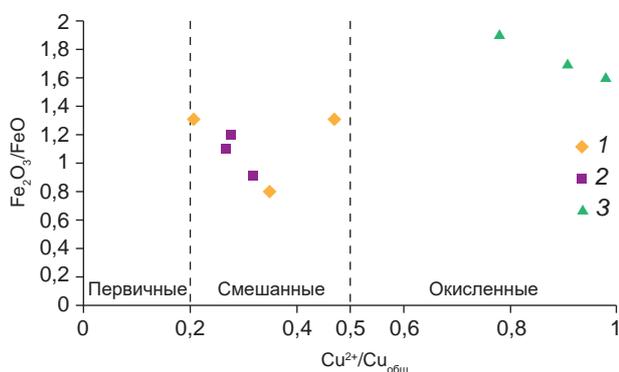


Рис. 3. Соотношение степени окисления меди и железа в промышленных технологических сортах медных руд Северо-Западного участка Волковского месторождения:

пунктиром показаны бортовые показатели по установленным критериям для сортов руд; фигуративные точки показателей опробования: 1 – первичные руды (в границах балансовых запасов), 2 – смешанные, 3 – окисленные

Fig. 3. Ratio of the copper and iron oxidation degree in the industrial technological grades of copper ores of the Northwestern zone of the Volkovskoe deposit:

the dotted line shows the border values for the established criteria for the technological grades of the ores; figurative points of the sampling indicators: 1 – primary ores (within the limits of the balance reserves), 2 – mixed ores, 3 – oxidized ores

чения апатита, единичные таблички плагиоклаза и титаномагнетита различной величины. Последний почти всегда окружён тонкой каймой амфибола. Некоторые зёрна пироксена обладают системой хорошо выраженных трещин. Минерал по краям, по трещинам или неравномерно (пятнами) замещается бледно-зелёным амфиболом, который сохраняет первичную ориентировку пироксена (рис. 6, а). В участках, обогащённых титаномагнетитом, пироксен обладает неровными, местами коррозионными очертаниями, там обычно прослеживаются тонкие каёмки хлорита или амфибола.

Плагиоклаз (битовнит) образует призматические, таблитчатые, реже изометричные зёрна размером от 0,02 до 1,6 см с ясно выраженным полисинтетическим двойникованием или без двойников (см. рис. 6, б). Зёрна, распола-

гающиеся вблизи титаномагнетита, часто приобретают неровные, местами корродированные очертания. Включения в плагиоклазе в основном представлены апатитом, реже титаномагнетитом и борнитом различной величины. Вокруг последнего почти всегда наблюдается кайма хлорита, повторяющая его очертания, и сосюрита с точечными выделениями сульфидов меди на границе с плагиоклазом. Местами плагиоклаз изменён до грязно-бурой полупрозрачной массы в результате развития процессов сосюритизации или серицитизации.

Апатит присутствует постоянно в заметных количествах, образуя удлинённо-призматические зёрна длиной 0,08–0,4 см, в том числе идиоморфные кристаллы размером 0,02–0,2 см, с характерными шестиугольными поперечными сечениями. Иногда апатит представлен ксеноморфными зёрнами. Кристаллы в разной степени обладают мелкой незакономерной трещиноватостью. Значительная часть апатита локализована в выделениях титаномагнетита в виде плотных скоплений. Реже апатит встречается вокруг титаномагнетита и в промежутках между породообразующими минералами.

Титаномагнетит преимущественно выделяется в виде ксеноморфных зёрен с преобладающим размером 0,2–0,5 см, выполняет промежутки между породообразующими минералами. При значительных его концентрациях появляется сидеронитовая структура, местами образуются сплошные титаномагнетитовые массы. В участках развития породообразующих минералов титаномагнетит изредка окружён каймой биотита или достаточно крупными зернистыми массами хлорита. Характерной чертой титаномагнетита является наличие решётчатых структур, образовавшихся в результате распада твёрдого раствора на магнетит и ильменит. Ильменит выделяется в титаномагнетите в виде тонких пластинок, располагающихся по кристаллографическим направлениям, иногда встречается в виде изометричных зёрен в интерстициях между титаномагнетитом и силикатной компонентой руды. В структурах распада изменению подвергаются только участки магнетита, заме-

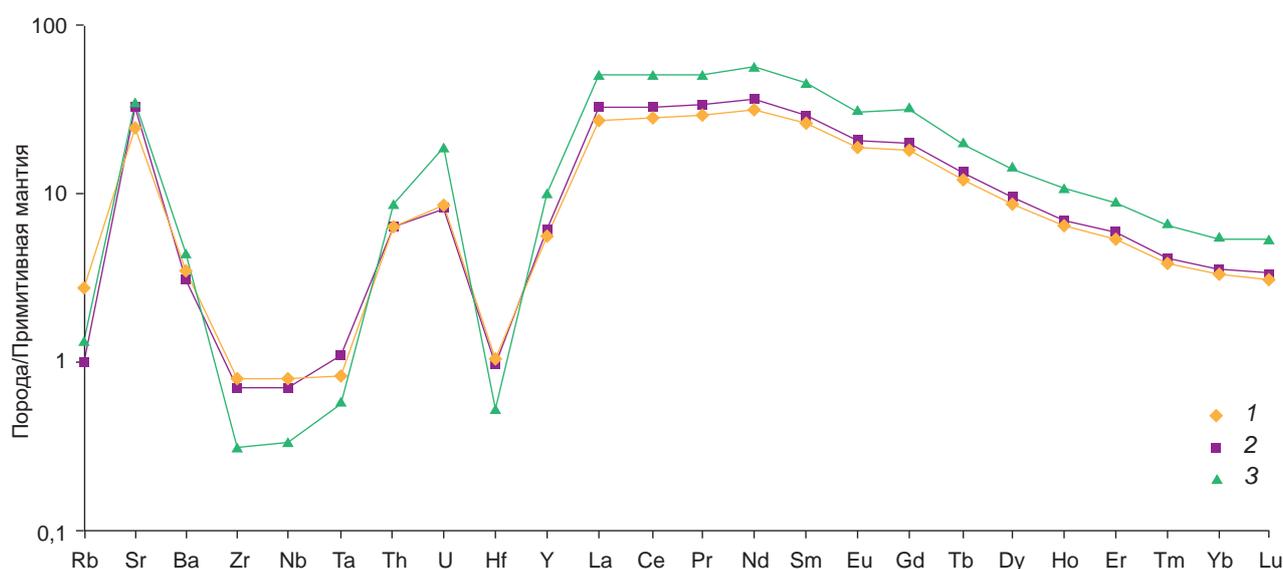


Рис. 4. Распределение редких и редкоземельных элементов в промышленных технологических сортах медных руд Северо-Западного участка Волковскогo месторождения, нормализованных на примитивную мантию, усреднённые значения [30]:

1 – первичные руды; 2 – смешанные; 3 – окисленные

Fig. 4. Primordial mantle normalized rare and rare-earth elements distribution in the industrial technological grades of copper ores of the Northwestern zone of the Volkovskoe deposit, the averaged values [30]:

1 – primary ores; 2 – mixed ores; 3 – oxidized ores

щение обычно происходит хлоритом, борнитом, реже амфиболом, оставляя пластинки ильменита нетронутыми.

Сульфиды меди – борнит и халькопирит – встречаются в относительно небольших количествах. Борнит является преобладающим среди сульфидов меди, преимущественно образуя ксеноморфные выделения размерами 0,08–0,5 см в промежутках между зёрнами породообразующих минералов и в местах, обогащённых титаномагнетитом и апатитом (рис. 7, а). Кроме того, борнит встречается в виде прожилковых выделений в ассоциации с дигенитом, наблюдается в виде хорошо образованных кристаллов и округлых зёрен, включённых в титаномагнетит, гораздо реже в апатит. Борнит почти повсеместно замещается хлоритом, он выполняет каймы вокруг ксеноморфных и прожилковых выделений, располагающихся между породообразующими минералами; включения борнита в зёрнах титаномагнетита и апатита также в разной

степени подвергаются хлоритизации. Характерной особенностью борнита является решётчатая структура распада твёрдого раствора (см. рис. 7, б).

Продукты распада широко распространены как в ксеноморфных зёрнах, так и в идиоморфных кристаллах борнита. Халькопирит образует обильные «пламенеvidные» выделения, пластинки в борните, а также зернистые и графические сростания с ним. Помимо этого, халькопирит формирует секущие прожилки в ассоциации с борнитом, а также встречается в форме неправильных выделений в промежутках между зёрнами породообразующих минералов. Так же, как и борнит, халькопирит обычно связан с хлоритизированными участками. В тесной ассоциации с борнитом находится дигенит, он развивается по периферии борнитовых зёрен, вдоль его трещинок и вокруг пластинчатых выделений халькопирита в структурах распада. Нередко он наблюдается в виде графических структур

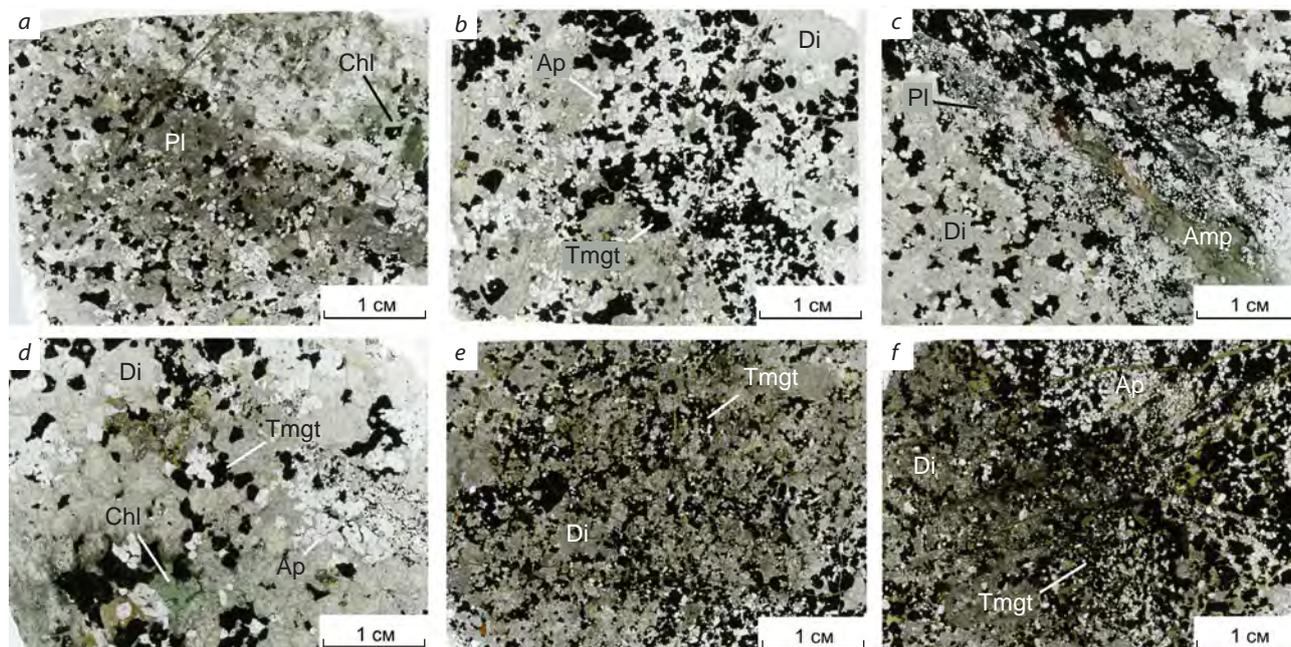


Рис. 5. Структурные особенности сортов медных руд (*a, b* – первичные; *c, d* – смешанные; *e, f* – окисленные). Изображения шлифов в проходящем неполяризованном свете (сканированные):

Di – диопсид; Pl – плагиоклаз; Chl – хлорит; Amp – амфибол; Ap – апатит; Tmgt – титаномагнетит

Fig. 5. Structural features of the technological grades of the copper ores (*a, b* – primary ores; *c, d* – mixed ores; *e, f* – oxidized ores). Microphotos of thin sections in transmitted unpolarized light (scanned):

Di – Diopside; Pl – plagioclase; Chl – chlorite; Amp – amphibole; Ap – apatite; Tmgt – titanomagnetite

в борните и зернистых сростаний с борнитом. Дигенит, как правило, замещается ковеллином, границы между минералами характеризуются неровными корродированными участками.

Смешанные руды. По структурно-текстурным признакам смешанные руды являются рудоносной разновидностью меланократового габбро такситовой текстуры. Вещающие рудную минерализацию габбро представляют собой в основном неравномерно-среднезернистую породу интерстициальной структуры, в которой наблюдаются более крупные кристаллы пироксена (см. рис. 5, *c, d*). Порода содержит повышенное количество мелких рассеянных вкраплений титаномагнетита (0,13–0,8 см), изредка сплошные титаномагнетитовые участки. Сульфиды меди, представленные борнитом и халькопиритом, редко их сростаниями, как правило, образуют в габбро

неравномерную вкрапленность с размерами зёрен от долей миллиметра до 0,8 см.

В целом минеральный состав и структурно-текстурные особенности смешанных руд на исследованном горизонте месторождения совершенно аналогичны описанным выше первичным рудам, с той разницей, что в рудах данного типа дополнительно отмечается кальцит и гидроокислы железа. Смешанная руда состоит в основном из пироксена (20–30 об. %), плагиоклаза (15–20 об. %), апатита (10–15 об. %), титаномагнетита (35–45 об. %) и сульфидов меди (до 5 об. %). В незначительных количествах присутствуют роговая обманка, биотит и оливин. Вторичные минералы представлены сосюритом и серицитом, в заметных количествах наблюдаются также хлорит и амфибол.

Сульфиды меди в смешанных рудах встречаются нечасто. Наиболее распространён бор-

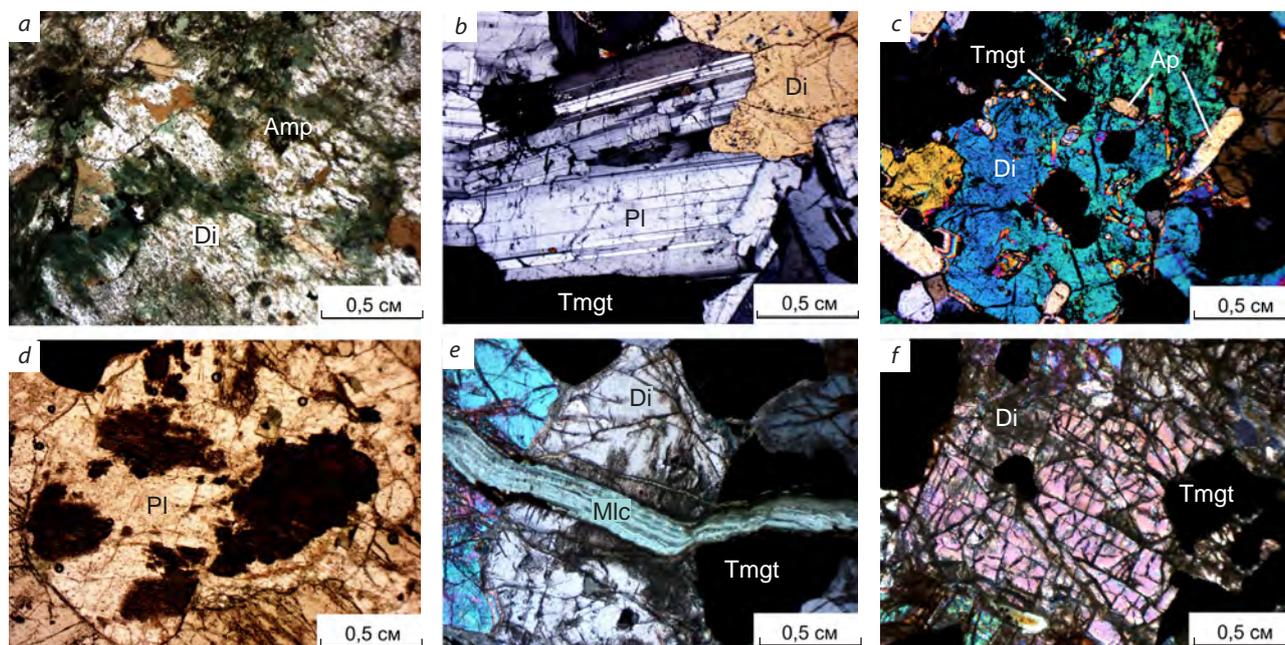


Рис. 6. Минералого-петрографические особенности сортов медных руд:

первичные руды: *a* – пироксен с участками развития амфибола, *b* – призматические зёрна плагиоклаза с полисинтетическим двойникованием; *смешанные руды:* *c* – пироксен с включениями апатита и титаномagnetита, *d* – плагиоклаз с участками развития вторичных минералов; *окисленные руды:* *e* – трещина, выполненная малахитом, *f* – пироксен с системой незакономерных трещин. Прозрачный шлиф: *b, c, e, f* – с анализатором, *a, d* – без анализатора; Mlc – малахит; остальные сокращения см. на рис. 5

Fig. 6. Mineralogical and petrographic features of the technological grades of the copper ores:

primary ores: *a* – pyroxene with zones of amphibole development, *b* – prismatic grains of plagioclase with polysynthetic twinning; *mixed ores:* *c* – pyroxene with inclusions of apatite and titanomagnetite, *d* – plagioclase with zones of development of secondary minerals; *oxidized ores:* *e* – crack filled with malachite, *f* – pyroxene with a system of irregular cracks. Thin section: *b, c, e, f* – with analyzer, *a, d* – without analyzer. Mlc – malachite; for other abbreviations, see Fig. 5

нит, который отмечается в виде ксеноморфных образований размером 0,06–0,4 см, местами в ассоциации с халькопиритом, формирующим структуры распада твёрдых растворов в борните. Выделения борнита располагаются в промежутках между зёрнами породообразующих минералов и в участках, обогащённых титаномagnetитом и апатитом (см. рис. 7, *c*), редко борнит в виде идиоморфных кристаллов или округлых зёрен входит в титаномagnetит. Замещается борнит обычно хлоритом, образующим каймы вокруг ксеноморфных выделений, расположенных между породообразующими минералами, а также хлорит замещает борнитовые включения в титаномagnetите. Халькопирит присутствует в виде ксеноморф-

ных агрегатов, тонких секущих прожилков и образует зернистые, решётчатые сростания с борнитом (см. рис. 7, *d*). В тесном сростании с борнитом встречается дигенит, развивающийся по трещинкам, вдоль халькопиритовых пластинок в структурах распада, а также образующий зернистые сростания и каймы обрастания по периферии борнитовых зёрен. Дигенит, в свою очередь, замещается ковеллином, при этом границы между минералами имеют неровные корродированные очертания.

Согласно результатам микрозондовых исследований (табл. 2) в борните первичных и смешанных руд, в отличие от стехиометрического (Cu_5FeS_4 , содержание компонентов: Cu – 63,33, Fe – 11,12, S – 25,55 мас. %), заметен из-

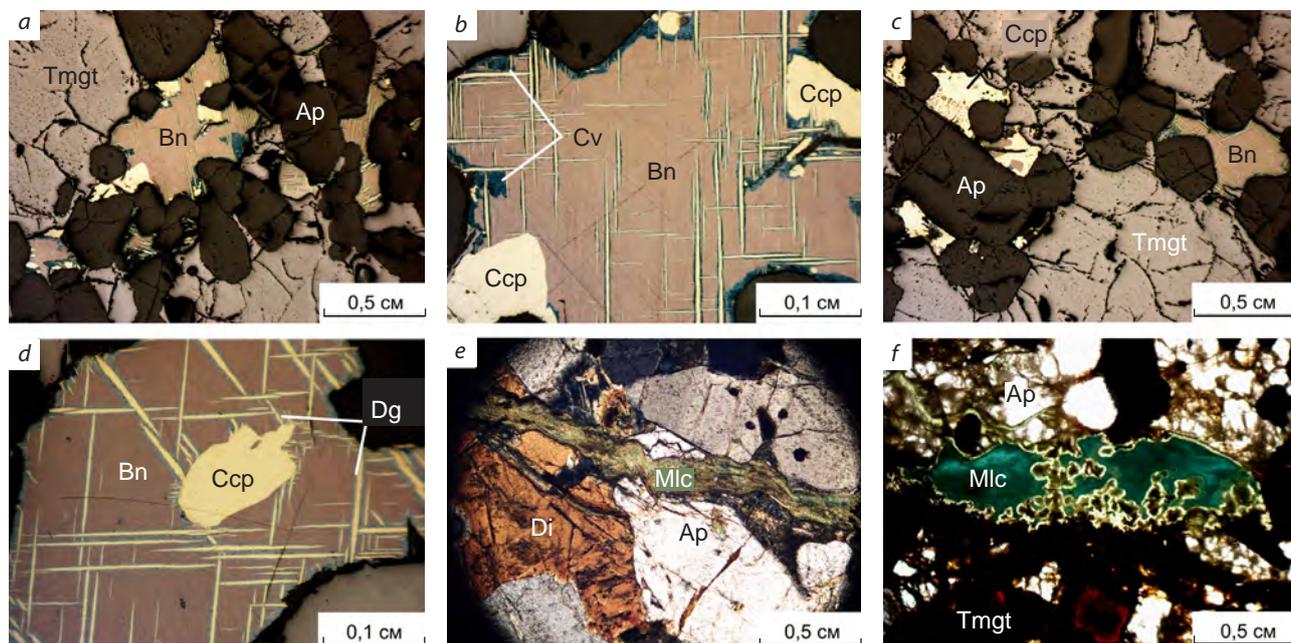


Рис. 7. Минералы меди в промышленных сортах медных руд:

первичные руды: *a* – ксеноморфные выделения борнита в участках, обогащённых титаномагнетитом и апатитом, *b* – структуры распада сульфидов меди в борните, по периферии борнитового выделения наблюдается развитие ковеллина; *смешанные руды:* *c* – выделения борнита и халькопирита со структурой распада твёрдого раствора в промежутках между титаномагнетитом и апатитом, *d* – зернистые срастания и решётчатые структуры распада халькопирита в борните, халькозин развивается вдоль пластинок халькопирита (отражённый свет, без анализатора); *окисленные руды:* *e* – трещина, выполненная малахитом, в участках развития апатита и пироксена, *f* – развитие малахита по сульфидам (прозрачный шлиф, с анализатором); Bn – борнит; Ccp – халькопирит; Dg – дигенит; Cv – ковеллин; остальные сокращения см. на рис. 5, 6

Fig. 7. Copper minerals in the industrial technological grades of the copper ores:

primary ores: *a* – xenomorphic bornite segregations in zones enriched in titanomagnetite and apatite, *b* – decay structures of copper sulfides in bornite; covellite is observed to develop along the bornite segregation periphery; *mixed ores:* *c* – bornite and chalcopyrite segregations with a solid solution decay structure in the interstitial space between titanomagnetite and apatite, *d* – granular intergrowths and lattice decay structures of chalcopyrite in bornite; chalcocite is developed along the chalcopyrite lamellae (reflected light, without analyzer); *oxidized ores:* *e* – crack filled with malachite in zones of the apatite and pyroxene development, *f* – malachite developed after sulfides (thin section, with analyzer); Bn – bornite; Ccp – chalcopyrite; Dg – digenite; Cv – covellite; for other abbreviations, see Figs. 5, 6

быток серы и железа при стабильно заниженном содержании меди (дефицит в первичных и смешанных рудах в среднем 1,76–1,83 мас. %, соответственно).

Обнаружено, что халькопирит в разных сортах медных руд по составу практически соответствует стехиометрическому, отвечая формуле CuFeS_2 (табл. 3). Выявляется некоторое повышение роли железа и серы при незначительном дефиците меди (в первичных рудах в

среднем – 1,25, в смешанных – 1,17, в окисленных – 1,12 мас. %).

Окисленные руды. Вмещающей породой для окисленных руд является меланократовое габбро такситовой текстуры, которое в зоне коры выветривания дезинтегрируется и характеризуется присутствием карбонатов меди и гидроокислов железа в виде корочек, примазок и натёков на плоскостях трещин в габбро (см. рис. 5, *e, f*). Титаномагнетит образует



Табл. 2. Представительные составы борнита из трёх изученных сортов медных руд

Table 2. Representative compositions of bornite from the three studied technological grades of the copper ores

Сорт медных руд	Химический состав борнита, мас. %				Атомные соотношения компонентов		Эмпирическая формула
	Cu	Fe	S	Сумма	Cu/Fe	$\Sigma\text{Me/S}$	
Первичные	61,50	11,36	26,20	99,07	4,76	1,43	$\text{Cu}_{4,74}\text{Fe}_{0,99}\text{S}_4$
	61,50	11,36	26,12	98,98	4,76	1,44	$\text{Cu}_{4,75}\text{Fe}_{1,00}\text{S}_4$
	61,89	11,50	26,21	99,60	4,73	1,44	$\text{Cu}_{4,76}\text{Fe}_{1,00}\text{S}_4$
	61,17	11,33	26,36	98,86	4,75	1,42	$\text{Cu}_{4,68}\text{Fe}_{0,98}\text{S}_4$
	61,79	11,43	26,04	99,27	4,75	1,45	$\text{Cu}_{4,78}\text{Fe}_{1,01}\text{S}_4$
Смешанные	61,69	11,74	26,01	99,44	4,62	1,45	$\text{Cu}_{4,78}\text{Fe}_{1,03}\text{S}_4$
	61,40	11,41	26,03	98,97	4,73	1,44	$\text{Cu}_{4,76}\text{Fe}_{1,00}\text{S}_4$
	61,59	11,39	25,99	98,97	4,75	1,45	$\text{Cu}_{4,78}\text{Fe}_{1,00}\text{S}_4$
	61,64	11,35	26,10	99,09	4,77	1,44	$\text{Cu}_{4,76}\text{Fe}_{0,99}\text{S}_4$
	61,37	11,97	26,22	99,55	4,51	1,44	$\text{Cu}_{4,73}\text{Fe}_{1,04}\text{S}_4$
Окисленные	59,88	12,74	26,73	99,34	4,14	1,40	$\text{Cu}_{4,52}\text{Fe}_{1,09}\text{S}_4$
	59,47	12,54	26,42	98,43	4,17	1,41	$\text{Cu}_{4,54}\text{Fe}_{1,09}\text{S}_4$
	60,04	12,76	26,83	99,63	4,13	1,41	$\text{Cu}_{4,51}\text{Fe}_{1,09}\text{S}_4$
	60,29	12,30	26,64	99,24	4,31	1,41	$\text{Cu}_{4,56}\text{Fe}_{1,06}\text{S}_4$
	60,67	12,44	26,69	99,93	4,28	1,42	$\text{Cu}_{4,59}\text{Fe}_{1,07}\text{S}_4$

Табл. 3. Представительные составы халькопирита из трёх изученных сортов медных руд

Table 3. Representative compositions of chalcopyrite from the three studied technological grades of the copper ores

Сорт медных руд	Химический состав халькопирита, мас. %				Атомные соотношения компонентов		Эмпирическая формула
	Cu	Fe	S	Сумма	Cu/Fe	$\Sigma\text{Me/S}$	
Первичные	34,10	30,55	35,30	99,94	0,98	0,98	$\text{Cu}_{0,97}\text{Fe}_{0,99}\text{S}_4$
	33,97	30,48	35,36	99,81	0,98	0,98	$\text{Cu}_{0,97}\text{Fe}_{0,99}\text{S}_4$
	33,43	30,91	35,25	99,59	0,95	0,98	$\text{Cu}_{0,96}\text{Fe}_{1,00}\text{S}_4$
	33,52	30,42	34,89	98,83	0,97	0,98	$\text{Cu}_{0,97}\text{Fe}_{1,00}\text{S}_4$
Смешанные	34,27	30,82	35,25	100,34	0,97	0,99	$\text{Cu}_{0,98}\text{Fe}_{1,00}\text{S}_4$
	33,66	30,63	35,60	99,89	0,96	0,97	$\text{Cu}_{0,95}\text{Fe}_{0,98}\text{S}_4$
	33,76	30,96	35,03	99,75	0,96	0,99	$\text{Cu}_{0,97}\text{Fe}_{1,01}\text{S}_4$
	33,64	30,71	35,30	99,65	0,96	0,98	$\text{Cu}_{0,96}\text{Fe}_{0,99}\text{S}_4$
Окисленные	33,79	30,45	35,22	99,46	0,97	0,98	$\text{Cu}_{0,97}\text{Fe}_{0,99}\text{S}_4$
	33,63	30,69	35,22	99,54	0,96	0,98	$\text{Cu}_{0,96}\text{Fe}_{1,00}\text{S}_4$
	33,88	30,37	35,10	99,35	0,98	0,98	$\text{Cu}_{0,97}\text{Fe}_{0,99}\text{S}_4$
	34,20	30,73	35,23	100,16	0,98	0,99	$\text{Cu}_{0,98}\text{Fe}_{1,00}\text{S}_4$

мелкую рассеянную вкрапленность в габбро, сульфиды меди встречаются крайне редко.

Минеральный состав окисленных руд представлен пороодообразующими минералами, основными из которых являются пироксен (30–35 об. %) и плагиоклаз (10–15 об. %). Биотит и роговая обманка единичны. Из других минералов повышенные содержания имеют титаномагнетит (35–40 об. %) и апатит (10–15 об. %). В виде единичных знаков отмечаются сульфиды меди – борнит и халькопирит. Окисленные руды отличаются интенсивным развитием гидроокислов железа и карбонатов меди, представленных чаще всего малахитом, гораздо реже азуритом (10–15 об. %). Под микроскопом видно, что гидроокислы железа и малахит часто развиваются в виде прожилков (см. рис. 6, *e*; рис. 7, *e*). Наряду с ними в заметных количествах наблюдаются соссюрит, серицит, кальцит, хлорит и амфибол.

Пироксен (диопсид) представлен зёрнами неправильной или изометричной формы с размерами 0,07–1,6 см; нередко содержит неравномерно распределённые точечные выделения зёрен титаномагнетита и апатита различной величины. Пироксен редко сохраняется неизменённым, местами он бурый, непрозрачный, характеризуется системой незакономерных трещин, которые обычно заполнены выделениями гидроокислов железа (см. рис. 6, *f*). Кроме этого, пироксен замещается бледно-зелёным амфиболом, замещение чаще идёт с периферии зёрен, наблюдаются также реликтовые остатки пироксена в амфиболе. В участках развития титаномагнетита пироксен обладает неровными, иногда коррозионными очертаниями, где часто прослеживаются каймы амфибола, хлорита или выделения гидроокислов железа.

Плагиоклаз (битовнит) образует замутнённые призматические, таблитчатые или изометричные зёрна с размерами 0,06–1,4 см, полисинтетически сдвойникованные или без двойников. Плагиоклаз, располагающийся по краям ксеноморфных выделений титаномагнетита, часто характеризуется неровными, иногда коррозионными очертаниями, сис-

темой незакономерных мелких трещин, местами заполненных выделениями гидроокислов железа. Включения в плагиоклазе представлены зёрнами титаномагнетита и апатита различной величины, изредка в нём можно наблюдать мелкую сыпь рудного минерала. Соссюритизация плагиоклаза обнаруживается повсеместно, она развивается мелкими обособленными участками, замещает плагиоклаз полностью или его центральные части при совершенно незатронутой периферии. Довольно часто наблюдается серицитизация плагиоклазов, непосредственно захватывающая участки между соссюритом.

Апатит присутствует постоянно в разных количествах – в виде идиоморфных (0,02–0,34 см) и удлинённо-призматических кристаллов длиной 0,04–0,5 см, встречаются зёрна ксеноморфных очертаний. Апатит приурочен к тёмноцветным минералам, особенно к титаномагнетиту, причём кристаллы окружают титаномагнетит или встречаются как включения в нём. Почти постоянно в кристаллах апатита обнаруживается тонкая незакономерная трещиноватость, заполненная выделениями гидроокислов железа.

Титаномагнетит в зоне окисления нередко замещается гидроокислами железа, которые развиваются по периферии, по незакономерным трещинам, а иногда заполняют интерстиции между титаномагнетитом и пороодообразующими минералами. Изредка титаномагнетит окружён каймой биотита, тонкими оторочками хлорита или их зернистыми агрегатами. При значительных концентрациях титаномагнетит образует сидеронитовую структуру, местами переходящую в сплошные титаномагнетитовые массы. Преобладающий размер рудного минерала составляет 0,2–0,6 см. Некоторые зёрна титаномагнетита представлены решётчатыми структурами распада твёрдого раствора на магнетит и ильменит, в которых ильменит выделяется в виде тонких пластинок.

Сульфиды меди диагностируются в ничтожных количествах, они представлены ксеноморфными выделениями размером 0,02–0,14 см. В сульфидах меди часто обнаружи-



ваются выделения малахита и гидроокислов железа, которые обособляются по мелким трещинам в виде каёмок и образуют примазки на поверхности (см. рис. 7, f). В окисленных рудах содержание меди в борните значительно уменьшается по сравнению с первичными и смешанными рудами – до её дефицита (3,26 мас. % – среднее по пяти измерениям), а содержание железа и серы выше стехиометрического – завышение в среднем составляет почти 1,43 и 1,11 мас. % соответственно (см. табл. 2).

Обсуждение. Выделенные на Северо-Западном участке Волковского месторождения по степени окисления меди в руде сорта медных руд представлены меланократовой разностью габбро такситовой текстуры с разной степенью проявления элементов коррозионной структуры и вторичных процессов. Хотя вторичные изменения выражены во всех сортах медных руд, характер преобразования минералов, в том числе медных, наиболее заметно прослеживается в оконтуренных окисленных рудах. При этом минеральный состав и структурно-текстурные характеристики первичных и смешанных руд указывают на их сходство.

Содержание благородных металлов (Au, Ag, Pd) в разных сортах руд находится на сопоставимом уровне и составляет в среднем Au – 0,12, Ag – 6,8, Pd – < 0,1 г/т. Нормированные концентрации редкоземельных элементов (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) показывают, что первичные и смешанные руды на исследованных горизонтах схожи по микрокомпонентному составу, что указывает на единый источник вещества и аналогичный характер условий их образования. В то же время окисленные руды заметно отличаются повышенными концентрациями редких земель, а также Th и U.

Медная минерализация в первичных и смешанных рудах представлена преимущественно борнитом и халькопиритом. Установлено, что стехиометрический состав и формы выделения борнита в первичных и смешанных рудах практически не различаются. При этом следует особо отметить, что содержа-

ние окисленной меди (Cu^{2+}) в первичных рудах (в среднем 34 отн. %) существенно выше предусмотренного балансового критерия (< 20 отн. %).

В окисленных рудах на Северо-Западном участке медь преимущественно находится в карбонатной форме – в виде малахита; борнит – в виде редких единичных знаков, в основном в качестве реликтовых образований при замещении вторичными минералами меди. Кроме того, наблюдается большое отличие реликтового борнита в окисленных рудах, связанное с существенным дефицитом меди. Окисленные руды по балансу меди в минералах-носителях и содержанию окисленной меди (> 50 отн. %) содержат в среднем 84 отн. % Cu^{2+} , что полностью отвечает балансовой окисленной руде.

Двухвалентная медь однозначно содержится в малахите и в ковеллине, может также в некоторой степени присутствовать в дигените. Что же касается валентности меди и железа в борните и халькопирите, то этот вопрос уже давно является дискуссионным. В связи с этим особый интерес вызывает специфика главных медных минералов в разных типах руд, в особенности борнита, который имеет разное соотношение содержаний меди и железа (см. табл. 2). Соотношение атомов Cu/Fe в борните первичных и смешанных руд мало различается и в среднем составляет 4,75 и 4,67 соответственно, а в окисленных рудах оно падает до 4,2 по сравнению со стехиометрическим соотношением 5,0. Следует отметить, что в борните исследованных сортов медных руд Волковского месторождения в целом наблюдается дефицит суммы металлов по отношению к сере относительно стехиометрического (1,5) – в окисленных рудах это соотношение составляет 1,4, в то время как в первичных и смешанных рудах в среднем – 1,43 и 1,44 соответственно.

В борните Волковского месторождения ранее отмечалось лишь слегка повышенное содержание железа – $\text{Cu}_5\text{Fe}_{1,1}\text{S}_4$, упоминалось также о редко встречающемся оранжевом борните, для которого не удалось установить состав [3, 6]. В работе [16] для борнита указыва-

лось некоторое превышение количества серы относительно стехиометрического. Однако генетического и технологического значения искажённому соотношению элементов в борните не придавалось, и более детальных исследований его выделенных разновидностей (фиолетового и оранжевого [6]) не проводилось, за исключением фрагментарных работ [22], где указывалось на существенный дефицит меди в волковском борните, достигающем 0,24–0,35 формульных единиц.

В то же время в литературе известно о высокожелезистом борните с существенным дефицитом меди [2, 18]. Подобный борнит получил название «оранжевый» или «х-борнит» и был отнесён к низкотемпературной кубической модификации, являющейся стабильной при температуре < 75 °С [2]. На основе анализа первичных, метаморфизованных, гипергенно-изменённых руд медистых песчаников, сланцев и гидротермальных объектов (в том числе Мансфельд, Джеккаган, Удокан, Гравийское, Сухарихинское, Рейнбоу и др.) считается, что нестехиометрические сульфиды меди и «х-борнит» являются признаками экзогенных руд, в том числе зон вторичного сульфидного обогащения и окисления [2].

Что же касается борнита Волковского месторождения, то он относится к гипогенному [6, 12, 16], образовавшемуся из остаточных магматических флюидсодержащих расплавов. Это вполне согласуется с экспериментальными работами в системе Cu–Fe–S, убедительно показавшими, что такой борнит устойчив при высокой температуре [38]. При этом, если для стехиометрического борнита валентность минералообразующих элементов можно считать на данный момент установленной (медь в нём является одновалентной [34]), то для «х-борнита» вопрос о степени окисления меди остаётся нерешённым.

При этом состав халькопирита, второго по распространённости сульфида меди Волковского месторождения, остаётся практически постоянным во всех сортах руд. Атомные отношения Cu/Fe составляют в среднем 0,97, отношение $\Sigma\text{Me}/\text{S}$ в среднем 0,98, при стехи-

ометрическом соотношении равном единице (см. табл. 3).

Халькопирит, исходя из различных данных, характеризуется экспериментальной формулой $\text{Cu}_{1,00}\text{Fe}_{1,04}\text{S}_{2,01}$ [33], $\text{Cu}_{1,01}\text{Fe}_{1,02}\text{S}_{2,00}$ [28], $\text{Cu}_{0,98}\text{Fe}_{0,98}\text{S}_{2,00}$ [18], что показывает слабое отклонение от стехиометрического состава. Принято считать, что халькопирит представлен следующими валентными состояниями элементов $\text{Cu}^+\text{Fe}^{3+}\text{S}^{2-}$ [26, 29], однако в других работах, на основании рентгеновской абсорбционной спектроскопии (XAS) утверждается, что медь и железо в халькопирите являются двухвалентными – $\text{Cu}^{2+}\text{Fe}^{2+}\text{S}_2$ [31, 36].

Борнит, как и халькопирит, относится к высокомедистым минералам системы Cu–Fe–S. Выявление закономерностей распространения этих минералов в различных типах руд показало, что высокомедистые минералы не устойчивы в экзогенной обстановке, так как присутствие небольшого количества кислорода в рудообразующей системе приводит к их окислению [2, 27]. Можно предположить, что отклонение состава сульфидов меди от стехиометрии обусловлено частичным вхождением в кристаллическую структуру волковского борнита и халькопирита Cu^{2+} (окисленной) меди.

Таким образом, содержание окисленной меди может определяться не только вторичными изменениями, наблюдаемыми в окисленных рудах, но возможностью вхождения Cu^{2+} в сульфиды меди первичных руд. Это может вносить существенный вклад в используемый критерий разделения технологических сортов медных руд, искажая тем самым реальную картину степени гипергенного окисления руд. Проведённые исследования поднимают важную проблему недоизученности борнита и халькопирита как в рудах Волковского месторождения, так и в медных сульфидных рудах в целом.

Закключение. Проведённые нами исследования показали, что специфика медных руд Волковского месторождения в рамках принятых границ балансовых сортов определяется сходством вещественного состава первичных и смешанных руд. «Первичные» руды на ис-



следованных горизонтах в реальности относятся к смешанным рудам не только по содержанию окисленной меди Cu^{2+} , но и по всему комплексу описанных в работе характеристик. В связи с этим, при использовании содержания Cu^{2+} в качестве критерия определения сортов балансовых медных руд необходимо смещение границы между первичными и смешанными рудами Северо-Западного участка Волковского месторождения на более глубокие горизонты.

Установлено, что смешанные и «первичные» руды на исследованных горизонтах в целом не проявляют существенных признаков вторичных процессов, характерных для гипергенных изменений, кроме относительно повышенного содержания Cu^{2+} . Следовательно, высокое содержание окисленной меди в «первичной» руде может быть связано с особенностями первичного формирования руд. В связи с этим в перспективе целесообразно провести более детальное изучение природных типов медных руд, выяснить баланс распределения Cu^{2+} и уточнить корректность использования содержания окисленной меди в качестве критерия выделения сортов руд при дальнейшей отработке Волковского месторождения. Для выяснения причины высокого – для «первичных» руд относительного содержания окисленной меди, достигающего 34,5 мас. %, необходимы более детальные исследования типоморфных особенностей ос-

новных носителей меди – борнита и халькопирита – для установления характера окисления меди в составе данных минералов. Это может способствовать пересмотру критерия разделения первичных и смешанных сортов руд и позволит скорректировать методику подсчета балансовых руд по сортам. Данные мероприятия будут содействовать более корректной выемке медных руд и повышению извлечения меди при обогащении руд, что особенно важно при будущем переходе на подземную добычу.

На примере Волковского месторождения показана проблема недостаточной степени изученности природных сульфидов меди, оказывающая влияние на характер отработки медных руд. Продолжение исследований в данном направлении имеет принципиальное значение для фундаментального понимания типоморфизма сульфидной медной минерализации и важно для эксплуатации сульфидных месторождений меди в целом.

Авторы работы признательны руководству и сотрудникам АО «Святогор», Т. Н. Поликашиной, Н. Н. Шурыгиной и М. А. Азылову за содействие в отборе проб на Волковском месторождении, Е. А. Тропникову за помощь в проведении исследований с применением сканирующей электронной микроскопии, А. Е. Шмырову за помощь в пробоподготовке.

Работа выполнена в рамках Государственного задания НИР № 12204060009-2.

Список литературы

1. Аникина Е. В., Алексеев А. В. Минералого-геохимическая характеристика золото-палладиевого оруденения в Волковском габбро-диоритовом массиве (Платиноносный пояс Урала) // Литосфера. – 2010. – № 5. – С. 75–100.
2. Габлина И. Ф. Сульфиды меди и меди-железа как индикаторы условий образования и преобразования руд // Федоровская сессия 2008 : Тезисы докладов Международной научной конференции. – СПб. : Изд-во СПбГУ, 2008. – С. 32–34.
3. Изюитко В. М. Технологическая минералогия и оценка руд. – СПб. : Наука, 1997. – 582 с.
4. Инструкция НСАМ № 138-Х «Ускоренные химические методы определения породообразующих элементов». – М. : ВИМС, 1976. – 58 с.
5. Инструкция НСАМ № 50-Х «Определение закиси железа объемным бихроматным методом». – М. : ВИМС, 1966. – 12 с.
6. Кашин С. А. Медно-титаномагнетитовое оруденение в основных интрузивных породах Урала // Труды ГИН АН СССР. – 1948. – Вып. 91, № 9. – 132 с.
7. Маегов В. И. К петрологии Волковского месторождения медносульфидных и апатит-титаномагнетитовых руд (Средний Урал) // Уральский геологический журнал. – 1999. – № 5 (11). – С. 57–73.
8. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископае-

- рых. Медные руды. – М. : МПР России, 2007. – 39 с.
9. *Молошаг В. П., Коробейников А. Ф.* Новые данные о платиноидной минерализации медно-железо-ванадиевых руд / Магматические и метаморфические образования Урала и их металлогения. – Екатеринбург : УрО РАН, 2000. – С. 90–101.
 10. *Мурзин В. В., Пальянова Г. А., Аникина Е. В., Молошаг В. П.* Минералогия благородных металлов (Au, Ag, Pd, Pt) Волковского Cu-Fe-Ti-V месторождения (Средний Урал) // Литосфера. – 2021. – № 21 (5). – С. 643–659.
 11. *Налдретт А. Д.* Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых руд. – СПб. : СПбГУ, 2003. – 487 с.
 12. *Нечкин Г. С., Полтавец З. И.* Некоторые генетические особенности медных руд с благороднометалльной минерализацией на Волковском месторождении (Средний Урал) // Ежегодник-2002. – 2003. – Вып. 150. – С. 286–290.
 13. *Нечкин Г. С., Шагалов Е. С.* Позиция и состав теллуридов Pd в медных рудах Волковского месторождения (Средний Урал) // Ежегодник-2003. – 2004. – Вып. 151. – С. 316–319.
 14. *Николайченков Ю. С.* Условия размещения природных типов руд на Волковском месторождении : автореф. дис. на соискание учен. степ. канд. геол.-минерал. наук / Николайченков Юрий Сергеевич. – Свердловск : СГИ, 1981. – 21 с.
 15. *Полтавец Ю. А., Полтавец З. И., Нечкин Г. С.* Волковское месторождение титаномагнетитовых и медно-титаномагнетитовых руд с сопутствующей благороднометалльной минерализацией (Средний Урал, Россия) // Геология рудных месторождений. – 2011. – Т. 53, № 2. – С. 143–157.
 16. *Полтавец Ю. А., Сазонов В. Н., Полтавец З. И., Нечкин Г. С.* Закономерности распределения благородных металлов в рудных парагенезисах Волковского габбрового массива (Средний Урал) // Геохимия. – 2006. – № 2. – С. 167–190.
 17. *Самонов И. З., Пожариский И. Ф.* Месторождения меди / Рудные месторождения СССР. Т. 2. – М. : Недра, 1978. – С. 100–168.
 18. *Сатпаева М. К.* Руды Дзержказгана и условия их формирования. – Алма-Ата : Наука, АН КазССР, 1985. – 207 с.
 19. *Светов С. А., Степанова А. В., Чаженгина С. Ю., Светова Е. Н., Михайлова А. И., Рыбникова З. П., Парамонов А. С., Утицина В. Л., Колодей В. С., Эхова М. В.* Прецизионный (ICP-MS, LA-ICP-MS) анализ состава горных пород и минералов: методика и оценка точности результатов на примере раннедокембрийских мафитовых комплексов // Труды КарНЦ РАН. – 2015. – № 7. – С. 54–73.
 20. *Тимохов К. Д.* Связь медносульфидного и титаномагнетитового оруденения с вмещающими породами на Волковском месторождении / Магматизм, метаморфизм, металлогения Урала. Т. 1. – Свердловск, 1963. – С. 439–443.
 21. *Штейнберг Д. С., Еремина М. В.* Новые данные по петрологии Волковского месторождения / Магматизм, метаморфизм, металлогения Урала. Т. 1. – Свердловск, 1963. – С. 431–439.
 22. *Шумилова Т. Г., Шевчук С. С., Макеев Б. А.* Разновидности борнита Волковского месторождения – ключ к выявлению технологических сортов медных руд // Проблемы и перспективы современной минералогии (Юшкинские чтения – 2014) : Материалы минералогического семинара с международным участием. – Сыктывкар : Геопринт, 2014. – С. 252–253.
 23. *Anikina E. V., Malitch K. N., Pushkarev E. V., Shmelev V. R.* The Nizhny Tagil and Volkovsky massifs of the Uralian Platinum Belt, and related deposits. Field trip guidebook // 12th International Platinum Symposium. – Ekaterinburg : IGG UB RAS, 2014. – 48 p.
 24. *Bicak O., Ekmekci Z.* Prediction of flotation behavior of sulphide ores by oxidation index // Minerals Engineering. – 2012. – V. 36–38. – P. 279–283.
 25. *Dhar P., Thornhill M., & Kota H.* Investigation of Copper Recovery from a New Copper Ore Deposit (Nussir) in Northern Norway: Dithiophosphates and Xanthate-Dithiophosphate Blend as Collectors // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2019. – V. 40, № 6. – P. 380–389.
 26. *de Oliveira C., Duarte H. A.* Disulphide and metal sulphide formation on the reconstructed surface of chalcopyrite: A DFT study // Applied Surface Science. – 2010. – V. 257. – P. 1319–1324.
 27. *Gablina I. F.* Copper sulfides as indicators of the Ore-forming environment // Doklady Earth Sciences. – 1997b. – V. 357 (8). – P. 1133–1137.
 28. *Hall S. R., Stewart J. M.* The crystal structure refinement of chalcopyrite CuFeS₂ // Acta Crystallographica Section B. – 1973. – V. 29. – P. 579–585.
 29. *Llanos J., Buljan A., Mujica C., Ramirez R.* Electron transfer in the insertion of alkali metals in



chalcopyrite // *Materials Research Bulletin*. – 1995. – V. 30, № 1. – P. 43–48.

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

31. *Mikhlin Y., Tomashevich Y., Tauson V., Vyalikh D., Molodtsov S., Szargan R.* A comparative X-ray absorption near-edge structure study of bornite, Cu_5FeS_4 and chalcopyrite, CuFeS_2 // *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*. – 2005. – V. 142, № 1. – P. 83–88.

32. *Moimane T., Huai Y., Peng Y.* The critical degree of bornite surface oxidation in flotation // *Minerals Engineering*. – 2020. – V. 155. – P. 106445.

33. *Pitt G. D., Vyas M. K. R.* Metal–semiconductor transition in single crystal chalcopyrite // *Solid State Communications*. – 1974. – V. 15. – P. 899–902.

34. *Shu Z., Shen C., Lu A., Gu X., Liu Z.* The Crystal Structure of Bornite Cu_5FeS_4 : Ordered Fe and Split Cu // *Crystals*. – 2021. – V. 11. – P. 1495.

35. *Tanaka Y., Miki H., Suyantara G. P. W., Aoki Y., Hirajima T.* Mineralogical Prediction on the Flotation Behavior of Copper and Molybdenum Minerals from Blended Cu-Mo Ores in Seawater // *Minerals*. – 2021. – V. 11. – P. 869.

36. *Todd E. C., Sherman D. M., Purton J. A.* Surface oxidation of chalcopyrite (CuFeS_2) under ambient atmospheric and aqueous (pH 2–10) conditions: Cu, Fe L- and O K-edge X-ray spectroscopy // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2003. – V. 67. – P. 2137–2146.

37. *Woods R.* Electrochemistry of sulphide flotation / In: *Flotation : A. M. Gaudin Memorial Volume*; Fuerstenau M. C., Ed. – New York : American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 1976. – P. 298–333.

38. *Yund R. A., Kullerud G.* Thermal stability of assemblages in the Cu–Fe–S system // *Journal of Petrology*. – 1966. – V. 7. – P. 454–488.

References

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

2. Gablina I. F. Sul'fidy medi i medi-zheleza kak indikator uslovii obrazovaniya i preobrazovaniya rud [Copper and copper-iron sulfides as indicators of conditions of formation and transformation of ores], *Fedorovskaya sessiya 2008. Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii [Fedorov session 2008. Abstracts of reports of the International scientific conference]*, Sankt-Peterburg, SPbGU Publ., 2008, pp. 32–34. (In Russ.).

3. Izoitko V. M. Tekhnologicheskaya mineralogiya i otsenka rud [Technological mineralogy and ore evaluation], Sankt-Peterburg, Nauka Publ., 1997, 582 p.

4. NSAM Instruction No 138-X "Accelerated chemical methods for determining rock-forming elements", Moscow, VIMS Publ., 1976, 58 p.

5. NSAM Instruction No 50-X "Determination of ferrous oxide by the volumetric dichromate method", Moscow, VIMS Publ., 1966., 12 p.

6. Kashin S. A. Medno-titanomagnetitovoe orudnenie v osnovnykh intruzivnykh porodakh Urala [Copper-titanomagnetite mineralization in the basic intrusive rocks of the Urals], *Trudy GIN AN SSSR [Proceedings of the GIN AS USSR]*, 1948, Iss. 91, No 9, 132 p. (In Russ.).

7. Maegov V. I. K petrologii Volkovskogo mestorozhdeniya mednosul'fidnykh i apatit-titanomagnetitovykh rud (Srednii Ural) [On the petrology of the Volkovskoye copper-sulfide and apatite-titanomagnetite ore deposit (Middle Urals)], *Ural'skii geologicheskii zhurnal [Ural Geological Journal]*, 1999, No 5 (11), pp. 57–73. (In Russ.).

8. Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu Klassifikatsii zapasov mestorozhdenii i prognoznykh resursov tverdykh poleznykh iskopaemykh. Mednye rudy. [Methodological recommendations for the application of the Classification of reserves of deposits and forecast resources of solid minerals. Copper ores], Moscow, MNR Publ., 2007, 39 p.

9. Moloshag V. P., Korobeinikov A. F. Novye dannye o platinoidnoi mineralizatsii medno-zhelezo-vanadievyykh rud [New data on platinoid mineralization of copper-iron-vanadium ores], *Magmaticheskii i metamorficheskie obrazovaniya Urala i ikh metallogeniya [Magmatic and metamorphic formations]*

- of the Urals and their metallogeny], Ekaterinburg, UB RAS Publ., 2000, pp. 90–101. (In Russ.).
10. Murzin V. V., Pal'yanova G. A., Anikina E. V., Moloshag V. P. Mineralogiya blagorodnykh metallov (Au, Ag, Pd, Pt) Volkovskogo Cu-Fe-Ti-V mestorozhdeniya (Srednii Ural) [Mineralogy of noble metals (Au, Ag, Pd, Pt) in Volkovskoe Cu-Fe-Ti-V deposit (Middle Urals, Russia)], *Litosfera [Lithosphere]*, 2021, No 21 (5), pp. 643–659. (In Russ.).
 11. Naldrett A. D. Magmaticheskie sul'fidnye mestorozhdeniya medno-nikelevykh rud [Magmatic sulphide deposits of copper-nickel ores], Sankt-Peterburg, SPbGU Publ., 2003, 487 p.
 12. Nechkin G. S., Poltavets Z. I. Nekotorye geneticheskie osobennosti mednykh rud s blagorodnometal'noi mineralizatsiei na Volkovskom mestorozhdenii (Srednii Ural) [Some genetic features of copper ores with noble metal mineralization at the Volkovskoye deposit (Middle Urals)], *Ezhegodnik-2002 [Yearbook-2002]*, 2003, Iss. 150, pp. 286–290. (In Russ.).
 13. Nechkin G. S., Shagalov E. S. Pozitsiya i sostav telluridov Pd v mednykh rudakh Volkovskogo mestorozhdeniya (Srednii Ural) [Position and composition of Pd tellurides in copper ores of the Volkovskoye deposit (Middle Urals)], *Ezhegodnik-2003 [Yearbook-2003]*, 2004, Iss. 151, pp. 316–319. (In Russ.).
 14. Nikolaichenkov Yu. S. Usloviya razmeshcheniya prirodnykh tipov rud na Volkovskom mestorozhdenii : avtoref. dis. na soiskanie uchen. step. kand. geol.-mineral. nauk [Conditions of placement of natural ore types at the Volkovskoye deposit : candidate's thesis], Sverdlovsk, SGI, 1981, 21 p.
 15. Poltavets Yu. A., Poltavets Z. I., Nechkin G. S. Volkovskoe mestorozhdenie titanomagnetitovykh i medno-titanomagnetitovykh rud s soputstvuyushchei blagorodnometal'noi mineralizatsiei (Srednii Ural, Rossiya) [Volkovskoye deposit of titanomagnetite and copper-titanomagnetite ores with associated precious metal mineralization (Middle Urals, Russia)], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii [Geology of ore deposits]*, 2011, V. 53, No 2, pp. 143–157. (In Russ.).
 16. Poltavets Yu. A., Sazonov V. N., Poltavets Z. I., Nechkin G. S. Zakonomernosti raspredeleniya blagorodnykh metallov v rudnykh paragenezisakh Volkovskogo gabbrovogo massiva (Srednii Ural) [Patterns of distribution of noble metals in ore parageneses of the Volkovskiy gabbro massif (Middle Urals)], *Geokhimiya [Geochemistry]*, 2006, No 2, pp. 167–190. (In Russ.).
 17. Samonov I. Z., Pozhariskii I. F. Mestorozhdeniya medi [Copper deposits], Rudnye mestorozhdeniya SSSR [Ore deposits of the USSR], Moscow, Nedra Publ., 1978, V. 2, pp. 100–168.
 18. Satpaeva M. K. Rudy Dzhezkazgana i usloviya ikh formirovaniya [Ores of Dzhezkazgan and conditions of their formation], Alma-Ata, Nauka Publ., AS KazSSR, 1985, 207 p.
 19. Svetov S. A., Stepanova A. V., Chazhengina S. Yu., Svetova E. N., Mikhailova A. I., Rybnikova Z. P., Paramonov A. S., Utitsina V. L., Kolodei V. S., Ekhovala M. V. Pretsizionnyi (ICP-MS, LA-ICP-MS) analiz sostava gornyykh porod i mineralov: metodika i otsenka tochnosti rezul'tatov na primere rannekembriiskikh mafitovykh kompleksov [Precision (ICP-MS, LA-ICP-MS) analysis of the composition of rocks and minerals: methodology and assessment of the accuracy of results using the example of early Precambrian mafic complexes], *Trudy KarNTs RAN [Proceedings of the KarNC RAS]*, 2015, No 7, pp. 54–73. (In Russ.).
 20. Timokhov K. D. Svyaz' mednosul'fidnogo i titanomagnetitovogo orudneniya s vmeshchayushchimi porodami na Volkovskom mestorozhdenii [Relationship of copper-sulfide and titanomagnetite mineralization with host rocks at the Volkovskoye deposit]. In: *Magmatizm, metamorfizm, metallogeniya Urala [Magmatism, metamorphism, metallogeny of the Urals]*, Sverdlovsk, 1963, V. 1, pp. 439–443.
 21. Shteinberg D. S., Eremina M. V. Novye dannye po petrologii Volkovskogo mestorozhdeniya [New data on the petrology of the Volkovskoye deposit]. In: *Magmatizm, metamorfizm, metallogeniya Urala [Magmatism, metamorphism, metallogeny of the Urals]*, Sverdlovsk, 1963, V. 1, pp. 431–439.
 22. Shumilova T. G., Shevchuk S. S., Makeev B. A. Raznovidnosti bornita Volkovskogo mestorozhdeniya – klyuch k vyyavleniyu tekhnologicheskikh sortov mednykh rud [Varieties of bornite from the Volkovskoye deposit – the key to identifying technological grades of copper ores], *Problemy i perspektivy sovremennoi mineralogii (Yushkinskie chteniya – 2014) [Problems and prospects of modern mineralogy (Yushkin readings – 2014)]*, Syktyvkar, Geoprint Publ., 2014, pp. 252–253. (In Russ.).
 23. Anikina E. V., Malitch K. N., Pushkarev E. V., Shmelev V. R. The Nizhny Tagil and Volkovsky massifs of the Uralian Platinum Belt, and related



- deposits. Field trip guidebook, 12th International Platinum Symposium, Ekaterinburg, IGG UB RAS Publ. 2014, 48 p.
24. Bicak O., Ekmekci Z. Prediction of flotation behavior of sulphide ores by oxidation index, *Minerals Engineering*, 2012, V. 36–38, pp. 279–283.
 25. Dhar P., Thornhill M., & Kota H. Investigation of Copper Recovery from a New Copper Ore Deposit (Nussir) in Northern Norway: Dithiophosphates and Xanthate-Dithiophosphate Blend as Collectors, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2019, V. 40, No 6, pp. 380–389.
 26. de Oliveira C., Duarte H. A. Disulphide and metal sulphide formation on the reconstructed surface of chalcopyrite: A DFT study, *Applied Surface Science*, 2010, V. 257, pp. 1319–1324.
 27. Gablina I. F. Copper sulfides as indicators of the Ore-forming environment, *Doklady Earth Sciences*, 1997b, V. 357 (8), pp. 1133–1137.
 28. Hall S. R., Stewart J. M. The crystal structure refinement of chalcopyrite CuFeS_2 , *Acta Crystallographica Section B*, 1973, V. 29, pp. 579–585.
 29. Llanos J., Buljan A., Mujica C., Ramírez R. Electron transfer in the insertion of alkali metals in chalcopyrite, *Materials Research Bulletin*, 1995, V. 30, No 1, pp. 43–48.
 30. McDonough W. F., Sun S. S. The composition of the Earth, *Chemical Geology*, 1995, V. 120, pp. 223–253.
 31. Mikhlin Y., Tomashevich Y., Tauson V., Vyalikh D., Molodtsov S., Szargan R. A comparative X-ray absorption near-edge structure study of bornite, Cu_5FeS_4 and chalcopyrite, CuFeS_2 , *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 2005, V. 142, No 1, pp. 83–88.
 32. Moimane T., Huai Y., Peng Y. The critical degree of bornite surface oxidation in flotation, *Minerals Engineering*, 2020, V. 155, p. 106445.
 33. Pitt G. D., Vyas M. K. R. Metal–semiconductor transition in single crystal chalcopyrite, *Solid State Communications*, 1974, V. 15, pp. 899–902.
 34. Shu Z., Shen C., Lu A., Gu X., Liu Z. The Crystal Structure of Bornite Cu_5FeS_4 : Ordered Fe and Split Cu, *Crystals*, 2021, V. 11, p. 1495.
 35. Tanaka Y., Miki H., Suyantara G. P. W., Aoki Y., Hirajima T. Mineralogical Prediction on the Flotation Behavior of Copper and Molybdenum Minerals from Blended Cu-Mo Ores in Seawater, *Minerals*, 2021, V. 11, p. 869.
 36. Todd E. C., Sherman D. M., Purton J. A. Surface oxidation of chalcopyrite (CuFeS_2) under ambient atmospheric and aqueous (pH 2–10) conditions: Cu, Fe L- and O K-edge X-ray spectroscopy, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, V. 67, pp. 2137–2146.
 37. Woods R. Electrochemistry of sulphide flotation. In: Flotation : A. M. Gaudin Memorial Volume; Fuerstenau M. C., Ed. – New York, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 1976, pp. 298–333.
 38. Yund R. A., Kullerud G. Thermal stability of assemblages in the Cu–Fe–S system, *Journal of Petrology*, 1966, V. 7, pp. 454–488.

Морохин Алексей Иванович (alexey.morokhin@gmail.com)

инженер¹

Шумилова Татьяна Григорьевна

доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, заведующая лабораторией¹

Светов Сергей Анатольевич

доктор геолого-минералогических наук, директор²

¹ Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия

² Институт геологии КарНЦ РАН, г. Петрозаводск, Россия



Опыт систематизации, централизации фондовых материалов геологоразведочного комплекса АК «АЛРОСА» (ПАО)

Забелин А. В.¹, Ратьков С. С.²

¹ ООО АЛРОСА «Информационные технологии», г. Новосибирск, Россия

² АК «АЛРОСА» (ПАО) Вилуйская геологоразведочная экспедиция, г. Мирный, Россия

Аннотация. Для эффективного использования информации, накопленной за десятилетия геологоразведочных работ, необходим инструмент, позволяющий каталогизировать, описать и обеспечить доступ как к бумажным, так и электронным версиям материалов. Несмотря на поэтапную цифровизацию всех основных геологоразведочных процессов, до сих пор остаётся большой объём материалов прошлых лет на бумажных носителях (производственные отчёты, проекты и т. д.). Планово производится их оцифровка, генерируются новые отчётные материалы в цифровом виде. Помимо этого, ежегодно издаются тематические научные статьи, публикации. Как объединить все материалы, обеспечить оперативный доступ к ним? Существуют разные способы достижения данной цели. Вилуйская ГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО) пошла по пути разработки выделенной информационной системы «Единая фондовая библиотека ГРК», предназначенной для хранения, получения доступа к информации о геологических отчётах, научных трудах, статьях и т. д. Для каждого типа документа предусмотрена своя атрибутивная информация, несколько типов документов сгруппированы в тематические разделы. Система позволяет получать информацию о наличии проектно-отчётной документации в фондах с возможностью её заказа и получения, отслеживания движения документации.

Ключевые слова: ЕФБ ГРК, геология, геологоразведка, алмаз, АЛРОСА, ВГРЭ, отчёт, статья, lua nginx, tesseract, хранение файлов, поиск.

Для цитирования: Забелин А. В., Ратьков С. С. Опыт систематизации, централизации фондовых материалов геологоразведочного комплекса АК «АЛРОСА» (ПАО). Руды и металлы. 2024. № 3. С. 82–91. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10015.

Practice of the systematization and centralization of archive fund materials of the PJSC ALROSA geological exploration complex

Zabelin A. V.¹, Ratkov S. S.²

¹ ALROSA Information Technologies LLC, Novosibirsk, Russia

² Vilyuisk Geological Exploration Expedition, PJSC ALROSA, Mirny, Russia

Annotation. Effective usage of information accumulated over decades of geological exploration requires a tool that allows cataloging, describing, and providing access to both paper and electronic versions of the materials. Despite gradual digitalization of all the major geological exploration processes, there still remains large volume of the materials from previous years on paper media (technical reports, projects, etc.). They continue to be systematically digitized, while new reporting materials are generated in digital form. In addition, thematic scientific articles and publications are annually published. How to combine all the materials and to ensure quick and convenient access to them? There exist various ways to achieve this goal. The Vilyuisk Geological Exploration Expedition (VGRE) of PJSC ALROSA has taken the path of developing a dedicated information system «EFB GRK» designed to store and get access to the information on geological reports, scientific works, articles, etc. Each type of the documents is provided by its own attribute information; several types of the documents are grouped into thematic sections. The system allows one to obtain information on the availability of the projecting and reporting documentation in the archive funds with ability to order and receive and to trace the movement of such documentation.

Keywords: EFB GRK (United Archive Fund Library of the Geological Exploration Complex), geology, geological exploration, diamond, ALROSA, VGRE (Vilyuisk Geological Exploration Expedition), report, article, lua nginx, tesseract, file storage, search.

For citation: Zabelin A. V., Ratkov S. S. Practice of the systematization and centralization of archive fund materials of the PJSC ALROSA geological exploration complex. Ores and metals, 2024, № 3, pp. 82–91. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10015.



Акционерная компания «АЛРОСА» (ПАО) (далее Компания) для достижения стратегических целей по сохранению и укреплению лидерских позиций на мировом алмазном рынке активно поддерживает и развивает геоинформационные технологии, тем самым повышая эффективность геологоразведочной деятельности.

Компанией развивается единое геологоинформационное пространство (ЕГИП), включающее в себя геологические комплексные системы хранения и обработки данных, инструменты для оперативного принятия решений и обработки накопленной геологической информации.

Перед ЕГИП были поставлены задачи, которые должны были оптимизировать работу с геологической информацией, повысить её достоверность и скорость вовлечения в аналитические исследования. Одной из таких задач была централизация и унификация всех геологических информационных ресурсов, баз данных (БД), используемых информационных систем. В процессе анализа было зафиксировано несколько информационных ресурсов в области учёта геологических отчётов, статей, публикаций, которые функционировали независимо друг от друга, имели схожий функционал и назначение.

Специфика работы в геологоразведочном комплексе (ГРК) заключается в том, что работы ведутся в рамках «объекта работ» и могут длиться несколько лет. Этих объектов может быть несколько, и работы ведутся параллельно. По окончании работ готовится отчётный комплект, который включает текстовые и графические материалы. Отчётные материалы сдаются в федеральные, региональные, территориальные фонды, а также в фонды ГРК. Помимо этого, научный комплекс Компании ведёт научную деятельность, использует в своей работе дополнительно ряд научных материалов, статей, публикаций, сам генерирует статьи, научные труды, рекомендации. За десятилетия алмазопроисковых работ накоплен колоссальный объём материалов, что требует учёта и обеспечения возможности оперативно обратиться к таким данным по мере необходимости.

Таким образом, в целях обеспечения оперативного получения информации по проектно-отчётной и научно-исследовательской документации, необходимой для эффективного выполнения поставленных задач, отслеживания движения геологических отчётов, было принято решение разработать и интегрировать в ЕГИП информационную систему «Единая фондовая библиотека ГРК» (далее Система) [7, 8].

Система позволяет вводить информацию по отчётным геологическим материалам и фиксировать факт их поступления в фонды Компании, получать информацию о наличии геологических отчётов в фондах с возможностью их предзаказа, получать доступ к электронным версиям геологических отчётов, научных документов в едином окне, вести учёт выданных материалов и многое другое.

Система разработана на языке C# (backend code), JavaScript (frontend code) в среде разработки Visual Studio ASP.NET Core 8.0. Включает в себя файловое хранилище, хранилище настроек Redis, базу данных, набор сервисов (разработанных в среде nginx Lua [1]). Логическая архитектура системы показана на рис. 1.

В самом начале работ команда разработки столкнулась с проблемой разного понимания и наименования сущностей, одни и те же материалы могли трактоваться по-разному. Таким образом, одной из важнейших задач было дать однозначное определение сущностям: «Виды документов», «Документ», «Метаданные» и другие. В итоге за основу было взято научно-практическое пособие «Библиотечный фонд: словарь-справочник» [2], что позволило решить данную проблему.

Система работает с БД PostgreSQL, хранит настройки в Redis, состоит из множества страниц. Программа не требует от пользователя установки дополнительных программ, библиотек, технических средств. Работает в любом современном браузере.

Такой подход к архитектуре Системы был выбран в целях максимальной автономности, независимости созданной системы. Автоматическая регистрация при первом обращении пользователей позволила уменьшить количес-



Рис. 1. Логическая архитектура информационной системы ЕФБ ГРК

Fig. 1. Logical architecture of the EFB GRK information system

тво рутинных операций. Redis позволила решить проблему обеспечения безопасности, связанную с хранением метаданных пользователей при работе с Системой. Пользователи характеризуют себя в Системе закодированным кэшем, в то время как все настройки хранятся в Redis и прямого доступа браузер к ним не имеет. Таким образом гарантируется безопасность настроек и скорость их обработки.

База данных PostgreSQL зарекомендовала себя с лучшей стороны, позволила реализовать весь запланированный функционал. Отдельно стоит отметить её возможность создания функций, которые можно запускать из-под создателя (не пользователя), что позволяет динамически разграничивать доступ к данным. База данных Системы разработана для обеспечения оперативного получения информации, необходимой для эффективного выполнения поставленных геологических задач. База данных [7] позволяет систематизировать, каталогизировать и обеспечить сохранность метаданных различных видов документов. Хранит описательные метаданные по документам, ин-

формацию о геологических отчётах и научных документах, их движении, файлы документов, информацию о статистике действий пользователей Системы и многое другое.

При создании Системы, в основе которой лежат ранее эксплуатируемые ресурсы и БД, всегда встаёт вопрос о нормализации атрибутивных данных и справочной информации, так как зачастую одни и те же атрибуты могут быть записаны по-разному, не говоря уже об отсутствии выверенных справочников. Так как Система рассматривается как один из основных элементов ЕГИП, необходимо было провести работу по нормализации справочников, при том что ряд справочников Системы был определён как мастер-справочники для информационной системы ЕГИП (ИС ЕГИП) [5, 6]. Данному вопросу было уделено особое внимание, работы по сопровождению справочников Системы продолжают выполняться.

Так, справочник «Виды документов» сформирован на основе видов документов, перечисленных в ГОСТ Р 7.0.100–2018. Виды документов различаются количеством харак-



id_publ_field	value_publ_field	id_publ
267	Эксплуатационная разведка трубки Нюрбинская, выполненная Вилюйской	5 943
282	Эксплуатационная разведка проводилась с целью опережающего изучения	5 943
270	7	5 943
262	5197	5 943
278	505	5 943
450	4439	5 943
275	31	5 943
269	23	5 943
266	2018	5 943
263	2017	5 943
264	2017	5 943
287	2	5 943

Рис. 2. Описательные метаданные документа 5943 в базе данных Системы

Fig. 2. Descriptive metadata of Document 5943 in the System database

теризующих их метаданных. В процессе разработки базы возникла дилемма, как хранить метаданные по видам документов, чтобы структура наиболее соответствовала нормальным формам баз данных. Было принято решение хранить их в нескольких таблицах, соединённых логикой «многие ко многим» (рис. 2). На рисунке «id_publ_field» – ссылка на таблицу, описывающую метаданные вида документа, «value_publ_field» – значение для указанного в «id_publ_field» метаданного, «id_publ» – ссылка на документ. Такой подход обеспечил динамичность данным, так как помимо отсутствия избыточности базы был получен эффект индивидуальной обработки метаданных документа в триггерах. Для ускорения работы базы был создан блок статистики, который пополняется по мере публикации новых метаданных документов.

Помимо статистического блока для ускорения функционирования Системы и распределения ресурсов для обработки запросов пользователей были разработаны внешние сервисы-боты. Сервисы Системы работают на отдельных портах, разработаны в модуле LUA nginx [1]. Они обеспечивают оперативную загрузку/скачивание файлов любого размера. В автоматическом режиме обрабатывают загруженные в файловое хранилище до-

кументы ЕФБ (форматы pdf, djvu, tif, jpg, png, jpeg, bmp, djv, tiff). Индексируют страницы документов, по обращению пользователя отображают ему выбранную страницу без их локального сохранения (напрямую выгружая отдельную страницу для пользователя из файлов, скорость открытия до нескольких секунд для очень больших документов весом в несколько гигабайт).

Файловое хранилище Системы создавалось для организации прямого доступа к файлам (технология SAMBA). Имена файлов унифицированы и имеют вид последовательного набора символов f5c8332e4a760258dba298eb268d4757, берётся 32 первых символа бинарного контекста файла. Структура файлового хранилища состоит из подпапок и выглядит следующим образом «\f5c\833\»: первые три символа – первый подкаталог, последующие три символа – второй подкаталог. Это позволило сократить количество файлов в одном каталоге и ускорить процесс чтения каталога файлового хранилища. Структура метаданных по файлам хранится в базе данных. Такой подход позволяет редактировать метаданные файлов, не изменяя их в файловом хранилище.

Применение данного подхода в созданной Системе позволило систематизировать, каталогизировать хранение файлов, решить

проблему с хранением файлов в PostgreSQL. Обеспечило возможность прямых ссылок на файлы в сторонних системах, документах, включая использование ссылок в библиографическом описании технической документации, руководствах пользователя, методических пособиях. Заккрытие каталогов на уровне SAMBA обеспечило защиту файлов, так как пользователи не могут получить перечень всех файлов и им нужно знать точную ссылку для прямого доступа к файлу.

Уже на этапе опытной эксплуатации Системы потребовалось решать новую задачу, которая заключалась в обеспечении необходимости связывания между собой документов. Жизненный цикл карточки документа в Системе выглядит следующим образом: на первоначальном этапе создается тема (фактически контейнер с общим названием для определённого типа документа). Далее, по мере подготовки проектной документации на выполнение геологоразведочных работ, в Систему для определённой темы добавляется файл проекта и заполняются метаданные. После реализации работ по проекту составляется геологический отчёт. Данные документы можно объединить одним названием – «проектно-отчётная документация». Изначально все документы по проектно-отчётной документации имели разные id-коды в системе, что в корне не верно. Поэтому для устранения дублирования метаданных и получения единого id-кода было принято решение объединить все виды документов по одному объекту работ в один – «Проектно-отчётная документация» (рис. 3).

При этом сохраняется возможность связывать с карточкой документа карточки иных материалов/документов, которые в той или иной мере имеют отношение к конкретному документу. Например, если мы говорим про проектно-отчётную документацию, это может быть отчёт подрядной организации, которая была привлечена для выполнения работ в рамках конкретного объекта работ. Такие карточки можно связать между собой. Если это научный труд, то в Системе есть возможность сохранения ссылок на цитируемые документы.

В интерфейсе на стартовой странице Система имеет только поисковую строку и скрытый набор критериев для расширенного поиска (рис. 4). В зависимости от прав пользователю доступны различные вкладки. Поисковая строка поддерживает различные символы для уточнения поискового критерия, аналогично Google или Yandex.

Для удобства разных групп пользователей реализовано несколько страниц для поиска. Для производителей, которые часто имеют дело с геологической документацией и итоговыми отчётами, материалами, разработана отдельная вкладка «Отчёты/Проекты», где поиск происходит только по проектно-отчётной документации. При этом специально персонализирована информация, которая выдается по результатам поиска. В другой вкладке производится поиск статей, публикаций (рис. 5). Также пользователям в зависимости от прав доступа доступны вкладки «Диссертации», «Презентации» и другие, для частного поиска по специальным метаданным, относящимся к определённым видам документов.

Стоит отметить, что поиск осуществляется не только по метаданным или именам файлов, а также по тексту документов, даже если он состоит из отсканированных листов. Для этой цели в Системе создан сервис в среде nginx Lua [1] для обработки и распознавания файлов форматов tif, jpg, png, bmp, jpeg, tiff, djvu, djv, pdf, основой которого является технология tesseract 5.x. Текст с распознанных страниц хранится в таблице базы данных, привилегированные пользователи могут редактировать/реставрировать данные страницы (рис. 6). Сканы страниц не хранятся в базе данных, они подгружаются на лету из файлов, это ещё одно из технических достижений Системы.

В ролевой модели при работе с Системой можно выделить несколько основных ролей:

- Пользователь – сотрудник ГРК, который использует Систему для поиска необходимых материалов, их заказа, скачивания и публикации новых документов. Права пользователей определяются привилегиями, которые назначает администратор данных;



АЛРОСА ЕДИНАЯ ФОНДОВАЯ БИБЛИОТЕКА
разнородной геологической информации

ОТЧЕТЫ/ПРОЕКТЫ ВСЕ МАТЕРИАЛЫ АДМИНИСТРИРОВАНИЕ ДОБАВИТЬ ДОКУМЕНТ

Проектно-отчетная документация

Информационная карта

Информационная карточка объекта ГРП	
Тема	Поисковые работы на алмазы в пределах перспективных участков Вилдойско-Мархинской минералогической зоны в бассейне среднего течения р.Ыгытта в 2015-2018гг.
Название проекта	Проект на проведение поисковых работ на алмазы в пределах перспективных участков Вилдойско-Мархинской минералогической зоны в бассейне среднего течения р. Ыгытта в 2015-2018гг. (Объект Хампинский-2)
Название отчета	Отчет о результатах проведения поисковых работ на алмазы в пределах перспективных участков Вилдойско-Мархинской минералогической зоны в бассейне среднего течения р. Ыгытта в 2015-2018гг. Объект Хампинский-2
Прикрепленные файлы	Реферат отчета.pdf , Проект.pdf , Контур объекта.jpg
Объект (ГРП, НИР)	Хампинский-2
Место хранения	ВГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО) Фондовый номер: 4901 Эл.номер: 696 ГУП «Сахагеоинформ» Эл.номер: 5258 ФГБУ «Росгеолфонд» Эл.номер: 539186
Автор проекта	Константинов А.К.
Автор отчета	Аржаков Е.Е., Константинов А.К., Герасимов В.В.
Ключевые слова	Алмаз, Шурф, Электроразведка, Магниторазведка, Кимберлиты, Понски, Ореол ИМК, Маршруты, Скважина, Опробование, Тектонические нарушения, Поисковые признаки, Перспективный участок
Год начала работ	2015
Год окончания работ	2018
Год публикации отчета	2018
Реестровый номер лицензии	ЯКУ 03083 КП, рег. номер: № 2799 от 21 сентября 2011 г.
Лицензионный объект	Хампинская площадь
Полезные ископаемые	Алмаз
Город	г.Мирный
Направление работ	Поисковые работы
Вид работ	Электроразведка, Профильная гравиразведка, Обработка проб, Заверка номалий, Топографо-геодезические работы
Зона работ	Вилдойско-Мархинская минералогическая зона
Росгеолфонд	Перейти на сайт
Карточка изученности ФГБУ РосГеолФонд	Перейти на сайт

Copyright © АК «АЛРОСА» (ПАО) 2020-2024 ~ All Rights Reserved.

Рис. 3. Интерфейс системы, информационная карта, проектно-отчётная документация

Fig. 3. The System interface: Information map and projecting and reporting documentation

АЛРОСА ЕДИНАЯ ФОНДОВАЯ БИБЛИОТЕКА
разнородной геологической информации

ОТЧЕТЫ/ПРОЕКТЫ ВСЕ МАТЕРИАЛЫ ДИССЕРТАЦИИ ПРЕЗЕНТАЦИИ АДМИНИСТРИРОВАНИЕ ДОБАВИТЬ ДОКУМЕНТ

В систему загружено 9218 документов

Введите поисковый запрос, например: Морозова+Н.Е.+1981

пробел - операция ИЛИ, + - операция И, '' - одинарные кавычки, поиск сложных словосочетаний.
Доступен шаблон: 'Фамилия И.О.' - поиск по ФИО; ЕФБXXXXX - поиск по номеру в ЕФБ ГРК; _XXXXXX - поиск по точной фразе, например _Ахсанский-2
Серфинг по документам ||

Рис. 4. Интерфейс системы, стартовая страница

Fig. 4. The System interface: Start page

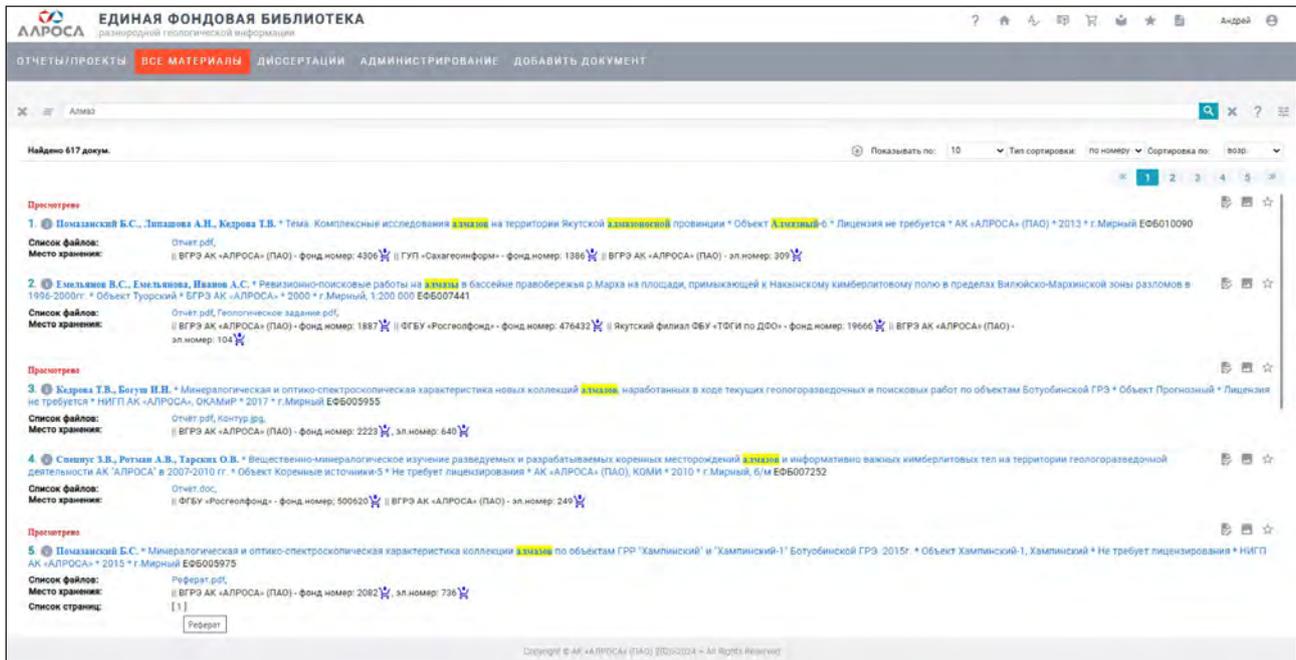


Рис. 5. Интерфейс системы, результат поиска документов по слову «Алмаз»

Fig. 5. The System interface: Result of searching for documents by the word “Diamond”

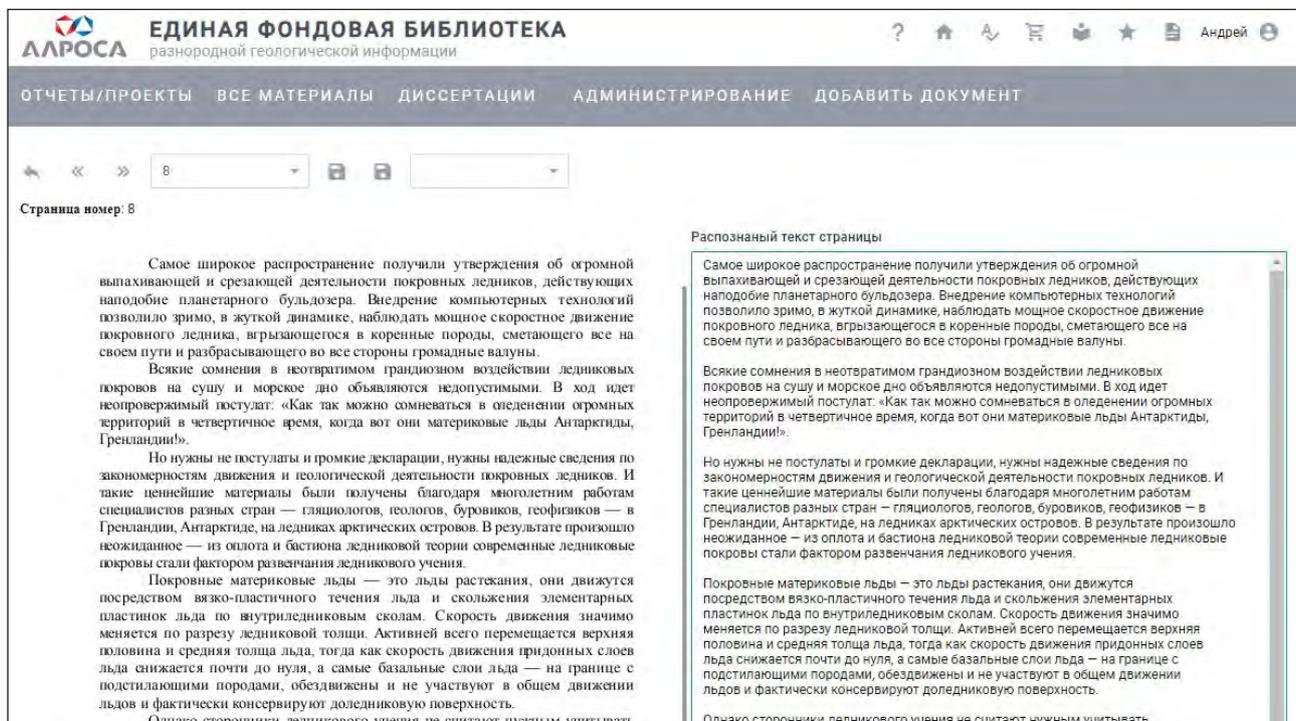


Рис. 6. Интерфейс системы, страница редактирования результата распознавания

Fig. 6. The System interface: Page of editing the recognition result



- Сотрудник фондов – ведёт учёт поступающих в фонды материалов, производит первичное заполнение метаданных, выдачу и учёт фондовых материалов;

- Администратор данных – производит проверку данных в Системе, корректировку, дополнение (в том числе ссылки на Российские ресурсы), добавление файлов, ведёт справочники и проч.

Таким образом, в зависимости от роли доступны тот или иной набор функций и инструментов.

Заключение. В ходе работ получен значительный опыт в области нормализации и консолидации информационных систем и баз данных, создании унифицированных справочников. Освоен ряд новых технологий и технологических решений, которые позволяют создавать надёжные корпоративные решения. Разработана, внедрена в Компании и зарегистрирована в реестре программных продуктов информационная система «Единая фондовая библиотека ГРК».

В результате интеграции Системы в ЕГИП получилось централизовать хранение описательных метаданных геологических отчётов, научных трудов, электронных версий документов. Пользователи Системы получили возможность:

- выполнять релевантный поиск, получать доступ к электронным версиям отчётов, научным трудам, необходимым для эффективного выполнения поставленных геологических задач;

- получать информацию о наличии геологических отчётов в фондах с возможностью заказа физической версии отчёта и учёта материалов;

- открывать по прямому пути файлы геологических отчётов, научных трудов по протоколам UNC и URL в сторонних программных продуктах, без скачивания;

- отслеживать движение физических версий геологических отчётов в ГРК Компании;

- получать доступ к тексту страниц документов;

- создавать/редактировать необходимые для геологической деятельности описательные метаданные материалов документов по стандарту ISO 19139:2007 «Geographic information Metadata – XML Schema Implementation» без использования иностранного программного обеспечения.

Созданное за последние годы специализированное программное обеспечение позволило АК АЛРОСА (ПАО) выйти на новый уровень оценки перспектив алмазности [3–8] как известных кимберлитовых тел, так и новых поисковых участков. Возросла доступность геологической и научной информации для комплексирования и вовлечения в работу геологическим персоналом, что, несомненно, сказывается на эффективности выполнения поставленных геологических задач.

Система была представлена на XXV Московском международном салоне изобретений и инновационных технологий «Архимед», отмечена золотой медалью салона.

Список литературы

1. *Иерузалымски Р.* Программирование на языке Lua. – М. : ДМК Пресс, 2014. – 384 с.
2. *Ратникова Е. И.* Библиотечный фонд: словарь-справочник / под науч. ред. Ю. Н. Столярова. – М. : ИНФРА-М, 2022. – 160 с.
3. *Свидетельство* о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020616588 Российская Федерация. RN-Test № 2020615611, дата поступления 04.06.2020, дата гос. регистрации 18.06.2020 / Ковальчук О. Е., Забелин А. В., Зайцевский Ф. К.; правообладатель АК «АЛРОСА» (ПАО).
4. *Свидетельство* о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023611824 Российская Федерация. МСА-Эксперт № 2023611824, дата поступления 09.01.2023, дата гос. регистрации 25.01.2023 / Гаранин В. К., Забелин А. В., Гибшер А. А., Мальковец В. Г., Никифорова А. Ю., Зайцевский Ф. К.
5. *Свидетельство* о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682331 Российская Федерация. МОДУЛЬ ИНТЕГРАЦИИ ESRI ARCMAP – ИС «ЕГИП» № 2023682331, дата поступления 19.10.2023, дата гос. регистрации

24.10.2023 / Ратьков С. С., Гончаров Е. М., Гончарова В. В., Забелин А. В., Юсуфов Б. С., Тюпанов С. Н.

6. *Свидетельство* о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682658 Российская Федерация. МОДУЛЬ ИНТЕГРАЦИИ GEOSOFT OASIS MONTAJ – ИС «ЕГИП» № 2023682658, дата поступления 19.10.2023, дата гос. регистрации 27.10.2023 / Ратьков С. С., Коваленко Н. И., Гончаров Е. М., Зайцевский Ф. К., Забелин А. В., Юсуфов Б. С., Мадьяров Э. И.
7. *Свидетельство* о регистрации базы данных № 2021622272 Российская Федерация. ЕДИНАЯ

ФОНДОВАЯ БИБЛИОТЕКА № 2021622272, дата поступления 14.10.2021, дата гос. регистрации 25.10.2021 / Забелин А. В., Зайцев И. В., Гончарова В. В., Ратьков С. С., Зайцевский Ф. К.; правообладатель АК «АЛРОСА» (ПАО).

8. *Свидетельство* о регистрации программы для ЭВМ № 2021668256 Российская Федерация. ЕДИНАЯ ФОНДОВАЯ БИБЛИОТЕКА ГРК № 2021668256, дата поступления 22.10.2021, дата гос. регистрации 11.11.2021 / Забелин А. В., Зайцев И. В., Ратьков С. С., Зайцевский Ф. К.; правообладатель АК «АЛРОСА» (ПАО).

References

1. Ieruzalimski R. Programmirovanie na yazyke Lua [Programming in Lua], Moscow, DMK Press Publ., 2014, 384 p.
2. Ratnikova E. I. Biblioteknyi fond: slovar'-spravochnik [Library collection: dictionary-reference book] / Ed. Yu. N. Stolyarova, Moscow, INFRA-M Publ., 2022, 160 p.
3. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM № 2020616588 Rossiiskaya Federatsiya. RN-Test № 2020615611, data postupleniya 04.06.2020, data gos. registratsii 18.06.2020 / Koval'chuk O. E., Zabelin A. V., Zaitsevskii F. K.; pravoobladatel' AK ALROSA [Certificate of state registration of computer program No 2020616588 Russian Federation. RN-Test No 2020615611, date of receipt 04.06.2020, date of state registration 18.06.2020].
4. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM № 2023611824 Rossiiskaya Federatsiya. MSA-Expert № 2023611824, data postupleniya 09.01.2023, data gos. registratsii 25.01.2023 / Garanin V. K., Zabelin A. V., Gibsher A. A., Mal'kovets V. G., Nikiforova A. Yu., Zaitsevskii F. K. [Certificate of state registration of the computer program No 2023611824 Russian Federation. MSA-Expert No 2023611824, date of receipt 09.01.2023, date of state registration 25.01.2023].
5. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM № 2023682331 Rossiiskaya Federatsiya. MODUL INTEGRATSII ESRI ARCMAP – IS EGIP № 2023682331, data postupleniya 19.10.2023, data gos. registratsii 24.10.2023 / Rat'kov S. S., Goncharov E. M., Goncharova V. V., Zabelin A. V., Yusufov B. S., Tyupanov S. N. [Certificate of state registration of the computer program No 2023682331 Russian Federation. ESRI ARCMAP INTEGRATION MODULE – IS EGYP No 2023682331, date of receipt 19.10.2023, date of state registration 24.10.2023].
6. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM № 2023682658 Rossiiskaya Federatsiya. MODUL INTEGRATSII GEOSOFT OASIS MONTAJ – IS EGIP № 2023682658, data postupleniya 19.10.2023, data gos. registratsii 27.10.2023 / Rat'kov S. S., Kovalenko N. I., Goncharov E. M., Zaitsevskii F. K., Zabelin A. V., Yusufov B. S., Mad'yarov E. I. [Certificate of state registration of the computer program No 2023682658 Russian Federation. GEOSOFT OASIS MONTAJ INTEGRATION MODULE – IS EGYP No 2023682658, date of receipt 19.10.2023, date of state registration 27.10.2023].
7. Svidetel'stvo o registratsii bazy dannykh № 2021622272 Rossiiskaya Federatsiya. EDINAYA FONDOVAYA BIBLIOTEKA № 2021622272, data postupleniya 14.10.2021, data gos. registratsii 25.10.2021 / Zabelin A. V., Zaitsev I. V., Goncharova V. V., Rat'kov S. S., Zaitsevskii F. K.; pravoobladatel' AK ALROSA [Database registration certificate No 2021622272 Russian Federation. UNIFIED STOCK LIBRARY No 2021622272, date of receipt 14.10.2021, date of state registration 25.10.2021].
8. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM № 2021668256 Rossiiskaya Federatsiya. EDINAYA FONDOVAYA BIBLIOTEKA GRK № 2021668256,



data postupleniya 22.10.2021, data gos. registratsii 11.11.2021 / Zabelin A. V., Zaitsev I. V., Rat'kov S. S., Zaitsevskii F. K.; pravoobladatel' AK ALROSA [Certificate of registration of computer program

No 2021668256 Russian Federation. UNIFIED STOCK LIBRARY GEK No 2021668256, date of receipt 22.10.2021, date of state registration 11.11.2021].

Забелин Андрей Викторович (zabelinAV@alrosa.ru)
эксперт ¹

Ратьков Сергей Сергеевич
руководитель центра геоинформационных технологий ²

¹ ООО АЛРОСА «Информационные технологии», г. Новосибирск, Россия

² АК «АЛРОСА» (ПАО) Вилюйская геологоразведочная экспедиция, г. Мирный, Россия

Редакция: В. С. Жаркова
Вёрстка: В. Ю. Козлова
Оригинал-макет: А. С. Рязанцева, В. Ю. Козлова
Фото на обложке (Отенит): <https://commons.m.wikimedia.org/wiki/File:AutuniteFrance.jpg>

Подписано в печать 4.10.24 г. Формат 290 × 205. Бумага листовая. Печать цифровая
Отпечатано в ФГБУ «ЦНИГРИ»: 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, 129, корп. 1

Адрес редакции:
117545, г. Москва, Варшавское шоссе, 129, корп. 1, ФГБУ «ЦНИГРИ»
Телефон: 8 (495) 315-28-47
E-mail: rudandmet@tsnigri.ru, rudandmet@yandex.ru
Сайт: <http://www.rm.tsnigri.ru>
© «Руды и металлы», 2024