

ISSN 0869-5997

И РУДЫ 
МЕТАЛЛЫ
ORES AND METALS

1/2024

РУДЫ И МЕТАЛЛЫ 1/2024

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

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

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

Дементьев Владимир Евгеньевич

генеральный директор АО «Иргиредмет»
кандидат технических наук

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 1/2024

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

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

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

Vladimir E. Dementiev

General Director, JSC Irgiredmet
PhD

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

Vasiliy 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

ПРИКЛАДНАЯ МЕТАЛЛОГЕНИЯ

**Макаров В. А., Бабинцев Н. А.,
Лосев В. И., Межубовский В. В.,
Сердюк С. С., Самородская М. А.**

Прогнозирование новых
золотороссыпных объектов на юго-
западном окончании Куртушибинской
металлогенической зоны на основании
цифрового анализа рельефа

5

**Самсонов А. А., Бурмистров А. А.,
Тельнов А. Е.**

Минерально-сырьевой потенциал
и комплексное использование
природных и техногенных
месторождений вольфрама
Джидинского рудного поля
(г. Закаменск, Республика Бурятия)

17

СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Ганжа Г. Б., Арсентьева И. В.

Поведение органического вещества
и золота в условиях складчатых
деформаций

36

Степанов В. А., Мельников А. В.

Геологические и изотопные
реперы возраста месторождений
Соловьёвского золоторудного центра
Приамурской провинции

62

Старостин И. А.

«Скрытая» минералого-геохимическая
зональность месторождения
Кызык-Чадр (Республика Тыва)
по данным лазерного микроанализа
сульфидов

78

APPLIED METALLOGENY

**Makarov V. A., Babintsev N. A.,
Losev V. I., Mezhubovsky V. V.,
Serdyuk S. S., Samorodskaya M. A.**

Forecasting for new lode-placer gold
objects in the southwestern ending
of the Kurtushibinsky metallogenic zone,
based on the digital relief analysis

**Samsonov A. A., Burmistrov A. A.,
Tel'nov A. E.**

Potential mineral resources
and multi-component use of natural
and technogenic tungsten deposits
of the Dzhida ore field (city of Zakamensk,
Republic of Buryatia)

GEOLOGY OF THE ORE DEPOSITS

Ganzha G. B., Arsentieva I. V.

Behavior of organic matter
and gold under conditions of folding
deformations

Stepanov V. A., Melnikov A. V.

Geological and isotopic reference
points of the age of gold deposits
of the Solovyovsky gold ore center
in the Amur province

Starostin I. A.

“Hidden” mineralogical-geochemical
zonality revealed by the laser microanalysis
of sulfides at the Kyzyk-Chadr deposit,
Republic of Tyva

Прогнозирование новых золотороссыпных объектов на юго-западном окончании Куртушибинской металлогенической зоны на основании цифрового анализа рельефа

Макаров В. А.¹, Бабинцев Н. А.², Лосев В. И.^{1,3}, Межубовский В. В.¹, Сердюк С. С.⁴, Самородская М. А.¹

¹ Сибирский Федеральный Университет, г. Красноярск, Россия

² ООО «Андреевское», г. Красноярск, Россия

³ ООО «Нордголд Менеджмент», г. Москва, Россия

⁴ ООО «Сибирская компания разведки недр», г. Красноярск, Россия

Аннотация. В статье на основании построенных карт вершинных и базисных поверхностей разных уровней сделаны выводы об истории развития рельефа в пределах Куртушибинской металлогенической зоны. Выделены области сноса и накопления рыхлого материала на разных этапах. Построен контур ранее не выделявшейся потенциально золотоносной палеодолины р. Гагуль. Сделаны выводы о перспективах золотоносности данной палеоструктуры и сопряжённых с ней современных систем аллювиальных отложений. Выделены наиболее перспективные для постановки поисковых работ на россыпное золото участки.

Ключевые слова: Западный Саян, Куртушибинский хребет, Андреевское месторождение, Эйлигхемское месторождение, золото, россыпь.

Для цитирования: Макаров В. А., Бабинцев Н. А., Лосев В. И., Межубовский В. В., Сердюк С. С., Самородская М. А. Прогнозирование новых золотороссыпных объектов на юго-западном окончании Куртушибинской металлогенической зоны на основании цифрового анализа рельефа. Руды и металлы. 2024. № 1. С. 5–16. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10001.

Forecasting for new lode-placer gold objects in the southwestern ending of the Kurtushibinsky metallogenic zone, based on the digital relief analysis

Makarov V. A.¹, Babintsev N. A.², Losev V. I.^{1,3}, Mezhubovsky V. V.¹, Serdyuk S. S.⁴, Samorodskaya M. A.¹

¹ Siberian Federal University, Novosibirsk, Russia

² Andreevskoye LLC, Krasnoyarsk, Russia

³ Nordgold Management LLC, Moscow, Russia

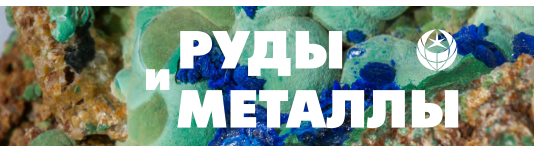
⁴ Siberian Subsoil Exploration Company LLC, Krasnoyarsk, Russia

Annotation. The article provides conclusions on the history of development of the topography within the Kurtushibinsky metallogenic zone, based on compilation of maps of the vertex and base surfaces of different levels. The areas of erosion and accumulation of loose material, took place at different phases, have been distinguished. The outlines of the potentially gold-bearing Gagul River paleovalley were drawn, that was not previously identified. The prospect for gold of this paleostructure and its associated recent alluvial systems has been concluded. The sites most promising for placer gold exploration have been outlined.

Keywords: Western Sayan, Kurtushibinsky ridge, Andreevsky deposit, Eilig-Khem deposit, gold, placer.

For citation: Makarov V. A., Babintsev N. A., Losev V. I., Mezhubovsky V. V., Serdyuk S. S., Samorodskaya M. A. Forecasting for new lode-placer gold objects in the southwestern ending of the Kurtushibinsky metallogenic zone, based on the digital relief analysis. Ores and metals, 2024, № 1, pp. 5–16. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10001.





Введение. Куртушибинская металлогеническая зона (МЗ) находится на границе Красноярского края и Республики Тыва. Ключевым объектом промышленной разработки здесь исторически являлись россыпи золота, первые упоминания о которых датируются XIX в. Россыпи расположены в бассейнах рек Енисей (Верхний Енисей) и Ус, разделённых главным водоразделом площади – Куртушибинским хребтом, вытянутым в северо-восточном направлении. Его склоны размываются многочисленными правыми притоками Енисея и левыми притоками Уса. Наиболее крупные золотороссыпные объекты на юго-западе Куртушибинской МЗ выявлены в бассейнах рек Эйлиг-Хем, Урбун, Золотая, Тёплая и Макаровка, они обрабатывались с первой половины XX в. По данным фондовых материалов (А. Я. Вамбольдт, 1995), в общей сложности из бассейнов этих рек и их притоков на конец XX в. добыто около 8 т золота. Старательская отработка россыпей (в том числе техногенных) в бассейне р. Эйлиг-Хем продолжалась до 2007 г.

На сегодняшний день в данном регионе прогноз новых россыпных объектов с применением традиционных поисковых приёмов исчерпал себя, при этом интерес недропользователей к металлогенической зоне не снижается, что диктует необходимость применения оригинальных методик. Цель настоящего исследования – прогнозирование новых россыпей золота в пределах изученной территории на основании цифрового анализа рельефа в двухмерных программных средах.

Геологическая характеристика. Район исследования располагается в зоне сочленения нескольких крупных геоструктур, имеющих свои особенности стратиграфического разреза и тектонического строения (рис. 1): Куртушибинского офиолитового пояса (ОП), Центрально-Саянской (Джебашско-Амыльская подзона) и Хемчикско-Систигхемской структурно-формационных зон (СФЗ).

В Куртушибинском ОП выделены коярдская толща натровых базальтов верхнего рифея (?), карбонатно-терригенно-сланцево-табазальтовая макаровская толща венда (?) и орешская толща нижнего кембрия.

В Центрально-Саянской СФЗ выделена Джебашско-Амыльская структурно-формационная подзона (СФЗ), представленная терригенно-метабазальтово-кремнистой амыльской свитой венда–нижнего кембрия.

Хемчикско-Систигхемская СФЗ описывается без деления на подзоны, в ней выделяются нерасчленённые венд-нижнекембрийские отложения кремнисто-вулканогенной эжимской толщи, кембрийские отложения карбонатно-терригенной баянкольской свиты и карбонатно-терригенной молассовой с элементами пирокластической аласугской серии, а также ордовикские карбонатно-терригенные отложения шемущдагской и малиновской серий.

Разрез завершается аллювиальными, фрагментарно распространёнными водно-ледниковыми и моренными отложениями неоплейстоцена и голоцена. Аллювий представлен отложениями русла, поймы и трёх надпойменных террас, верхние из которых условно отнесены к верхнему звену неоплейстоцена, а нижние – к голоцену. Также, по последним данным, в районе работ значительно шире, чем это отражено в материалах геологического картирования, распространены мощные покровы рыхлых четвертичных отложений. Они представляют собой многоуровневые полигенные комплексы мощностью до 30 м, которые обнаруживаются как в долинах водотоков, так и на склонах Куртушибинского хребта.

В районе широко распространены кембрийские двухфазные интрузии габбро-тоналит-плагиогранитной формации, условно отнесённые к майнскому комплексу, а также более молодые силурийские интрузии бичебалыкского габбрового и большепорожнинского гранитоидного комплексов, которые нередко пространственно совмещены в сложнопостроенных массивах.

Тектоническая структура района определяется наличием серии протяжённых субширотных надвигов, обрамляющих структуры Куртушибинского ОП и трансформных субмеридиональных сдвиго-сбросов, сочетание которых формирует сложное блоково-чешуйчатое строение со сложночитаемыми исходными пликативными структурами.

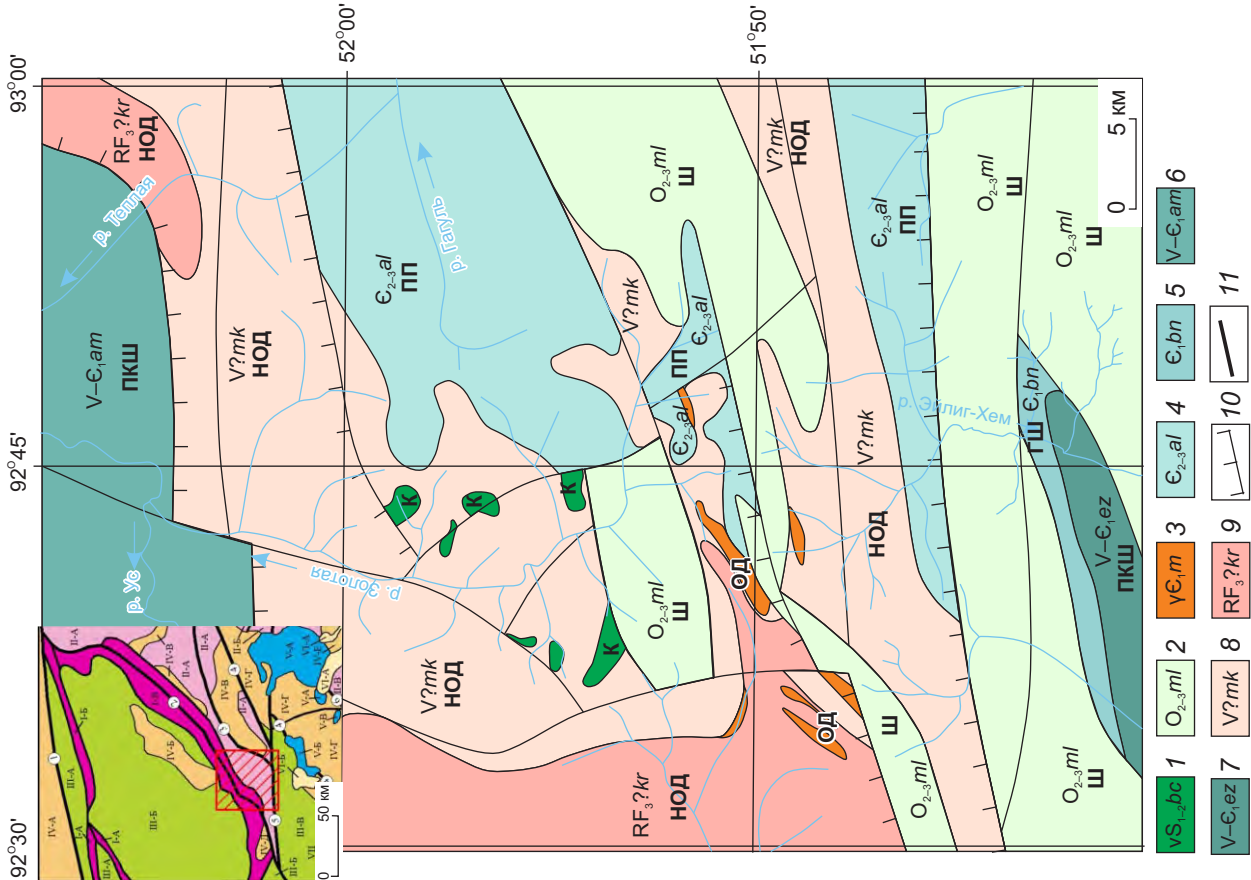


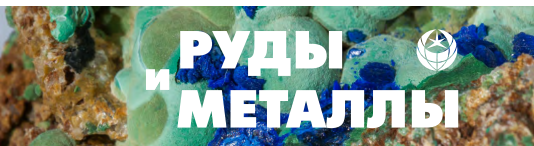
Рис. 1. Геологическая карта юго-западного окончания Куртушинской МЗ:

1 – силурийские интрузии габбро-гранитной формации большепоржнинского и бичебалыкского комплексов; 2 – ордовикские карбонатно-терригенные отложения малиновской и шемущагской серий; 3 – кембрийские интрузии габбро-тоналит-плагиогранитной формации майнского и куртахского комплексов; 4 – позднемембрийские отложения карбонатно-терригенной молассовой с элементами пирокластической аласугской серии; 5 – раннекембрийские отложения карбонатно-терригенной байанкольской свиты; венд-раннекембрийские отложения: 6 – терригенно-метабазально-кремнистой амыльской свиты, 7 – кремнисто-вулканогенной эжимской толщи, 8 – терригенно-кремнисто-сланцево-метабазальтовых орешской и макаровской толщ; 9 – верхнерифейские метабазальты коярдской толщи; 10 – надвиги; 11 – разломы прочей морфологии; геодинамические обстановки: К – коллизии, Ш – шельфа пассивной окраины, ОД – островной дуги, ПП – преддуговых прогибов, ГШ – глубоководного шельфа, ПКШ – подножия континентального шельфа, НОД – незрелых островных дуг; на врезке – положение фрагмента в структурах Западного Саяна

Fig. 1. Geological map of the southwestern ending of the Kurtushibinsky metallogenic zone:

1 – Silurian intrusions of the gabbro-granite association of the Bolsheporzhninsky and Bichebalyksky suites; 2 – Ordovician carbonate-terrigenous deposits of the Malinovskaya and Shemushdag series; 3 – Cambrian intrusions of the gabbro-tonalite-plagiogranite association of the Mainsky and Kurtakhsy suites; 4 – Late Cambrian deposits of the carbonate-terrigenous pyroclastic molasses of the Alasug series; 5 – Early Cambrian deposits of the carbonate-terrigenous Bayankolsky formation; 6 – Vendian-Early Cambrian deposits of the terrigenous-metabasalt-siliceous Amyl formation; 7 – Vendian-Early Cambrian deposits of the cherty-volcanogenic Edzinsk sequence; 8 – Vendian-Early Cambrian deposits of the terrigenous-cherty-shaly-metabasalt Oreshskaya and Makarovskaya sequences; 9 – Late Riphean metabasalts of the Koyard sequence; 10 – thrusts; 11 – faults of other types; The letter designations before the ages of the formations characterize the geodynamic settings: K – collisions; Ш – shelf of the passive margin; ОД – island arc; ПП – fore-arc troughs; ГШ – deep-sea shelf; ПКШ – foot of the continental shelf; НОД – immature island arcs. The inset shows the position of the fragment in the Western Sayan structures





Золотоносность. Коренная золотоносность района связана с двумя рудными полями (Андреевским и Эйлиг-Хемским) и тремя перспективными рудными зонами, которые выделены по комплексу критериев и признаков (Хайлыкская, Атысская и Валентиновская).

Андреевское и Эйлиг-Хемское рудные поля приурочены к двум параллельно расположенным изоклинальным выступам Хайлыкской антиклинали, в ядре которой вскрываются метавулканиды коярдской толщи, вверх по разрезу сменяющиеся вулканогенно-осадочными, а затем осадочными сериями макаровской и орешковской толщ. Рудные поля наследуют структуры вмещающих толщ и приурочены к субширотным разрывным нарушениям и линейным интрузиям двухфазного майнского комплекса. В их пределах закартированы кулисообразно расположенные субпараллельные рудные зоны, характер оруденения в которых закономерно изменяется от осей изоклиналей к их крыльям: в осевой части складок рудные зоны представляют собой серии узких изолированных и интенсивно тектонизированных кварцево-жильных тел, а на крыльях – обширные зоны метасоматоза, в ядерных частях которых обнаруживаются полнопроявленные березиты либо листвениты (в зависимости от состава субстрата). Рудные зоны обнаруживаются как в стратифицированных вулканогенно-осадочных толщах, так и внутри контуров двухфазных габбро-плагиогранитных интрузивов. С последними рудные тела имеют парагенетическую связь, однако руды обнаруживаются и на отдалении 1–2 км от интрузий.

Руды объектов характеризуются средними содержаниями Au на уровне 1,1–2,7 г/т, а на Эйлиг-Хемском рудном поле также периодически отмечается Ag в концентрациях первые г/т. Руды относятся к золото-малосульфидно-кварцевому типу, подавляющая часть золота в рудах находится в свободной форме, причём около 35 % – золотины класса +0,1 мм. Форма нахождения золота, расчленённость и разнообразие рельефа делают эти объекты превосходным источником для формирования россыпей.

Современные работы оценивают суммарные ресурсы рудного золота Андреевского и

Эйлиг-Хемского рудных полей по кат. P_1 и P_2 в 60 т (Н. Б. Кононенко, 2012; В. К. Оябрь, 2013).

Хайлыкская перспективная рудная зона расположена в бассейне ручьёв Большой и Малый Хайлык. Здесь обнаруживаются тектонизированные и лиственитизированные метавулканиды коярдской толщи, обогащённые сульфидами, в которых отмечены содержания золота до 0,4 г/т. Объекты относятся к золото-сульфидному типу, изучены слабо.

Валентиновская перспективная рудная зона располагается между ручьями Весёлый и Валентиновский и р. Гагуль. Здесь известно Успенское проявление золота, расположенное в приустьевой части одноимённого ручья и представляющее собой жильно-прожилково-вкрапленную малосульфидно-кварцевую зону в толще чёрных сланцев, где отмечены содержания золота 0,2–2,2 г/т. Прочие объекты этой зоны – разрозненные пункты прожилково-вкрапленной сульфидно-кварцевой минерализации с содержаниями золота до 0,4 г/т в экзоконтакте габбро-гранитного массива.

Атысская перспективная рудная зона располагается в бассейнах рек Малый и Большой Атыс и выделена по косвенным геолого-геохимическим признакам. Детально не изучалась.

Как видно на рис. 2, всем вышеперечисленным рудным полям и перспективным зонам сопутствуют ранее выявленные и в основном отработанные россыпи золота. Исключение составляет россыпь р. Тёплой, причины чего будут описаны в выводах. В районе работ известны три типа аллювиальных россыпей: русловые, долинные и террасовые.

Русловые россыпи распространены на участках рек, текущих на коренном ложе со слабо развитым аллювием (мощность 1–2 м). Отрабатывались в начале XX в. в связи с лёгкой доступностью и в данный момент интереса не представляют из-за крайне малых объёмов.

Террасовые и долинные россыпи представляют собой связанную систему, постепенно эволюционирующую во времени. **Террасовые россыпи** отмечаются на всех трёх уровнях террас в районе работ, однако они существенно отличаются по продуктивности. Россыпи третьей надпойменной террасы промышленного

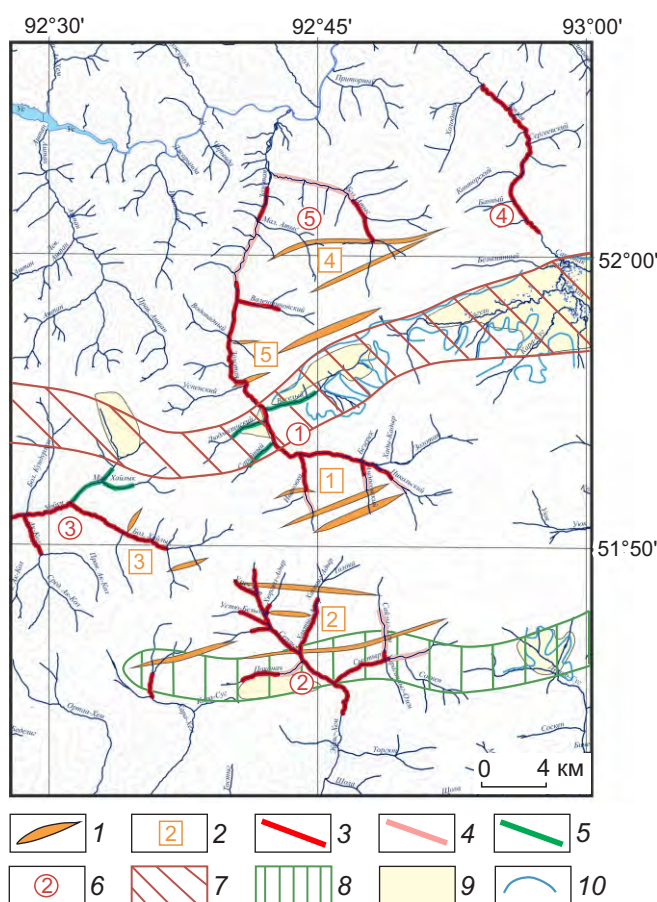
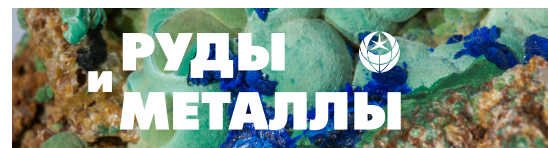


Рис. 2. Схема размещения золоторудных и россыпных объектов с результатами цифрового анализа рельефа и прогнозом россыпной золотоносности:

1 – золоторудные зоны; 2 – рудные поля (1 – Андреевское, 2 – Эйлиг-Хемское, 3 – Хайлыкское, 4 – Атысское, 5 – Валентиновское); аллювиальные россыпи: 3 – выявленные и обрабатывавшиеся ранее, 4 – прогнозируемые традиционными приёмами, 5 – прогнозируемые по цифровому анализу рельефа; 6 – системы россыпей бассейнов рек: 1 – Золотая, 2 – Эйлиг-Хем, 3 – Урбун, 4 – Тёплая, 5 – Атыс; контуры, выделенные цифровым анализом рельефа: 7 – золотоносной Гагульской палеодолины, 8 – Серлигской зоны новейших тектонических подвижек; 9 – четвертичные отложения неустановленного генезиса (мощность > 10 м); 10 – вогнутые перегибы рельефа, очерчивающие контуры современных внутригорных впадин

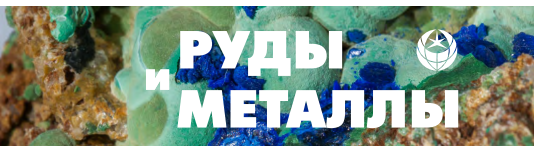
Fig. 2. Schematic map showing the lode and placer gold objects, with results of the digital relief analysis and a forecast for the placer gold-bearing potential:

1 – zones of primary gold mineralization; 2 – ore fields (1 – Andreevskoe, 2 – Eilig-Khemscoe, 3 – Khailykское, 4 – Atysское, 5 – Valentinovskoe); alluvial placers: 3 – discovered and mined by predecessors, 4 – forecasted using traditional techniques, 5 – forecasted based on the digital relief analysis; 6 – river basin placer systems: 1 – Zolotaya, 2 – Eilig-Khem, 3 – Urbun, 4 – Teplaya, 5 – Atys); 7 – gold-bearing Gagul paleovaley outlines distinguished based on the digital relief analysis; 8 – outlines of the Serligskaya zone of the neotectonic movements, distinguished based on the digital relief analysis; 9 – fields of quaternary sediments of unidentified genesis in excess of 10 m thick; 10 – concave relief inflections outlining recent intra-mountain depressions

интереса не представляют, так как содержания золота в них на уровне десятков мг/м³. В пределах второй надпойменной террасы отмечаются содержания до первых сотен мг/м³, а первые надпойменные террасы характеризуются уже средними содержаниями на уровне 400–600 мг/м³. Строение россыпей на всех террасах идентичное – золото приурочено к спаевой части аллювиальных отложений и коренных пород. Сами террасы при этом зачастую перекрыты чехлом делювиально-солифлюкционных отложений, мощность которых закономерно растёт от нижних террас к верхним и достигает участками десятков метров.

Долинные россыпи наиболее продуктивны и характеризуются на отдельных участках средними содержаниями в первые г/м³. Они

неоднородны, и их строение зависит в первую очередь от геоморфологических условий. В пределах относительно узких долин формируются простые россыпи с мощностью аллювия 4–6 м и одним маломощным (0,5–1 м) золотоносным пластом в спаевой части на плотике коренных пород. В пределах широких межгорных впадин (например, в среднем течении р. Золотой и в верхнем течении р. Эйлиг-Хем) отмечается сразу несколько уровней террас, а плоские долины 400–600 м шириной характеризуются двухуровневым строением: в основании разреза залегает высокоглинистый горизонт более древнего аллювия (возможно, переработанная кора выветривания), а сверху на нём с размывом – современный галечно-песчаный аллювий. Сама россыпь здесь так-



же сложного строения: самый продуктивный пласт залегает в подошве современного аллювия на плотике глинистых отложений и достигает мощности 2 м при средних содержаниях 500–1500 мг/м³, а в нижележащем глинистом аллювии золото отмечается в виде линзовидных залежей как на плотике коренных пород, так и выше по разрезу. Характерно, что содержания золота в верхнем горизонте в несколько раз больше, чем в глинистых отложениях основания разреза.

Анализируя строение долинных и террасовых россыпей, следует отметить, что здесь наблюдается их отчётливая эволюция, заключающаяся в последовательном обогащении аллювия при изменении базиса эрозии. Каждый последующий уровень аллювиальных отложений (от верхних террас к современным поймам) становился всё богаче золотом, и этот процесс, по-видимому, продолжается и сейчас. При этом россыпи в ходе переотложения не переносились на большие расстояния, а оставались на удалении не более нескольких километров от коренного источника. С учётом относительно слабой эрозионной проработки в районе расположения коренных объектов можно сделать вывод о том, что ключевой фактор продуктивности россыпи в районе – именно геоморфологические особенности, а не собственно степень эрозии рудных зон. В межгорных впадинах с мощным сложнопостроенным чехлом рыхлых отложений отмечается не только самый большой объём золотоносных песков, но и самые высокие содержания золота. Яркий пример – межгорная впадина в среднем течении р. Золотой, находящаяся на удалении 5–10 км от коренного источника и характеризующаяся самыми богатыми отложениями, которые резко истощаются сразу по выходу реки из этой геоморфологической структуры.

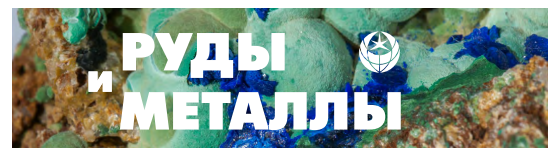
Вышеописанные долинные россыпи практически полностью отработаны (за исключением части верховий р. Золотой и её притоков); террасовые россыпи, представляющие промышленный интерес, также отработаны.

Методика исследований. Расположение коренных источников золота в пределах изу-

ченной территории таково, что большая часть водотоков является потенциально золотоносными (см. рис. 2), и, как указывалось выше, решающую роль в формировании россыпей здесь играют геоморфологические особенности того или иного участка водотока. Опираясь на опыт разработки россыпей района, мы сделали вывод, что наибольший интерес здесь представляют площадные структуры, в которых сочетается несколько уровней рыхлых отложений. Цель данного исследования – на основании цифрового анализа рельефа выявить ранее не описанные крупные геоморфологические палеоструктуры, которые не определяются методами традиционной визуальной оценки современного состояния рельефа: древние долины рек, озёра, межгорные впадины, фрагменты которых сохранились до наших дней.

На основании рельефа топокарт масштаба 1 : 50 000 с помощью соответствующих инструментов ArcGIS были построены цифровая модель рельефа (ЦМР), серия производных синтетических карт, профили поверхности разного направления и продольные профили речных русел. Выполнен морфометрический анализ рельефа с выделением хребтов и тальвегов. Порядок объектов определялся по методу Страхлера (порядок повышается при встрече двух линий одинакового порядка). Векторные объекты хребтов и тальвегов впоследствии были переведены в серии точек, расположенных на расстоянии 10 м друг от друга. Для всех точек по цифровой модели рельефа были определены абсолютные высоты.

На основании точечных объектов средствами ArcGIS были построены карты вершинных и базисных поверхностей разных порядков. Под базисными подразумеваются поверхности, соединяющие поймы рек и тальвеги оврагов, под вершинными – соединяющие точки вершин и линии хребтов. Поверхность первого порядка построена по всем объектам, кроме объектов нулевого порядка, аналогично поверхность второго порядка построена без объектов первого порядка, и так далее. Чем выше порядок базисной или вершинной поверхности, тем более древний этап развития релье-



фа она представляет. Поверхности высоких порядков помогают составить впечатление о форме земной поверхности, существовавшей в более ранние периоды. На основании базисных поверхностей можно наглядно продемонстрировать процессы эрозии, вершинные поверхности, в свою очередь, показывают относительно равновесные участки рельефа.

Далее построены карты разности вершинных и базисных поверхностей одного порядка, которые иллюстрируют крупные геоморфологические структуры ранних периодов, поиск которых и является целью анализа рельефа. Выявленные палеоструктуры анализировались на перспективность обнаружения золотороссыпных объектов на основании традиционных поисковых критериев и признаков.

Результаты анализа рельефа. Визуальный анализ ЦМР показывает, что на облик рельефа исследуемой территории сильное влияние оказывает геологическое строение. Древние геологические структуры определяют общий облик поверхности, а новейшие тектонические нарушения оказывают влияние на русла рек и положение эрозионных врезов. Так, например, обращает на себя внимание изломанная конфигурация долин рек Беделиг, Орта-Хем, Кара-Хем и Эйлиг-Хем, по которым уверенно трассируется новейшее тектоническое движение, произошедшее, когда долины ручьёв были уже хорошо сформированы.

Характерной особенностью территории, отличающей её от типичных горных ландшафтов, является широкое распространение ландшафтов эрозионного и денудационного накопления. На исследуемой территории такие участки, где накапливаются рыхлые продукты выветривания, местами образуют обширные плоские, часто заболоченные равнины, резко очерченные крутыми денудационно-эрозионными склонами. По своей конфигурации они напоминают широкие ледниковые трогги – долины с широким плоским дном и крутыми бортами. Сходная с ледниковой форма долин образовалась тут благодаря заполнению долин, которые уже были глубокими, большим количеством рыхлых отложений. Такие ландшафты можно назвать внутригорными впадина-

ми. Так как изучение этих элементов затруднено, а в рельефе они не всегда хорошо читаются, разные авторы дают разные контуры на геологических картах и различные геолого-генетические характеристики, от ледниковых до аллювиальных.

История развития рельефа была воссоздана на основе исследования карт базисных и вершинных поверхностей (рис. 3) первого, второго и третьего порядков по описанной выше методике. Карта разностей уровня вершинных поверхностей (рис. 4, а) отражает области, которые в разное время формирования современного рельефа были благоприятны для осадконакопления. Для оценки интенсивности эрозионных процессов показательна построенная карта разности вершинных и базисных поверхностей (см. рис. 4, б). Области с высокой разностью характеризуются длительным и активным развитием современных процессов эрозии. Напротив, области низкой разности характеризуются равновесным состоянием.

По результатам анализа указанных выше карт можно отметить следующее:

1. Наиболее древние и устойчивые области осадконакопления соответствуют крупным водотокам: рекам Ус, Тёплая, Золотая, Эйлиг-Хем и руч. Демир-Суг. Однако по разностям уровня вершинных поверхностей отчётливо выделяется область в створе р. Гагуль – руч. Весёлый – руч. Людмилинский – руч. Малый Хайлык, которая не соотносится ни с геологическими, ни с современными геоморфологическими элементами (см. рис. 4, а);

2. Вышеописанной области в створе р. Гагуль и руч. Малый Хайлык соответствует равновесная область низкой активности эрозионных процессов (см. рис. 4, б), что в комплексе с положением параллельно долинам рек Ус и Верхний Енисей позволяет определять её как речную палеодолину. Она трассируется фрагментарно закартированными мощными отложениями рыхлого комплекса, которые описаны как отложения верхних террас, флювиогляциальные или просто нерасчленённые четвертичные;

3. Схожая равновесная область выделена в субширотном направлении в верховьях рек

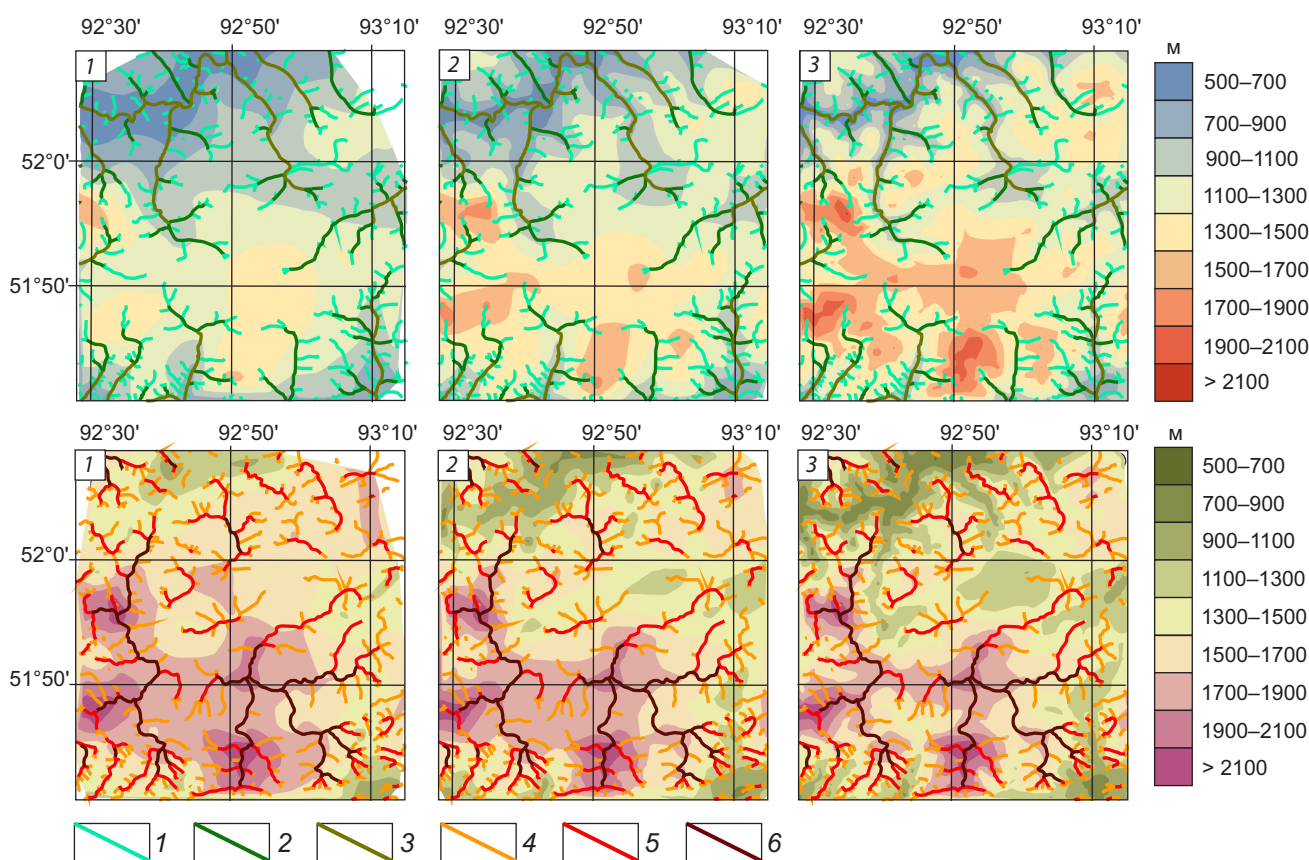


Рис. 3. Карты уровней базисных (сверху) и вершинных (снизу) поверхностей: 1 – 3-го порядка, 2 – 2-го порядка, 3 – 1-го порядка:

талвеги: 1 – 3-го порядка, 2 – 4-го порядка, 3 – > 5-го порядка; хребты: 4 – 3-го порядка, 5 – 4-го порядка, 6 – > 5-го порядка

Fig. 3. Maps of the levels of the base (top) and vertex (bottom) surfaces: 1 – third-order, 2 – second-order, 3 – first-order: thalwegs: 1 – 3rd order, 2 – 4th order, 3 – > 5th order; ridges: 4 – 3rd order, 5 – 4th order, 6 – > 5th order

Орта-Хем – Кара-Хем – Эйлиг-Хем – Кара-Суг, однако здесь она, вероятно, связана с новейшими тектоническими движениями и для неё нехарактерна большая разность уровней вершинных поверхностей. При этом область также трассируется фрагментарно закартированными мощными отложениями рыхлого комплекса.

Таким образом, по результатам анализа рельефа выделены Гагульская речная палеодолина (древний водоток, параллельный рекам Ус и Верхний Енисей) и Серлигская зона новейших тектонических подвижек, вдоль которой активизировались процессы осадконакопления.

Перспективность золотоносности выявленных структур. Ключевым результатом анализа рельефа стало выявление Гагульской палеодолины (см. рис. 2). Главной современной точкой стока из Гагульской котловины (расположенной в северо-восточном основании палеодолины) является р. Тёплая, долина которой практически на всём протяжении разрабатывалась старателями-золотопромышленниками. При этом многочисленные и довольно детальные поиски рудного золота в верховьях р. Тёплой не увенчались успехом, и, более того, здесь после проведения полного комплекса опережающих поисковых работ отсутствуют значимые признаки золотого оруденения. Это,

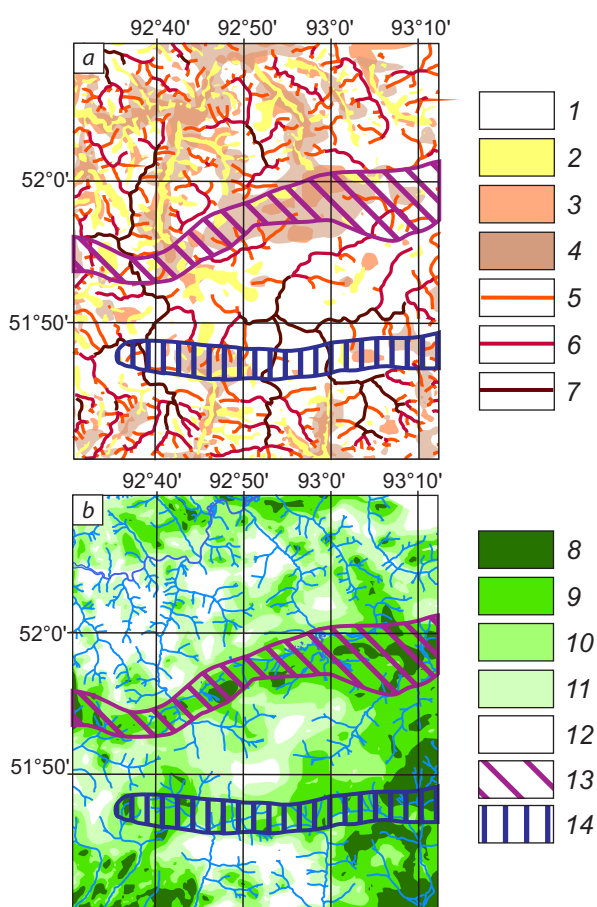
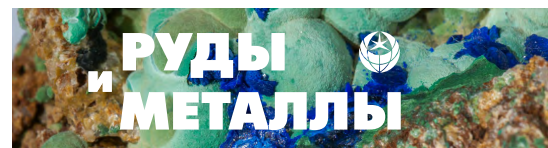


Рис. 4. Карты разностей уровней соседних вершинных поверхностей (а) и вершинных и базисных поверхностей 2-го порядка (б):

a: 1 – любых порядков < 150 м, 2 – нулевого и 1-го порядков > 150 м, 3 – 1-го и 2-го порядков > 150 м, 4 – 2-го и 3-го порядков > 150 м; хребты: 5 – 3-го порядка, 6 – 4-го порядка, 7 – > 5-го порядка;

b: 8 – < 200 м, 9 – 200–300 м, 10 – 300–400 м, 11 – 400–500 м, 12 – > 500 м; выделенные на основе цифрового анализа рельефа: 13 – контур золотоносной Гагульской палеодолины; 14 – контур Серлигской зоны новейших тектонических подвижек

Fig. 4 – Maps showing the level differences: between the neighboring vertex surfaces (a) and between vertex and base surfaces of the second order (b):

a: 1 – of any order < 150 m, 2 – of the zero and 1st orders > 150 m, 3 – of the 1st and 2nd orders > 150 m, 4 – of the 2nd and 3rd orders > 150 m; ridges: 5 – of the 3rd order, 6 – 4th order, 7 – > 5th order;

b: 8 – < 200 m, 9 – 200–300 m, 10 – 300–400 m, 11 – 400–500 m, 12 – > 500 m; isolated on the basis of digital terrain analysis: 13 – map of the gold-bearing Gagul paleodoline; 14 – contour of the Serliga zone of the latest tectonic movements

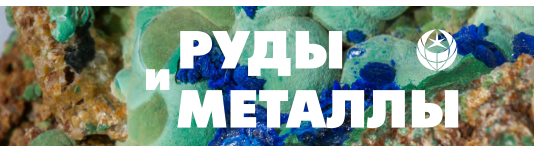
а также факт высокой степени окатанности золота на всём протяжении россыпи р. Тёплой позволяет сделать вывод, что источником золота для её россыпи являются рыхлые отложения Гагульской палеодолины, которая золотоносна сама по себе. Этот факт объясняет и наличие необычайно богатого золотом участка р. Золотой в месте пересечения с палеодолиной. Он расположен на расстоянии 10 км от коренного источника, не характеризуется наличием геоморфологических ловушек, но является самым богатым на р. Золотой.

При этом наиболее сохранный часть палеодолины (Гагульская котловина), во-первых, находится на территории одноимённого заказника (а значит, в обозримом будущем не может быть объектом геологоразведки), а во-вторых, представляет собой долину в несколько километров шириной при мощности отложений рыхлого комплекса 20 м и более. Разведка такого объекта будет крайне затратной, кроме того, судя по материалам изучения верхних террас других водотоков (по сути являющихся реликтами их палеодолин), больших содержаний золота здесь ждать не приходится. Концентратор золота в данном случае – отложения водотоков, которые уже переработали или продолжают перерабатывать отложения палеодолины, а именно:

1. Река Тёплая – современный сток из Гагульской котловины – пересекает её поперёк. Известна богатой россыпью, хотя рекой переработан лишь край палеодолины. В современном виде россыпь реки полностью отработана.

2. Ручей Весёлый, протекающий непосредственно в створе палеодолины. В среднем и верхнем течении закартированы обширные отложения рыхлого комплекса – по-видимому, реликты палеодолины. В нижнем течении древний аллювий переработан полностью. Несмотря на то что в материалах ГГК в приустьевой части ручья отмечена россыпь золота, фактически по материалам предшественников 1920–1940-х гг. установлено, что геологоразведочные работы на руч. Весёлом не проводились.

3. Ручьи Людмилинский и Сарайный, как и Весёлый, протекают в створе палеодолины, размывая её. Здесь в нижнем течении закар-



тированы обширные отложения рыхлого комплекса, которые, судя по положению, являются уже переотложенным древним аллювием. Россыпь не обрабатывалась и не изучалась.

4. Ручьи Малый Хайлык и Большой Кундурлюк аналогично р. Тёплой разрезают палеодолину поперёк. Долина руч. Большой Кундурлюк плохо сформирована, и наличие значимой россыпи маловероятно. В верховьях Малого Хайлыка закартирован реликт палеодолины, в нижнем течении – современный аллювий. Россыпь не обрабатывалась и не изучалась.

Современный аллювий перечисленных водотоков – перспективный источник богатых россыпей. Как показывает опыт разведки и разработки россыпей района, именно из многократно переработанного слабозолотоносного древнего аллювия здесь формируются самые богатые золотороссыпные объекты. При этом с учётом крупных реликтов древнего аллювия в верхних течениях этих водотоков наиболее перспективными фрагментами являются их низовья, полностью сложенные современными отложениями.

Серлигская зона новейших тектонических подвижек трассируется полями современных обширных рыхлых отложений, однако интерес в плане золотоносности они представляют только в районе Эйлиг-Хемского рудного поля, где уже опойсканы и в наиболее интересных фрагментах отработаны. Сама же по себе зона неотектоники с золотоносностью не связана и служить элементом прогноза не может.

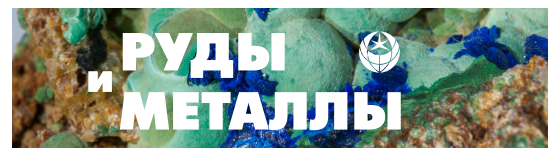
Выводы. Поверхности первого порядка слишком молоды, чтобы отражать историю развития рельефа, однако именно в них находятся современные аллювиальные россыпи. Реконструкция палеоструктур на основании карт поверхностей 2–3-го порядков позволила восстановить историю развития рельефа и выявить участки водотоков, потенциал золотоносности которых связан с вторичной переработкой слабозолотоносного древнего аллювия. На основании анализа современного и реконструированного древнего рельефа сделан вывод о трёхэтапном формировании россыпей района.

На первом этапе были сформированы обширные слабозолотоносные отложения за счёт эрозии коренных источников в пределах Куртушибинской МЗ. Низкий уровень эрозионного среза и обильное осадконакопление обусловили формирование бедных, но обширных россыпей золота. Одной из таких россыпей стала россыпь древнего Гагуля, который, располагаясь параллельно р. Ус, был одним из ключевых водотоков древней гидросети.

На втором этапе формирования рельефа происходит существенное смещение областей эрозии. Древний Гагуль частично входит в гидросеть притоков р. Ус, частично сохраняется в виде заболоченных фрагментов палеодолины на пологих водоразделах. Уже сформированные россыпи перемываются современным аллювием притоков рек Ус и Енисей либо погребаются под мощным слоем отложений разного генезиса. Уровень эрозионного среза крупнейших рудных объектов понижается, и ценный компонент продолжает поступать в россыпь. Этот этап фиксируется по наличию единичных фрагментов с существенно различающейся степенью окатанности золота.

На третьем этапе происходит окончательное уничтожение палеоаллювия за пределами Гагульской котловины. В водотоках вне связи с коренными источниками (р. Тёплая) формируются небольшие, но богатые россыпи, образованные за счёт повторного обогащения палеороссыпи Гагуля. В водотоках, связанных с коренными источниками, происходит формирование наиболее богатых долинных россыпей в реках района. На участке пересечения палеодолины с современной россыпью, в долине р. Золотой, формируется богатейший и по запасам, и по содержаниям фрагмент.

В современном виде самые богатые россыпи, сформированные путём многократного переобогащения более древних, отработаны. Это россыпи долин и нижней террасы рек Золотая, Эйлиг-Хем и Урбун. Более мелкие объекты, сформированные как из первичных источников (верховья рек Золотая и Эйлиг-Хем с притоками), так и из переобогащённого древнего аллювия (р. Тёплая), были выявлены ввиду их лёгкой доступности. Россыпи здесь залегают



неглубоко, а сам аллювий простого строения. На высоких террасах и в погребённых частях долин россыпи известны, однако в связи с относительно низкими содержаниями и большой вскрышей интереса сегодня они не представляют.

Реконструкция границ Гагульской палеодолины позволяет прогнозировать ранее невыявленные россыпи в долинах ручьёв Весёлый, Людмилинский, Сарайный и Малый Хайлык. Золотопромышленники начала XX в. пытались изучать эти водотоки, но их старания не увенчались успехом ввиду сложного разреза

и несовершенства технических средств. Сегодня же на основании комплексного анализа выделены фрагменты водотоков (см. рис. 2), рекомендованные к первоочередному изучению. Ключевыми критериями выделения данных фрагментов стало пересечение ими золотоносной Гагульской палеодолины и наличие хорошо проработанной долины. Учитывая, что количество переработанного материала палеороссыпи в долинах ручьёв Весёлый, Людмилинский и Сарайный существенно больше, чем в долине р. Тёплой, здесь можно ожидать серию промышленно значимых объектов.

Список литературы

1. Ахмедов Д. А. Характер размещения россыпной золотоносности в Куртушибинской металлогенической зоне (Западный Саян) // Тезисы докладов III Молодёжной научно-образовательной конференции «Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче». – М. : ЦНИГРИ, 2022. – С. 14–19.
2. Бабинцев Н. А. Перспективы золотоносности Хайлыгского рудного узла (Западный Саян) // Материалы X Конференции «Цветные металлы и минералы». – Красноярск, 2018. – С. 1174–1184.
3. Лебедев В. И. Полезные ископаемые Тувы и сопредельных территорий. – М. : ДеЛиБри, 2018. – 494 с.
4. Ляшенко О. В. Сравнительная тектоника Куртушибинского и Восточно-Саянского офиолитовых поясов (Алтае-Саянская складчатая область) : дис. на соискание учён. степ. канд. геол.-минерал. наук. – М., 1984. – 192 с.
5. Монгуш А. А. Геолого-тектоническая схема Тувы и приграничных территорий // Региональная экономика: технологии, экономика, экология и инфраструктура: материалы Международной научно-практической конференции (14–15 октября 2015, Кызыл, Россия) / Отв. ред. Г. Ф. Балакина. – Кызыл : ТувИКОПР СО РАН, 2015. – С. 15–16.
6. Монгуш А. А., Лебедев В. И., Травин А. В., Ярмолюк В. В. Офиолиты Западной Тувы – фрагменты поздневендской островной дуги Палеоазиатского океана // Доклады академии наук. – 2011. – Т. 438, № 6. – С. 796–802.
7. Прудников С. Г. Закономерности размещения россыпей золота в морфоструктурах Тувы и Западного Саяна : специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения» : дис. на соискание учёного степ. канд. геол.-минерал. наук / Прудников Сергей Григорьевич. – Кызыл, 2004. – 282 с.
8. Хертек Ч. М., Прудников С. Г. Сравнительная характеристика россыпного и коренного золота Эйлиг-Хемского золотоносного района Тувы // Природные системы и экономика Центрально-Азиатского региона: фундаментальные проблемы и перспективы рационального использования : материалы конференции. – Кызыл : ТувИКОПР СО РАН, 2017. – С. 109–112.

References

1. Akhmedov D. A. Kharakter razmeshcheniya rossypnoi zolotonosnosti v Kurtushibinskoi metallo-genicheskoi zone (Zapadniy Sayan) [The nature of placer gold content placement in the Kurtushibinsk metallogenic zone (Western Sayan)], *Tezisy dokladov III Molodezhnoi nauchno-obrazovatel'noi konferentsii "Mineral'no-syr'evaya bazaalmazov, blagorodnykh i tsvetnykh metallo-v ot prognoza k dobyche"* [Abstracts of reports of the III Youth Scientific and Educational Conference "Mineral resource base of diamonds, precious and non-ferrous metals – from the forecast to mining"], Moscow, TsNIGRI Publ., 2022, pp. 14–19.
2. Babintsev N. A. Perspektivy zolotonosnosti Khailigskogo rudnogo uzla (Zapadniy Sayan) [Prospects of gold content of the Khailig ore node (Western Sayan)], *Materialy X Konferentsii "Tsvetnye metally i mineraly"* [Materials of the X Conference "Non-

- ferrous metals and minerals*"], Krasnoyarsk, 2018, pp. 1174–1184.
3. Lebedev V. I. Poleznye iskopaemye Tuvy i sopredel'nykh territorii [Minerals of Tuva and adjacent territories], Moscow, De'Libri Publ., 2018, 494 p.
 4. Lyashenko O. V. Sravnitel'naya tektonika Kurtushibinskogo i Vostochno-Sayanskogo ofiolitovykh pojasov (Altai-Sayanskaya skladchataya oblast') [Comparative tectonics of the Kurtushibinsky and East Sayan ophiolite belts (Altai-Sayan folded region): candidate's thesis], Moscow, 1984, 192 p.
 5. Mongush A. A. Geologo-tektonicheskaya skhema Tuvy i prigranichnykh territorii [Geological and tectonic scheme of Tuva and border territories], *Regional'naya ekonomika: tekhnologii, ekonomika, ekologiya i infrastruktura: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (14–15 oktyabrya 2015, Kyzyl, Rossiya)* [Regional economy: technologies, economics, ecology and infrastructure: materials of the International Scientific and Practical Conference (October 14–15, 2015, Kyzyl, Russia)], eds. G. F. Balakina, Kyzyl, TuvIKOPR SO RAN Publ., 2015, pp. 15–16.
 6. Mongush A. A., Lebedev V. I., Travin A. V., Yarmolyuk V. V. Ofiolity Zapadnoi Tuvy – fragmenty pozdnevendskoi ostrovnoi dugi Paleoaziatskogo okeana [Ophiolites of Western Tuva as fragments of a late vendian island arc of the paleoasian ocean], *Doklady akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], 2011, V. 438, No 6, pp. 796–802. (In Russ.).
 7. Prudnikov S. G. Zakonomernosti razmeshcheniya rossypei zolota v morfostrukturakh Tuvy i Zapadnogo Sayana [Patterns of placement of gold placers in the morphostructures of Tuva and Western Sayan: candidate's thesis], Kyzyl, 2004, 282 p.
 8. Khertek Ch. M., Prudnikov S. G. Sravnitel'naya kharakteristika rossypnogo i korenного zolota Eilig-khemsckogo zolotonosnogo raiona Tuvy [Comparative characteristics of placer and indigenous gold of the Eilig-Khem gold-bearing region of Tuva], *Prirodnye sistemy i ekonomika Tsentral'no-Aziatskogo regiona: fundamental'nye problemy i perspektivy ratsional'nogo ispol'zovaniya* [Natural systems and economics of the Central Asian region: fundamental problems and prospects of rational use], Kyzyl, TuvIKOPR SO RAN Publ., 2017, pp. 109–112.

Макаров Владимир Александрович (vmakarov58s@mail.ru)

доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой ¹

Бабинцев Никита Анатольевич

кандидат геолого-минералогических наук, главный геолог ²

Лосев Владимир Иванович

менеджер ГРП ³, аспирант ¹

Межубовский Владимир Владимирович

кандидат геолого-минералогических наук, инженер-исследователь ¹

Сердюк Сергей Станиславович

доктор геолого-минералогических наук, главный геолог ⁴

Самородская Мария Александровна

инженер-исследователь ¹

¹ Сибирский Федеральный Университет, г. Красноярск, Россия

² ООО «Андреевское», г. Красноярск, Россия

³ ООО «Нордголд Менеджмент», г. Москва, Россия

⁴ ООО «Сибирская компания разведки недр», г. Красноярск, Россия

Минерально-сырьевой потенциал и комплексное использование природных и техногенных месторождений вольфрама Дзидинского рудного поля (г. Закаменск, Республика Бурятия)

Самсонов А. А., Бурмистров А. А., Тельнов А. Е.

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Аннотация. В работе приведён обзор опубликованных и фондовых данных по геологическому строению, вещественному составу и разработанным технологиям переработки руд Барун-Нарынского и других техногенных месторождений, образовавшихся в ходе многолетней отработки природных молибденовых и вольфрамовых месторождений Дзидинского рудного поля. На основе статистического анализа этих материалов и аналитических исследований авторов произведена приближённо-количественная оценка минерально-сырьевого потенциала природных и техногенных месторождений района по комплексу широкого спектра попутных компонентов в рудах. Показаны современные возможности комплексной переработки накопленного в этом районе техногенного сырья и перспективы решения существующих проблем в будущем.

Ключевые слова: техногенное месторождение, комплексная переработка минерального сырья, эколого-экономическая оценка.

Для цитирования: Самсонов А. А., Бурмистров А. А., Тельнов А. Е. Минерально-сырьевой потенциал и комплексное использование природных и техногенных месторождений вольфрама Дзидинского рудного поля (г. Закаменск, Республика Бурятия). Руды и металлы. 2024. № 1. С. 17–35. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10002.

Potential mineral resources and multi-component use of natural and technogenic tungsten deposits of the Dzhida ore field (city of Zakamensk, Republic of Buryatia)

Samsonov A. A., Burmistrov A. A., Tel'nov A. E.

Lomonosov Moscow State University, Russia

Abstract. The article provides an overview of published and deposited data on the geological structure, mineral and chemical composition of ores, and the ore processing technologies for the Barun-Naryn and other technogenic deposits formed during long-term exploitation of natural molybdenum and tungsten deposits of the Dzhida ore field. Based on statistical analysis of these data and on author's laboratory analytical studies, the mineral potential of the natural and technogenic deposits of the region was approximately quantitatively assessed for a wide complex of by-product components of the ores. Modern possibilities of multi-element processing of the technogenic raw materials accumulated in this area and outlook for solving the actual problems in the future are demonstrated.

Key words: technogenic deposit, multi-element processing of mineral raw materials, environmental and economic assessment.

For citation: Samsonov A. A., Burmistrov A. A., Tel'nov A. E. Potential mineral resources and multi-component use of natural and technogenic tungsten deposits of the Dzhida ore field (city of Zakamensk, Republic of Buryatia). Ores and metals, 2024, № 1, pp. 17–35. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10002.



Введение. Актуальность изучения и комплексного использования техногенных отходов горнорудной промышленности возрастает с каждым годом. Отходы являются одним из основных факторов нарушения экологического равновесия в биосфере Земли, начавшегося ещё в прошлом столетии. Минерально-сырьевой комплекс ежегодно производит более 200 млрд т горной массы, из которой извлекается, как правило, только очень незначительная часть полезных компонентов [1]. Это прежде всего относится к рудам благородных, цветных, редких и радиоактивных металлов. Большое количество попутных компонентов остаётся в раздробленной массе отвалов и тонкой фракции хвостов обогащения руд и быстро переходит в природную окружающую среду (ОС) под действием ветровой эрозии и поверхностных кислых вод [16]. Полезные попутные компоненты становятся опасными загрязнителями ОС. Процесс их рассеивания (до концентраций меньше ПДК) происходит далеко за пределами площадей складирования этих отходов, а также в населённых пунктах около горных предприятий. Фактор времени (годы и десятилетия) ещё больше усиливает техногенное воздействие.

В экономическом отношении техногенные месторождения имеют следующие преимущества по сравнению с природными: руды техногенных месторождений представляют собой наиболее обогащённые полезными компонентами части отвалов или хвостов обогащения, которые находятся на дневной поверхности на площадях с уже подготовленной инфраструктурой. Основной проблемой их освоения является отсутствие технологических схем комплексной переработки либо слишком большая её стоимость по сравнению с существующими ценами минерального сырья на мировом рынке. Тем не менее, хотя бы частичная переработка техногенных отходов становится всё более реальной благодаря появлению новых технологий. Оставшееся минеральное сырьё может и должно быть изолировано от внешней среды до появления возможности использования его в будущем.

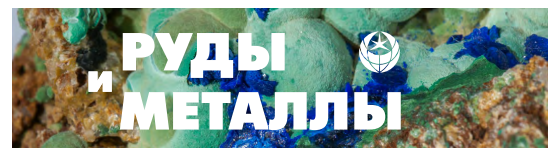
В данной работе предпринята попытка обобщения и анализа имеющейся и дополни-

тельно полученной авторами информации по геологии и геохимии природных и техногенных месторождений полезных ископаемых одного из старейших горнорудных районов России, показаны необходимость и возможность их комплексного изучения и дальнейшего использования.

Краткая геологическая характеристика природных месторождений вольфрама и молибдена Джидинского рудного поля. Природные месторождения изучаемого района представлены двумя штокверковыми рудными объектами – Первомайским молибденовым и Инкурским вольфрамовым, а также жильным Холтосонским вольфрамовым месторождениями, расположенными в непосредственной близости друг от друга и образующими Джидинское рудное поле в 7 км юго-восточнее г. Закаменска.

В геологическом строении Джидинского рудного поля принимают участие хохюртовская осадочно-эффузивная свита (C_1hh), Модонкульский диоритовый массив ($\delta_1\gamma PZ_1d$) и многофазная Гуджирская гранитоидная интрузия ($\gamma_1\gamma T Jq$), с которой связано формирование молибден-вольфрамового оруденения. На дневной поверхности Гуджирская интрузия представлена Первомайским штоком гранит-порфиров (0,35 км²) лакколитообразной формы и роями даек кислого и умеренно-щелочного состава. Среди пород дайкового комплекса наиболее распространены кварцевые сиенит-порфиры и сиениты, значительно уступают им по количеству керсантиты, бостониты и гранит-порфиры. Дайки имеют северо-западное, субширотное, северо-восточное и субмеридиональное простирание при углах падения от 30° и более (рис. 1).

В тектоническом отношении Джидинское рудное поле приурочено к узлу пересечения Джидинского глубинного разлома субмеридионального простирания с региональными зонами разломов субширотного и северо-западного простираний, в совокупности образующими обширную магмо-рудоконтролирующую структуру. Это явилось важным фактором многоэтапного формирования здесь крупных месторождений с комплексной рудной минерализацией (табл. 1–3): ранней штокверковой



полевошпат-кварц-(берилл)-молибденитового состава, развитой в апикальной части Первомайского штока (Первомайское месторождение), поздней штокверковой кварц-мусковит-гюбнеритового состава (Инкурское месторождение) и жильной кварц-гюбнеритовой (Холтосонское месторождение). В жильном поле известно более 200 жил среднего и крутого падения. Инкурское месторождение обрамляет Первомайский массив гранит-порфиров в форме полукольца с юго-западной и западной сторон. Рудный штокверк развит в кварцевых диоритах Модонкульского массива и частично в метаморфизованных осадочно-вулканогенных породах хохюртовской свиты. Штокверк протягивается приблизительно на 2500 м при ширине 800–850 м и разведан на глубину 470–500 м. Вмещающие породы в экзоконтактах рудных жил и прожилков Инкурского месторождения превращены в березиты, которые образуют жило- или линзообразные тела с нечёткими границами, имеют размеры от первых сантиметров до первых десятков метров по мощности. Березитизация выражается в появлении кварц-мусковитовой ассоциации с пиритом, карбонатом и флюоритом, замещающей первичные породы, причём с удалением от прожилков степень березитизации снижается [7].

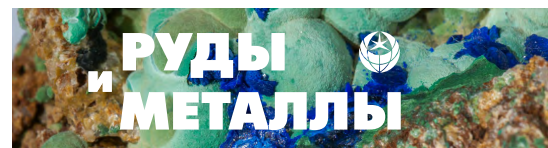
Детальное изучение вещественного состава руд, включающих в технологическом плане как сами жилы и прожилки, так и изменённые вмещающие породы, имеет важное значение для предварительного анализа состава техногенных руд и оценки перспектив их комплексного использования, а также выбора природоохранных мероприятий (ПМ) по защите ОС. Как будет показано ниже, при обогащении руд в концентрат извлекается только часть рудных компонентов, причём это в основном вольфрам и молибден, коэффициенты извлечения которых наибольшие – 70–90 %. В гораздо меньшей степени (особенно в период деятельности Джидинского ВМК) это касается попутных компонентов, многие из которых относятся к I и II классам опасности. Эти компоненты только частично попадают в концентраты с вольфрамитом и молибденитом (содержание в концентратах 60–70 % WO_3 и 50–

55 % Мо соответственно), а также с другими минералами.

Краткая геологическая характеристика, история формирования и изучения техногенных месторождений в районе г. Закаменска. В результате многолетней работы Джидинского ВМК (1936–1996 гг.) добыто и переработано более 40 млн т руды с различным содержанием WO_3 (см. табл. 1) (Технико-экономическое обоснование..., 2011). Это руды Первомайского молибденового, Инкурского и Холтосонского вольфрамовых месторождений. Хвосты обогащения руд складированы в двух хвостохранилищах. Между хвостохранилищами на участке аварийного сброса сформировался третий отвал техногенных отходов (рис. 2).

Первое насыпное хвостохранилище, называемое также Джидинским месторождением, сформировано самотёчным методом и непосредственно примыкает к городской застройке г. Закаменска. Формирование хвостохранилища производилось с 1936 по 1970 г. Оно представляет собой линзовидную залежь песков площадью 660 × 300 м средней мощностью 10,6 м. Впоследствии под влиянием водной эрозии значительная часть материала хвостов мигрировала по долине р. Модонкуль вплоть до её устья с образованием шлейфов делювиально-техногенных, пролювиально- и аллювиально-техногенных песков. Общая протяжённость сформированного к настоящему времени слоя лежалых техногенных песков составляет 6–6,5 км. Объём техногенных песков Джидинского месторождения – около 4 млн т. По своему положению относительно селитебной зоны г. Закаменска оно является основным источником загрязнения окружающей среды. В связи с этим вопрос о переработке техногенных песков Джидинского месторождения необходимо решать с двух точек зрения: как объекта для промышленного освоения и как объекта, подлежащего ликвидации в связи с его повышенной экологической опасностью.

Второе хвостохранилище – Барун-Нарынское месторождение, расположенное в устье р. Барун-Нарын. В результате выполнения ЗАО «Геотехнологии» и специалистами других профильных организаций программы «Технико-экономическая оценка техногенных



phase I ($\delta_1\gamma PZ_1d$): 8 – quartz diorites (δ_1^1), 9 – granodiorites ($\gamma\delta_1^1$), 10 – microdiorites and diorite porphyrites ($m\delta_1\delta\pi$), 11 – plagiogranites (γ_1^3); Kunaley Intrusive Complex ($\xi\xi\pi Tk$): 12 – bostonites ($\xi\pi^4$), 13 – syenite porphyries and quartz syenite porphyries ($\xi_1\pi$, $q\xi\pi^3$); Gudzhir Intrusive Complex ($\gamma_1\gamma\pi Jq$): 14 – leucogranites and granite porphyries ($\gamma_1\gamma\pi_4^1$), 15 – microgranite porphyries ($\gamma\pi_4^2$), 16 – aplite porphyries (i_4^4), 17 – gray syenites (χ_4^5), 18 – Gorkinsky pink granite porphyries ($\gamma\pi_4^3$), 19 – dykes: *a* – in scale and *b* – out of scale; 20 – quartz–huebnerite veins; 21 – hornified quartz veins (barren); 22 – fault zones, in scale; 23 – tectonic fractures, out of scale; 24 – strata attitudes; 25 – boreholes; 26 – outlines of the stockworks: *a* – Inkur, tungsten-bearing, *b* – Pervomaisk, molybdenum-bearing; 27 – outlines of overburden dumps; 28 – outlines of stockwork mining quarries; 29 – outlines of placer mining

отложений обогатительной фабрики Джидинского ВМК», утверждённой правительством Республики Бурятия в 1999 г., было обосновано промышленное значение Барун-Нарынского месторождения как наиболее перспективного и первоочередного объекта работ, в котором сосредоточено более 80 % всех заскладированных отходов Джидинского ВМК. Барун-Нарынское месторождение разведано бурением скважин по сети (160–180) × 100 м, средняя мощность отложений 26 м. Пробурены 44 скважины. Установлены два вида отложений: разнозернистые пески и илы (рис. 3).

Технология обогащения отработана для разнозернистых песков. Обогащение техногенных песков включает гравитацию и флотацию.

Конечный продукт – концентрат вольфрамовый гюбнеритовый флотационный с содержанием WO_3 40 %. Запасы подсчитаны по разнозернистым пескам методом вертикальных разрезов в геологических границах: кат. C_1 пески – 15 617 тыс. т, WO_3 – 21 660 т; кат. C_2 пески – 760 тыс. т, WO_3 – 877 т. Прогнозные ресурсы кат. P_1 по илам составляют 19 023 тыс. т, WO_3 – 18 262 т. По данным ЗАО «Закаменск», в хвостохранилище числится 35 млн т переработанной руды с содержанием WO_3 0,071 %; по данным ОТК обогатительной фабрики, существовавшей ещё в 1995 г., фактическое содержание WO_3 в текущих хвостах составляло не менее 0,1 %, а в последний период работы достигло 0,17 %.

Табл. 1. Характеристика утверждённых остаточных запасов и результатов отработки месторождений Джидинским ВМК [6, 13]

Table 1. Characteristics of the approved residual reserves and of results of mining of the ore deposits by the Dzhida Tungsten-Molybdenum Plant [6, 13]

	Месторождения		
	Инкурское	Холтосонское	Первомайское
Запасы WO_3 кат. C_1 , тыс. т	171	5,7	
WO_3 , % (для кат. C_1)	0,15	0,75	
Запасы WO_3 кат. C_2 , тыс. т	13,6	26,7	
WO_3 , % (для кат. C_2)		0,9	
Забалансовые запасы WO_3 , тыс. т	32,9	0,6	
WO_3 , % (для забалансовых запасов)		0,4	
Отработано руды, млн т	35	5,2	4,3
Произведено концентрата, тыс. т	47	92	17
WO_3 , тыс. т	30,6	60	
Mo, тыс. т			9

Примечание. Значения, определённые по содержаниям WO_3 и Mo в произведённых концентратах, выделены жирным.

Табл. 2. Обобщённый минеральный состав руд Инкурского, Первомайского и Холтосонского месторождений (по [7], с дополнениями авторов)
Table 2. Generalized mineral composition of ores of the Inkursky, Pervomaisky, and Kholtosonsky deposits (modified after [7])

Ассоциации	Минералы		Примеси
Жильные	Главные	Кварц SiO_2	
		Полевой шпат $(\text{K, Na})[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	
Жильные	Второстепенные	Флюорит CaF_2	
		Мусковит $\text{KA}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH, F})_2$	
		Карбонат CaCO_3	
		Розенбергит $\text{AlF}[\text{F}_{0.5}(\text{H}_2\text{O})_{0.5}]_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	
Жильные	Редкие	Топаз $\text{Al}_2[\text{SiO}_4](\text{OH, F})_2$	
		Гюбнерит MnWO_4	(Ta, Nb, Th, Sc)
		Пирит FeS_2	(Co, Ni, As, Cu, Au, Se)
		Халькопирит CuFeS_2	(Se, Tl, Te, Ag, Au)
Рудные	Второстепенные	Сфалерит ZnS	Cd 0,49–0,96 мас. %
		Галенит PbS	(Ag, Bi)
		Тетраэдрит Cu_3SbS_3	Fe – 0,62, Zn – 7,30, Ag – 0,74, Bi до 1,59 мас. %
		Айкинит PbCuBiS_3	(Te, Au)
		Молибденит MoS_2	(Re, Ti, Nb, V, Zn, As, Se, Cu)
		Касситерит SnO_2	(Ta, Nb, Ti, Mn, Zr)
		Шеелит CaWO_4	(Mn, Sr, Nb, Ta, Cr, F, Cu, PЗЭ, Mo, Sr)
		Гессит Ag_2Te	
		Борнит Cu_5FeS_4	
		Берилл $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$	
Рудные	Редкие	Сильванит $(\text{Au, Ag})\text{Te}_4$	
		Петцит Ag_3AuTe_2	
		Линдстремит $\text{Pb}_3\text{Cu}_3\text{Bi}_{7-15}$	
		Хаммарит $\text{Pb}_2\text{Cu}_2\text{Bi}_4\text{S}_9$	
Вторичные	Вторичные	Сульфовисмутит Cu и Ag (Ag, Cu) $_{16}\text{Sb}_2\text{S}_{11}$	
		Монацит $(\text{Ce, La, Th})[\text{PO}_4]$	
		Англезит PbSO_4 Ковеллин CuS	

Примечание. В скобках приведены общераспространённые примеси в указанных минералах.

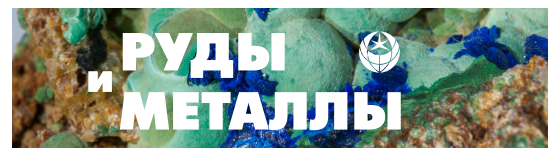


Табл. 3. Результаты химического анализа руд Инкурского месторождения (г/т)

Table 3. Results of chemical analysis of ores of the Inkursky deposit (g/t)

№ пробы	Li	Be	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Hg	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
Ин 525-194	3452	205	3168	166	945	6285	55	304	72	597	30	3110	11	12	24	0	6,1	15	2	8,8	2,2	0,46	2,2
Ин 525-197	2583	30	2963	189	589	11163	17	174	34	495	45	2460	18	16	18	0,01	5,8	14	1,8	8	2,3	0,77	2,5
Ин 362-247.5	459	39	1659	119	71	1189	8	93	171	166	29	1098	50	7	10	0	2,7	5,8	0,75	3,5	1	0,33	0,97
Ин 525-183	112	3	175	16	20	368	1	28	25	109	7	143	3	1	3	0	12	17	1,4	4,6	0,61	0,15	0,61
Ин 362-243	587	75	5883	124	7	1940	81	41	87	279	18	1379	344	13	145	0	31	61	7,7	33	6,6	2,2	6
Ин 525-171	708	33	2003	261	17	1220	12	103	25	145	93	1408	23	19	8	0	4,9	10	1,4	6,2	1,8	0,74	2,7
Ин 525-200	8	0	25	0	7	264	17	130	885	9	1	12	0	0	1	0	0,13	0,28	< 0,1	0,15	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Ин 525-172	1207	58	3352	211	18	1775	22	11	23	176	51	1827	49	14	15	0,04	3	7,2	1,1	4,9	1,8	0,86	2,3
Ин 525-181	391	203	8221	107	7	1529	39	32	67	291	18	968	188	24	183	0	30	62	8,5	38	8,3	2,3	8,2
Ин 525-180	530	51	8139	203	15	2219	33	107	124	405	26	1457	134	19	158	0,01	29	70	9,4	42	8,8	2,8	8,6
№ пробы	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Nb	Mo	Cd	Sn	Sb	Te	Ba	Ta	W	Re	Tl	Pb	Bi	Th	U
Ин 525-194	0,35	2,1	0,41	1,1	0,19	1,4	0,21	0,98	4	14	0	18	0,2	0,4	106	0,2	28	0,01	109	19	20	0,5	1,7
Ин 525-197	0,49	3,6	0,81	2,5	0,62	5,5	1,1	0,76	6	11	3	41	0,1	0,7	125	0,2	29618	2,32	157	19	10	0,9	15,2
Ин 362-247.5	0,19	1,2	0,26	0,73	0,11	0,86	0,15	0,27	3	117	1	25	0,1	0,8	127	0,1	250	0,02	59	150	85	0,3	1,7
Ин 525-183	< 0,1	0,34	< 0,1	0,18	< 0,1	0,22	< 0,1	< 0,1	1	3	1	8	0,2	0,1	24	0,1	595	0,06	1	14	5	1,3	2,5
Ин 362-243	0,72	3,5	0,63	1,4	0,2	1,6	0,23	2,9	5	1	0	6	0,2	0,6	738	0,2	120	0,01	57	68	8	2,8	1,8
Ин 525-171	0,46	3,4	0,72	2,3	0,34	2,8	0,46	0,24	9	31	0	148	0,1	0,7	79	0,1	36	0,01	43	9	4	1	0,9
Ин 525-200	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,05	< 0,1	< 0,1	0	80	1	1	7,6	2,8	0	0,1	12	0,01	1	3760	6593	0	0
Ин 525-172	0,44	3	0,59	1,7	0,29	2,2	0,35	0,39	2	13	1	44	0,1	0,7	175	0,1	795	0,09	75	25	20	0,2	2,2
Ин 525-181	1,16	6,2	1,2	2,9	0,47	3,1	0,51	3,5	7	2	0	3	0,4	0,9	200	0,3	292	0,03	29	55	38	2,7	5,6
Ин 525-180	1,21	6	1	2,6	0,39	2,7	0,43	3,1	8	1	0	8	0,4	0,9	164	0,4	685	0,06	30	28	3	3	8,3

Примечание. Пробы отобраны авторами из керна скважин; выделены цветом элементы, средние содержания которых, по представленным в таблице данным, более чем в 4–5 раз превышают их кларки; исследования выполнены методом ИСП-МС с использованием масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой, адаптированного для работы с системой лазерного пробоя SUPEC 7000, приобретенного по Программе развития МГУ. Аналитик с. н. с. кафедры геохимии И. Ю. Николаева.

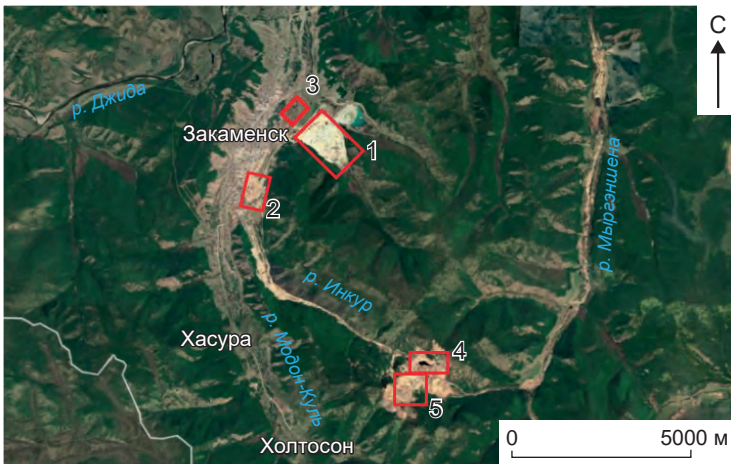


Рис. 2. Схема размещения техногенных объектов в районе г. Закаменск:

техногенные месторождения: 1 – Барун-Нарынское, 2 – Джидинское, 3 – Модонкульское; территории карьеров, штолен и отвалов природных месторождений: 4 – Первомайского, 5 – Инкурского и Холтосонского

Fig. 2. Layout of technogenic objects in the area of Zakamensk:

Technogenic deposits: 1 – Barun-Naryn; 2 – Dzhida, 3 – Modonkul; territories of quarries, adits, and dumps of the natural ore deposits: 4 – Pervomaisky, 5 – Inkursky and Kholtosonsky

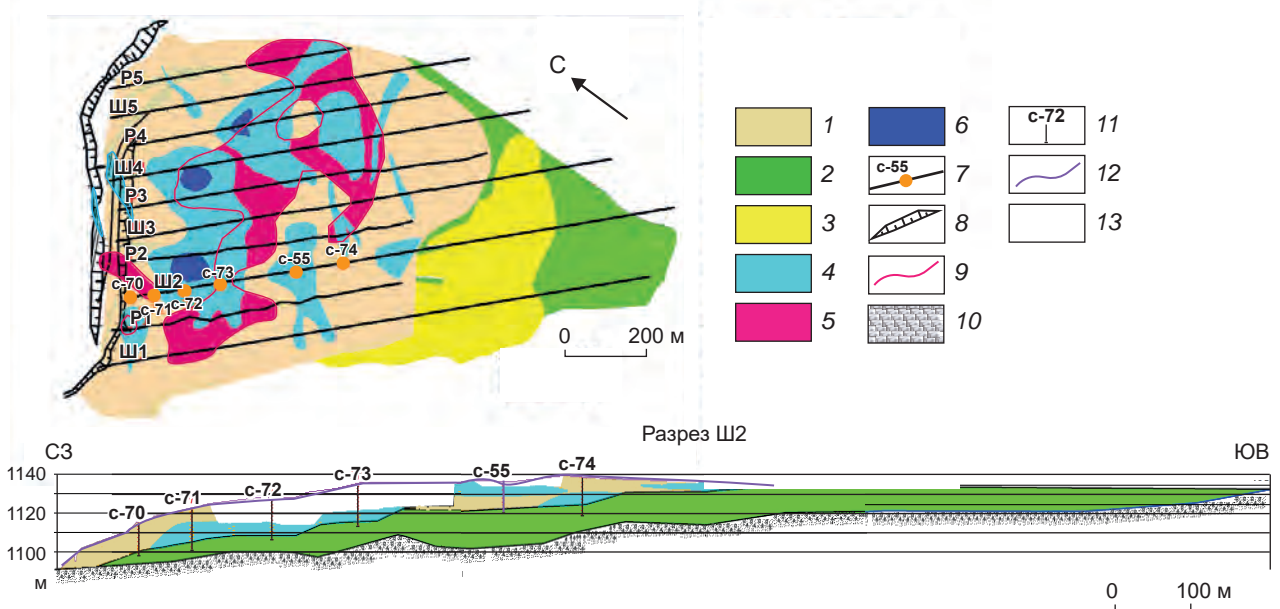
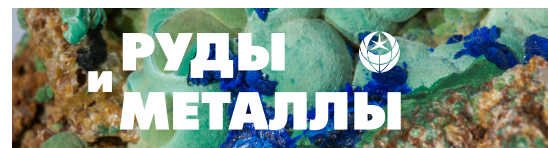


Рис. 3. Геологическая схема Барун-Нарынского техногенного месторождения с данными по содержаниям WO_3 и серы на горизонте +1125 м и геологический разрез по разведочному профилю Ш2:

вольфрамворудные пески (1) и илы (2); 3 – сульфидные пески; геохимические ореолы с содержаниями WO_3 (4 – более 0,09 %, 5 – более 0,15 %), S (6 – более 2 %); 7 – разведочные профили со скважинами и их номерами; 8 – дамба хвостохранилища; 9 – контуры ореолов серы в пределах площади ореолов WO_3 ; 10 – аллювий долины р. Барун-Нарын; 11 – разведочные скважины и их номера; 12 – контур поверхности хвостов до отработки; 13 – открытая поверхность долины р. Барун-Нарын

Fig.3. Schematic geological map of the Barun-Naryn technogenic deposit with data on the contents of WO_3 and sulfur on the level +1125 m and the geological section along the exploration Profile Ш2:

tungsten mineral stuff: (1) sands and (2) silts; 3 – sulfide sands; geochemical halos: 4 – WO_3 concentration more than 0.09 %, 5 – WO_3 concentration more than 0.15 %; 6 – S concentration more than 2 %; 7 – exploration profiles with boreholes and their numbers; 8 – tailings dam; 9 – outlines of sulfur halos within the WO_3 halos; 10 – alluvium of the Barun-Naryn River valley; 11 – exploration boreholes with their numbers; 12 – outline of the tailings surface before mining; 13 – open surface of the Barun-Naryn River valley



Заполнение Барун-Нарынского хвостохранилища, в пределах которого в дальнейшем было выявлено техногенное месторождение, начато в 1958 г. и прекращено в 1997 г. в связи с остановкой Джидинского ГОКа. Транспортировка хвостов обогащения в гидроотвал производилась совместно с сульфидным продуктом по пульпопроводу. Хвостохранилище имеет в плане форму овала шириной у основания (дамбы) около 1050 м. Протяжённость гидроотвала вверх по долине р. Барун-Нарын около 1700 м. Хвостохранилище сформировано в результате сброса отходов обогащения как молибденовой фабрики (до 1972 г.), так и вольфрамовых фабрик. Изучение возможности доизвлечения вольфрама и комплексной переработки текущих хвостов предпринималось комбинатом совместно с Институтом естественных наук БФ СО АН СССР и институтом ВНИПИГорцветмет в 1985 г. На опытной установке, смонтированной на фабрике Инкур-1, по флотационно-гравитационной схеме в течение девяти смен из исходных хвостов с содержанием (в %): WO_3 – 0,11, $S_{\text{сульф.}}$ – 1,9, CaF_2 – 3,63, получены следующие продукты: вольфрамовый (содержание WO_3 – 14,2 %, извлечение – 38,3 %); сульфидный (содержания (в %): Pb – 0,24, Cu – 0,23, Zn – 0,59, S – 17,5 при выходе 2,52 % и извлечениях, соответственно, (в %): 79,77, 83,07, 87,7, 93,44); флюоритовый концентрат ФФ-92 с извлечением CaF_2 – 50,1 % и выходе 1,95 %; слюдяной продукт с выходом 17,2 %.

На территории Барун-Нарынского месторождения располагается сульфидный спецотвал (см. рис. 3), представленный пиритовой сыпучкой с примесью зёрен сфалерита, галенита, халькопирита, блёклых руд, гюбнерита, шеелита, сульфосолей Bi и Ag, а также теллуридов Au и Ag. По данным Гинцветмета на 1960 г., сульфидный продукт содержал 0,6 % WO_3 , 0,1 % Mo, 4,2 г/т Au и 867 г/т Ag. По оценке Института естественных наук Бурятского филиала СО АН СССР (Ходанович П. Ю., 1987 г.), объём сульфидного продукта 30 тыс. т.

Третий отвал, образованный в результате аварийного сброса хвостов обогащения в долине р. Модон-Куль, получил название Модон-

кульского месторождения техногенных отходов. Располагается оно на продолжении Джидинского месторождения техногенных песков напротив дамбы Барун-Нарынского месторождения. Вытянуто по долине р. Модон-Куль на 900 м при ширине от 120 до 550 м. Это хвостохранилище может представлять промышленный интерес с ресурсами 1 млн т песков, 1330 т WO_3 с содержанием WO_3 0,126 %. В 1995 г. «Гиредмет» по заданию ЦНИГРИ выполнил технологические исследования на пробе хвостов с содержанием WO_3 0,42 %, в результате которых по гравитационно-флотационной схеме получен товарный вольфрамовый концентрат с содержанием WO_3 68,39 %, извлечением WO_3 73,81 %, и промпродукты доводки (содержание WO_3 0,59 %, извлечение 8,49 %). При флотации выделен сульфидный продукт, содержащий 2,04 г/т золота и 147,6 г/т серебра. В 2006–2007 гг. ООО НИиПИ «ТОМС» по заданию ООО «Закаменск» составлен технологический регламент для разработки проекта и технический проект «Обогащительная установка по переработке технологических отложений Джидинского ВМК». При разработке проекта были использованы утверждённые БурТКЗ забалансовые запасы кат. С₂ и ресурсы кат. Р₁ в количестве 9842 тыс. т руды (песков), 15 274 т WO_3 и 894 кг золота.

Значения средних содержаний рудных компонентов (табл. 4) Барун-Нарынского, Модонкульского и Джидинского месторождений примерно равны, что следует из общей истории формирования этих объектов, описанной в этой работе. Содержания рудных компонентов, представленные в табл. 3, должны быть близки к таковым в отвалах Инкурского месторождения, так как пробы отобраны нами из интервалов керна, представленных в основном бедными рудами.

Сброс хвостов в хвостохранилище осуществлялся в виде пульпы при соотношении Т : Ж = 1 : (12–15). С 1958 по 1972 г. в хвостохранилище попадали хвосты обогащения с двух фабрик – Молибденовой, перерабатывающей руду Первомайского штокверка, и Холтосонской, перерабатывающей вольфрамовую руду Холтосонского жильного месторождения.

Табл. 4. Обобщённая характеристика рудного потенциала техногенных образований Джидинского ВМК (Технико-экономическое обоснование..., 2011)

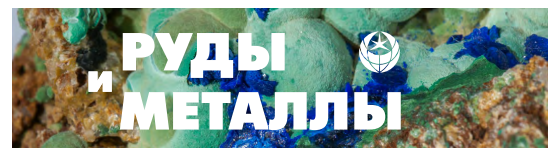
Table 4. Generalized characteristics of the ore potential of technogenic formations of the Dzhida Tungsten-Molybdenum Plant (Feasibility study..., 2011)

Техногенные образования (месторождения), год окончания формирования	Запасы и ресурсы руды, млн т	WO ₃ , тыс. т	Площадь, га	WO ₃ , %	Ag, г/т	Au, г/т	Mo, %	Pb, %	Zn, %	Bi, %	Cu, %	S, %
Джидинское, 1970 г.	4	4	20 (60) ¹	0,1								
Сульфидный спецотвал, 1960 г.	0,03	0,03	1,2	0,6	867	4,2	0,1					40
Барун-Нарынское, 1997 г.	35,4	40,8	160	0,12	8	0,05	0,005	0,06	0,07	0,006	0,03	2,2
Барун-Нарынское, запасы попутных компонентов, т					0,3	0	2	24	28	2,4	12	880
Модонкульское, 1996 г.	1	15,3	27	0,1								
Карьеры и отвалы, 1996 г.	4	0,2	380	0,05								

Примечание. ¹ С учётом сноса песков и илов по долине р. Модон-Куль. Жирным выделены ориентировочно подсчитанные значения по косвенным данным.

Объёмы переработки, размер частиц при помолу и состав перерабатываемой руды существенно отличались. Так, при переработке молибденовых руд Первомайского штокверка осуществлялся помол исходной руды до крупности 0,1–0,5 мм. Помол вольфрамовой руды Холтосонского жильного месторождения производился до 2–3 мм. Объёмы переработки молибденовой фабрики были в несколько раз больше объёмов переработки Холтосонской фабрики. Руды Первомайского молибденового штокверка кварц-полевошпатового состава и Холтосонского месторождения в основном кварцевые. С 1973 по 1996 г. в хвостохранилище сбрасывались отходы обогащения Холтосонской и Инкурской вольфрамовых фабрик. Сульфидный продукт флотации при переработке руд сначала складировался в отдельный отвал или сбрасывался в хвостохранилище с остальными отходами. Переработка различных по составу руд, крупность помола, водно-шламовая среда формирования отложений определили разнородность и слоистость накопленных отходов, наличие постоянно наблюда-

ющихся в массиве прослоев песков, богатых сульфидами, мощностью до 0,5 м и более. По проекту строительства и формирования хвостохранилища, разрабатывавшегося ОАО «Сибцветметниипроект», заполнение его должно было осуществляться по секциям («картам»), ограниченным направляющими валами, сооружавшимися из тех же техногенных песков, при этом фракция -0,074 мм, согласно условиям проекта, должна осаждаться на расстоянии от точки сброса (трубы пульповода) не ближе, чем 150 м. Исходя из необходимости соблюдения этого условия соответствующим образом регулировалась высота, на которой пульповод располагается над местностью, сложенной хвостами, и ширина карты. По мере заполнения хвостохранилища пульповод постепенно перемещался на более высокие отметки (с 1090–1095 м до 1145 м) по вертикали и в плане с северо-западного (от дамбы) направления на юго-восток, т. е. на 350–400 м по горизонтали. В юго-восточной части площади хвостохранилища постоянно существовал пруд-отстойник технической воды, используе-



мый для оборотного водоснабжения обогатительных фабрик, который претерпел такую же миграцию по мере заполнения хвостохранилища. После остановки Джидинского ГОКа в 1996 г. пруд-отстойник ликвидировался за счёт испарения и фильтрации. Наиболее возвышенная часть и дамба хвостохранилища оказались под воздействием эоловых и водных процессов, которые приводят к выдуванию мелких фракций с поверхности песков, размыву склонов дамбы и песков (хвостов).

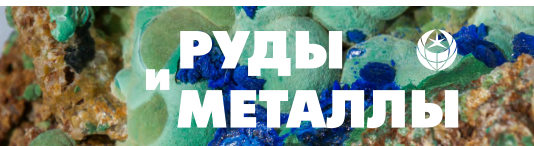
Геологическое строение Барун-Нарынского техногенного месторождения. Вначале следует отметить тот факт, что понятие «техногенное месторождение» (ТМ) появилось ещё в СССР в связи необходимостью решения проблем техногенного воздействия на ОС, источником которого, прежде всего, являлась горнодобывающая отрасль экономики [4]. Процессы образования ТМ имеют смешанный характер: техногенный и природный. Последний из них связан с геологическими экзогенными процессами (гипергенезом). Со временем благодаря технологическому прогрессу в области обогащения минерального сырья становится возможным рассматривать отходы обогащения ряда природных месторождений как техногенные руды.

На Барун-Нарынском техногенном месторождении отсутствует почвенно-растительный покров. Его поверхность относительно ровная, расчленённая мелкими бороздками струйчатого размыва (Технико-экономическое обоснование..., 2011). Насыпная дамба гидроотвала в сторону р. Модон-Куль размыва временными водотоками с образованием оврагов, конусов выноса и небольших оползней. На поверхности хвостохранилища отмечаются специфические дефляционные формы: замкнутые понижения, западины выдувания и небольшие барханные гряды, бугры, поперечные преобладающим северо-западным и юго-восточным ветрам. Геологическое строение Барун-Нарынского месторождения обусловлено: 1) спецификой его формирования как хранилища хвостов нескольких обогатительных фабрик, перерабатывавших руды Первомайского молибденового (в начальный период) и Инкурского и

Холтосонского вольфрамовых месторождений по существовавшим технологическим схемам и режимам обогащения; 2) спецификой накопления хвостов и формирования дамбы; 3) условиями водооборота (пруд-отстойник – обогатительная фабрика); 4) влиянием ветровой и водной эрозии в последние четыре-пять лет после остановки обогатительных фабрик.

В настоящее время Барун-Нарынское месторождение представляет собой единую крупную залежь овальной в плане формы (см. рис. 3). Основание залежи повторяет рельеф ложа р. Барун-Нарын. Общая мощность техногенных отложений, слагающих долину р. Барун-Нарын, изменяется от 0 м на границе с вмещающими породами до 45–47 м в центральной части. Границей месторождения в северо-западной части является дамба, сложенная теми же техногенными отходами с примесью бутового камня и металлического лома. По гранулометрическому составу отложения разделяются на два типа: разнозернистые пески и илистые отложения (илы). Между этими разновидностями осадков существуют постепенные переходы. Для всей толщи песков характерна слоистость, которая обусловлена чередованием осадков разного гранулометрического состава, разного цвета (от тёмно-зелёного до светло-жёлтого и серого) и разного вещественного состава (кварц-полевошпатовая нерудная часть и сульфидная с магнетитом, гематитом, гидроксидами железа и марганца). Мелкозернистые осадки (алевритистые, с темноцветными амфиболом, гематитом, гётитом) обычно образуют тонкие (первые миллиметры – сантиметры) слойки. Залегание всей толщи осадков субгоризонтальное с преобладающим падением в 1–5° в северных румбах. В приповерхностном слое техногенных отложений в районе дамбы отмечаются небольшие линзы щебня мощностью 5–20 см и протяжённостью до 10–15 м.

Разнозернистые пески расположены в северо-западной и центральной частях месторождения, что обусловлено осаждением их вблизи очага разгрузки – пульповода. Ширина их полосы 700–1000 м, по простиранию они занимают всю долину – 900–1000 м. Цвет



песков серо-жёлтый, желто-зелёный. Гранулометрический состав переменный – от мелкозернистых до крупнозернистых разностей. По вертикали разнозернистые пески занимают в основном верхние горизонты отложений.

Илистые отложения (илы) залегают на основании ложа долины р. Барун-Нарын (аллювиально-делювиальных отложениях) и занимают в основном нижние горизонты техногенного отвала. На поверхности илы выделены в юго-восточной части месторождения. Илы представлены более тонкими частицами отходов обогащения тёмно-серого, тёмно-зелёного, голубовато-зелёного цвета с прослойками песков серовато-жёлтого цвета. Основная особенность их строения – более однородная, более массивная текстура с реже проявленной и менее отчётливо выраженной слоистостью.

Статистический анализ вещественного состава руд Барун-Нарынского техногенного месторождения. Корреляционный анализ базы данных (Технико-экономическое обоснование..., 2011) по химическому и гранулометрическому составу руд из керна разведочных скважин (около 2000 проб) Барун-Нарынского техногенного месторождения показал наличие значимых связей между содержанием WO_3 и S – коэффициент парной корреляции (КПК) = +0,4 [14]. Установлена тенденция роста содержаний вольфрама с глубиной в песках мелких фракций и снижение его для крупных фракций (табл. 5).

Возможно, что это связано с более лёгким переносом мелких фракций вольфрамита поверхностными водами на глубину по сравнению с его более крупными фракциями.

В то же время связь между размерами фракций вольфрамита и содержанием серы в песках обратная: для скважин глубиной 15–20 м КПК = -0,76 (30 проб), для скважин глубиной 10 м КПК = -0,77 (18 проб).

Это в целом согласуется с относительно недавно проведёнными исследованиями [17], согласно которым в общем богатые вольфрамом участки представлены в основном мелкими фракциями, залегающими на более глубоких уровнях в песках. Барун-Нарынское техногенное месторождение сложено несцементирован-

ным, плохо отсортированным песком, состоящим из угловатых обломков, чаще кварца и полевых шпатов, более редких темноцветных минералов, мусковита, флюорита, губнерита, шеелита, пирита, сфалерита, галенита, блёклых руд, халькопирита, молибденита, сульфосолей висмута. Преобладают обломки крупнее 0,25 мм (более 60 %), среди них обломки размером 0,25–0,5 мм составляют 16,6–31,8 %. Массовая доля в песках шламовой фракции (-0,08 мм) варьирует от 6,9 до 25,4 %. Анализ указывает на концентрацию 52,53 % WO_3 во фракции -0,1+0 мм. Отмечается наличие вольфрама (37,85 %) и в средних классах крупности -1+0,5 и -0,5+0,2 мм, содержащих 0,05 % металла. Золото концентрируется в основном в мелких классах -0,2+0 мм, наиболее продуктивная фракция -0,071 мм. Определено, что основные потери вольфрама и золота в хвосты Джидинского ВМК происходили за счёт мелких классов и сростков с пустой породой.

Для приближённо-количественного определения средних содержаний компонентов в техногенных рудах был проведён корреляционный и регрессионный анализы данных опробования скважин, предоставленных авторам этой работы геологами АО «ЗАКАМЕНСК», построены гистограммы распределения содержаний WO_3 и серы по скважинам и планы в изолиниях их содержаний на поверхности хвостов (табл. 6, см. рис. 3). По скважинам разведочного профиля Ш2 отобраны девять проб песков и одна илов (БН-И), в которых методом ICP-MS были определены содержания широкого спектра элементов (см. табл. 6).

Приближённо-количественная статистическая оценка средних содержаний этих элементов ($C_{срп}$) в техногенных рудах производилась по известным средним содержаниям ($C_{ср}$) ряда компонентов, установленных по опробованию разведочных скважин и представленных в табл. 4 и 6 с использованием уравнений линейной регрессии:

$$y = a + b \cdot x, \text{ где } x = C_{ср}, y = C_{срп}.$$

Условие для выбора пар элементов с известными (x) и определяемыми (y) содержаниями компонентов – наличие значимой корреляционной связи между ними, установлен-

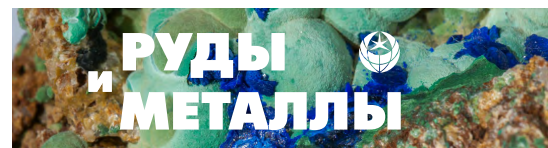


Табл. 5. Коэффициенты парной корреляции (КПК) между содержаниями WO_3 и глубиной для различных гранулометрических классов песков

Table 5. Pair correlation coefficients (PCC) between the WO_3 content and depth for various granulometric classes of the sands

Гранулометрические классы песков, мм	> 2мм	-2+1	-1+0,5	-0,5+0,2	-0,2+0,071	< -0,071
КПК	0,01	-0,28	-0,36	-0,12	0,3	0,28

Примечание. Значимые коэффициенты выделены жирным.

Табл. 6. Химический состав проб керна скважин профиля Ш2 (см. рис. 3)

Table 6. Chemical composition of drilling core samples from boreholes of Profile Ш2 (see Fig. 3)

№ пробы	Be	P	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Zr
C-4501	40	504	57	23	705	15 369	2	7	57	229	22	3	99	27
C-1401	61	982	90	62	1119	28 035	16	23	200	588	21	5	124	11
C-1406/10	43	984	79	62	1059	26 850	16	23	186	467	18	4	41	12
C-1410	43	879	85	57	1038	27 373	15	20	213	552	19	4	12	10
C-5601	44	679	83	80	1061	23 540	13	25	204	714	18	4	15	9
C-5605	65	870	91	91	1021	22 684	13	27	186	592	18	5	8	9
C-5612	72	1128	113	108	1222	21 694	11	30	266	819	26	5	9	10
Z-32046	6	1060	127	162	961	34 620	27	131	79	152	17	2	20	21
Z-37012	44	1108	158	179	1977	24 393	10	48	296	774	28	5	9	11
БН-И	48	937	129	156	1576	23 970	10	40	317	653	28	5	8	7
№ пробы	Nb	Mo	Ru	Ag	Cd	Sn	Sb	Te	Hf	Ta	W	Au	Pb	Bi
C-4501	8	122	0,003	5	2	8	18	2	1,02	0,5	456	0,09	286	41
C-1401	2	12	< 0,001	5	6	9	10	2	0,36	0,1	591	0,03	316	26
C-1406/10	2	8	0,002	5	5	6	10	2	0,36	0,1	413	0,05	277	17
C-1410	2	11	< 0,001	8	6	7	12	2	0,40	0,1	476	0,07	406	21
C-5601	2	14	< 0,001	6	8	8	5	1	0,32	0,1	845	0,02	387	26
C-5605	2	11	0,002	5	7	8	13	1	0,34	0,1	482	0,02	274	26
C-5612	2	22	< 0,001	6	9	16	15	2	0,32	0,1	763	0,02	347	45
Z-32046	5	23	< 0,001	1	1	2	5	0	0,85	0,4	101	0,01	78,5	7
Z-37012	2	42	0,005	8	8	16	9	2	0,39	0,1	811	0,03	438	61
БН-И	2	39	0,004	11	6	18	13	2	0,29	0,1	739	0,02	445	70

Примечание. Средние содержания в рудах некоторых элементов, установленных по данным разведочного бурения (Технико-экономическое обоснование..., 2011), приведены в табл. 4.

ной по данным анализов проб авторов этой работы (см. табл. 3). Определение коэффициентов (a , b) в уравнениях линейной регрессии осуществлялось с использованием пакета Statistica Windows. Для расчётов были выбраны пары элементов, указанные в табл. 7.

Повышенные содержания WO_3 в песках характеризуются относительно высокими концентрациями сульфидов Zn, Cu, Pb и Bi с примесью Ag (табл. 8). Это связано с тем, что в богатых и рядовых штокверковых рудах, поступавших на обогатительную фабрику, обычно имелись прожилки и гнезда гюбнерита в ассоциации с сульфидами. С ними же ассоциировали и различные рудные элементы, в том числе рассеянные, не подлежащие извлечению. Золото (судя по его обратной связи с цветными металлами и вольфрамом) в значительной степени могло быть свободным, находясь в кварце.

По установленным средним содержаниям каждого (i -го) элемента (C_{cp} , %) и известных запасов руды WO_3 (Q_{wo_3}) Барун-Нарынского и других месторождений этого района (см. табл. 4) была дана приближённо-количественная оценка их ресурсов (P_i) (табл. 9) по следующему соотношению:

$$P_i = Q_{wo_3} \cdot C_{cp}, \text{ где } Q_{wo_3} \approx 40,4 \text{ млн т.}$$

Многие из этих элементов являются опасными загрязнителями, переносимыми вместе с пылью или образующими водные растворы при воздействии серной кислоты, возникающей при окислении сульфидов (например, $CdSO_4 \cdot 8H_2O$). Находясь в техногенных рудах этого месторождения, а также в отходах после их обогащения (вторичные хвосты), они представляют серьёзную экологическую опасность для прилегающей к ним территории г. Закаменска, земель сельскохозяйственного назначения и, в определённой степени, также для озера Байкал, в бассейне которого они находятся. Например, ранее было установлено широкое распространение повышенных техногенных концентраций фтора (до 2 мг/л и более) в поверхностных водах Прибайкалья [10].

Прогнозные ресурсы рассчитывались для тех компонентов техногенных руд, содержания которых превышают ПДК, ОДК в хвостах

Табл. 7. Пары элементов, имеющих значимую парную корреляционную связь

Table 7. Pairs of elements with significant pair correlations

Пары элементов		Пары элементов	
1	2	1	2
Zn	Cd	Bi	Ga
Zn	As	Ag	Ge
Zn	Be	Ag	Zr
Cu	Mn	Ag	Ta
Cu	V	Au	Cr
Bi	Fe	Au	Te
Bi	Co	Au	Ni
Bi	Mo	W	Hf
Bi	Sn	(Mo)	Nb
Bi	Ru	(Fe)	Sb

Примечание. В столбцах «1» указаны элементы с известными средними содержаниями в рудах; в столбцах «2» – элементы, средние содержания которых определялись по уравнениям линейной регрессии; в скобках указаны элементы, средние содержания которых предварительно определялись по уравнениям регрессии.

Табл. 8. Значимые коэффициенты парной корреляции (КПК) между содержаниями рудных компонентов, рассчитанные по данным опробования разведочных скважин

Table 8. Significant pair correlation coefficients (PCC) between the concentrations of ore components, calculated based on data of sampling of the exploration boreholes

	Zn	Cu	Pb	Bi	WO_3
Au	-0,38	-0,34		-0,49	-0,43
Ag	0,8	0,54	0,9	0,46	0,45
Zn		0,62	0,69	0,52	0,54
Cu			0,46	0,59	0,57
Pb				0,36	0,42
Bi					0,43
S					0,4

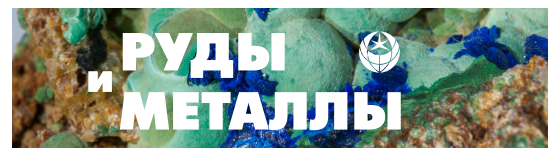


Таблица 9. Приближённо-количественная оценка содержаний и прогнозных ресурсов основных и попутных компонентов техногенных месторождений Джидинского рудного поля

Table 9. Approximately quantitative assessment of the grades and forecasted resources of the main and by-product components of technogenic deposits of the Dzhida ore field

Компоненты	Au	Ag	Zn	Cu	Pb	Bi	S	W	Te	Ni	Ge	Zr	Ta	V	P
ПДК (ОДК, С _{фон}), мг/кг			60	80	32	0,3	160	1,5	1	50	1,4	175	2	150	1500
Средние содержания, мг/кг	0,05	7,9	681	289	597	58	22 000	781	1	64	5	10	1	118	1013
Прогнозные ресурсы, тыс. т	0,002	0,3	30	13	26	3	956	34			0,2				
Компоненты	Be	Cd	As	Mn	Mo	Ga	Ru	Co	Fe	Sn	Hf	Nb	Sb	Cr	
ПДК (ОДК, С _{фон}), мг/кг	10	2	2	850	10	30	0,4	50	3 %	4,5	4	12	4,5	90	
Средние содержания, мг/кг	417	82	239	148	47	27	32	8	2,2 %	15	3	4	17	128	
Прогнозные ресурсы, тыс. т	18	4	11		2		1			1			1	6	

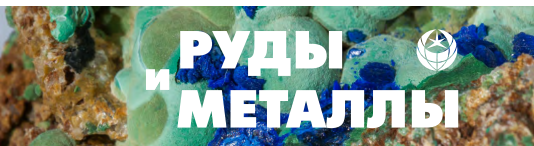
и фоновые содержания в почвах [3, 8, 9, 11]. Если рассматривать природные запасы, оставшиеся в недрах (см. табл. 1), то массы попутных компонентов в хвостах и отвалах в будущем могут возрасти примерно в пять раз при условии использования прежних технологий обогащения.

Как ранние, рассмотренные нами выше, так и современные исследования технологий переработки техногенных месторождений Джидинского рудного поля направлены на извлечение основных или наиболее ценных попутных полезных компонентов. На основании исследований, проведённых НТЛ «ТОМС» и ЦНИГРИ по изучению физико-технических и технологических свойств лежалых хвостов Джидинского ВМК, предложена технологическая схема их обогащения [17]. Основным способом, заложенным в схему, является гравитационное обогащение песков с получением черногового гравитационного вольфрамово-

го концентрата и последующей его доводкой флотационными и электромагнитными методами. Из хвостов исходной крупности можно извлечь 62,8 % свободных зёрен гюбнерита и 64,5 % свободных раскрытых зёрен шеелита.

По причине быстрого роста объёмов экологически опасных отходов горного производства в мире происходит переход к малоотходным и безотходным технологиям. Например, при отработке полиметаллического месторождения Янг (США) используется более 92 % извлекаемой горной массы [1].

Другим интересным примером разработки безотходных технологий являются исследования ЦНИИОлово по комплексной переработке забалансовых касситерит-сульфидно-силикатных руд [1], которые по составу и структуре достаточно близки к штокверковому вольфрамовому оруденению в терригенных породах: они сложены кварцем, хлоритом, турмалином, флюоритом с мелкокристалличе-



ским касситеритом, станнином, пиритом, пиротином, сфалеритом, галенитом и сидеритом. Реже встречаются арсенопирит, галенит, вольфрамит, альбит, буланжерит, джемсонит, франкеит, прустит, пираргирит, блёклые руды, висмутин, серицит, топаз.

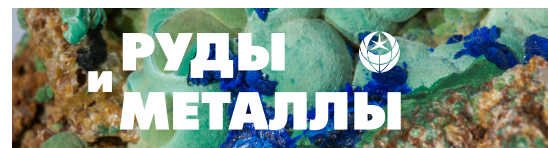
Необходимость приведения здесь этого примера продиктована ещё и тем, что переработка комплексных природных и техногенных руд требует применения «цепочек» большого спектра разных технологий обогащения, которые в таком случае позволяют получить в определённом смысле «синергетический» эффект от их совместного использования. При этом следует ещё раз подчеркнуть, что при извлечении максимально возможного количества попутных компонентов их можно рассматривать как полезные, в обратном случае – как вредные, т. е. в качестве загрязнителей ОС, эффект загрязнения которой будет только возрастать со временем. Также могут возникнуть и естественные зоны концентрации этих веществ: периодическое биологическое накопление в растениях, накопление на природных геохимических барьерах.

Значительная часть выше охарактеризованных рудных отвалов месторождений олова может быть переработана с применением мельниц самоизмельчения, в которых без обогащения выделяется до 50 % отвальной (по олову – пустой) породы, пригодной для строительных целей, и 5 % товарной руды с извлечением около 70–80 % олова. При сочетании процессов самоизмельчения, обогащения в тяжёлых средах и радиометрической сортировки из лежалых хвостов рентабельно извлекается до 50 % содержащегося в них олова.

Переработка продуктов флотационной доводки концентратов по схеме «деарсенизирующий обжиг – фьюмингование» предусматривает вывод мышьяка в товарные мышьяковистые возгоны и переработку получаемых сульфидных огарков фьюмингованием. Полученные возгоны перерабатываются по существующей схеме. Обеспечивается выпуск дополнительной продукции – Sn, Pb, Bi. При этом в два раза снижается выброс в атмосферу сер-

нистого газа. Попадающий в возгоны мышьяк представлен в основном водонерастворимыми малотоксичными формами – металлической и сульфидной. Оловосодержащие возгоны, в которые также вовлекается основная масса Pb, Bi, In и других металлов-спутников, перерабатываются совместно с богатыми оловянными концентратами методом восстановительной плавки на железистые шлаки с извлечением олова в черновой металл; Fe, W, Ta попадают в шлаки и извлекаются оттуда методом фьюмингования. Восстановительная плавка концентратов и фьюмингвозгонов осуществляется по схеме центробежного и вакуумного рафинирования (очистки продуктов от примесей, обычно в жидком состоянии). В итоге достигается повышение извлечения (в %): Sn – на 1–1,5, Pb – на 40–50, Bi – на 20–25, In – на 20–25, Cu – на 15–20, W – на 25–30, Ta – на 90. При этом снижается расход электроэнергии на 20–30 % по сравнению с ранее применявшейся технологией электроплавки. Очищенные от металлов фьюминговые шлаки пригодны для использования в цементной промышленности. При этом ликвидируются затраты по очистке концентратов гидromеталлургическими методами и полностью исключается применение дорогостоящих реагентов, резко снижается экологическая опасность загрязнений.

Институтом химии Уральского научного центра РАН разработана и прошла успешные промышленные испытания новая технология очистки сточных вод от сульфидов методом мокрой газоочистки. Затем сульфиды мышьяка и других металлов, осаждённые из сточных вод, передаются на деарсенизирующий обжиг, что позволяет дополнительно извлекать в товарную продукцию мышьяк и олово. Очищенные сточные воды используются в обороте – сокращается забор воды и сброс сточных вод. Технико-экономическим анализом определено, что в результате перевода обогачительно-металлургического передела оловосодержащего сырья в целом по подотрасли на безотходную технологию дополнительно может быть получено количество олова, равное объёму его выпуска крупным, вновь постро-



енным предприятием. Причём новое строительство потребовало бы в 10 раз больше капитальных вложений.

Приведённые примеры новых технологий во многом могут быть использованы и при переработке природных и техногенных руд вольфрама Джидинского рудного поля.

Заключение. Анализ данных по природным и техногенным месторождениям Джидинского рудного поля показал, что их минерально-сырьевой потенциал остаётся весьма значительным. Данные по минеральному составу руд, находящихся в техногенных образованиях, и статистическая оценка их химического состава показали, что они включают большое количество попутных компонентов, содержания и прогнозные ресурсы которых также значительны. Эти компоненты в основном относятся к I и II классам опасности и могут являться загрязнителями ОС, если они не будут извлекаться, оставаясь в отходах обогащения.

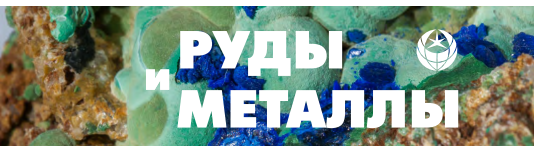
Следует подчеркнуть, что проведённые исследования носят предварительный характер: требуется массовое опробование природных и техногенных руд на максимально широкий спектр элементов. Это, в частности, видно из высокой изменчивости значений содержаний ряда элементов в приведённых результатах

анализов: в отдельных пробах содержания некоторых элементов соответствуют рядовым или даже богатым рудам, которые ещё в значительных количествах остаются в недрах, а отчасти и в техногенных образованиях.

В обобщающей работе по комплексному использованию руд месторождений различных рудно-формационных типов [12] показано, что такой подход позволяет увеличить стоимость продукции в 1,1–1,5 раза. Общий экономический эффект в этом случае также возрастает за счёт снижения платежей за загрязнение ОС и компенсацию ущерба сопряжённым ресурсам и населению [2]. Часть от этой дополнительной прибыли может быть направлена на природоохранные мероприятия, прежде всего на рекультивацию земель. Для стимулирования достижения подобных результатов требуется широкое использование экономического механизма регулирования сферы природопользования (субсидии, льготы и т. п.) на государственном уровне в сочетании с экологическим бизнесом [15]. Это позволит шире внедрять комплексные технологии переработки руд, а также проводить изоляцию остаточных масс техногенных отходов от ветровой эрозии и атмосферных осадков до времени их использования в будущем.

Список литературы

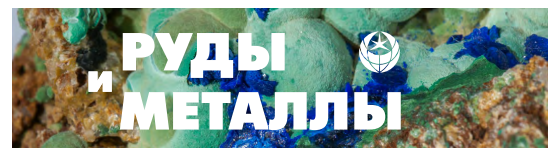
1. Арский Ю. М., Архипов Н. А., Петров И. В., Попов С. М. [и др.]. Рациональное природопользование в горной промышленности / Под ред. проф. В. А. Харченко. – М.: МГГУ, 1995. – 443 с.
2. Бурмистров А. А. Эколого-экономическая оценка месторождений (твёрдые полезные ископаемые): учебное пособие / Под ред. проф. В. И. Старостина. – М.: МГУ, 2002. – 186 с.
3. Водяницкий Ю. Н. Тяжёлые металлы и металлоиды в почвах. – М.: ГНЦ Почвенный институт им. В. В. Докучаева РАСХН, 2008. – 164 с.
4. Горная энциклопедия. Т. 5. – М.: Советская энциклопедия, 1991. – 541 с.
5. Гирусов Э. В., Бобылев С. Н., Новоселов А. Л., Чепурных Н. В. Экология и экономика природопользования. Учебник для вузов. – М.: Закон и право: Юнити, 1998. – 455 с.
6. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2021 года. Выпуск 15: Вольфрам. – М.: Росгеолфонд, 2021.
7. Дамдинова Л. Б., Дамдинов Б. Б. Минеральный состав и условия формирования руд Инкурского вольфрамового месторождения (Джидинское рудное поле, Юго-Западное Забайкалье) // Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. – 2020. – Т. 43, № 3 (72). – С. 290–306.
8. Кидин В. В., Торшин С. П. Агрохимия: учебник. – М.: Проспект, 2016. – 608 с.
9. Козлова А. А., Халбаев В. Л., Айсуева Т. С., Егдуров А. Е., Нечаева В. В., Мокрушина А. С., Чиркова Е. Г., Винокурова А. В. Содержания различных форм железа в почвах Южного Предбайкалья // Международный журнал прикладных



- и фундаментальных исследований. – 2014. – № 5-2. – С. 56–61.
10. Ломоносов И. С., Гребенищикова В. И., Брюханова Н. Н., Носков Д. А., Яновский Л. М., Диденков Ю. Н. Распределение селена и фтора в компонентах окружающей среды Прибайкалья // Проблемы региональной экологии. – 2008. – № 5. – С. 28–32.
11. Минералого-геохимические критерии оценки экологической опасности горнопромышленных территорий. Методические рекомендации № 200. – М. : ИМГРЭ, 2020. – 53 с.
12. Наркелюн Л. Ф. Комплексное использование минерального сырья и горно-технологических отходов: учебное пособие. – Чита : ЧитГТУ, 1996. – 139 с.
13. Презентация инвестпроекта «Инкурское и Холтосонское месторождения вольфрамовых руд», ГК «Акрополь». – URL: nedradv.ru/nedradv/investsp?obj=4f458800fe129836fce938f3019c877. (дата обращения: 26.01.2024).
14. Тельнов А. Е. Барун-Нарынское техногенное месторождение вольфрама (Республика Бурятия, Закаменский район) // Новое в познании процессов рудообразования: сборник материалов Одиннадцатой Российской молодёжной научно-практической Школы, Москва, 28 ноября – 2 декабря 2022 г. – М. : ИГЕМ РАН, 2022.
15. Тишков А. Г. Экология экономически выгодна // Природоресурсные ведомости. – 2004. – № 21–22 (230–231). – С. 2–3.
16. Трофимов В. Т., Зилинг Д. Г., Барабошкина Т. А., Жигалин А. Д., Харькина М. А. Трансформация экологических функций литосферы в эпоху техногенеза. – М. : Ноосфера, 2006. – 720 с.
17. Федотов П. К., Петухов В. И., Федотов К. В., Бурдонов А. Е. Анализ направлений переработки лежалых хвостов Джидинского ВМК // Обогащение руд. – 2016. – № 1 (361). – С. 40–46.

References

1. Arskii Yu. M., Arkhipov N. A., Petrov I. V., Popov S. M. [i dr.]. Ratsional'noe prirodopol'zovanie v gornoi promyshlennosti [Rational nature management in the mining industry], ed. by prof. V. A. Kharchenko, Moscow, MGGU Publ., 1995, 443 p.
2. Burmistrov A. A. Ekologo-ekonomicheskaya otsenka mestorozhdenii (tverdye poleznye iskopaemye) [Ecological and economic assessment of deposits (solid minerals)], ed. by prof. V. I. Starostin, Moscow, MGU Publ., 2002, 186 p.
3. Vodyanitskii Yu. N. Tyazhelye metally i metalloidy v pochvakh [Heavy metals and metalloids in soils], Moscow, GNTs Pochvennyi institut im. V. V. Dokuchaeva RASKhN Publ., 2008, 164 p.
4. Gornaya entsiklopediya. T. 5 [Mining Encyclopedia. Vol. 5], Moscow, Sovetskaya entsiklopediya, 1991, 541 p.
5. Girusov E. V., Bobylev S. N., Novoselov A. L., Chernykh N. V. Ekologiya i ekonomika prirodopol'zovaniya. Uchebnik dlya vuzov [Ecology and economics of nature management], Moscow, Zakon i pravo Publ., Yuniti Publ., 1998, 455 p.
6. Gosudarstvennyi balans zapasov poleznykh iskopaemykh Rossiiskoi Federatsii na 1 yanvarya 2021 goda. Vypusk 15: Vol'fram [The State balance of mineral reserves of the Russian Federation as of January 1, 2021. Issue 15: Wolfram], Moscow, Rosgeolfond Publ., 2021.
7. Damdinova L. B., Damdinov B. B. Mineral'nyi sostav i usloviya formirovaniya rud Inkurskogo vol'framovogo mestorozhdeniya (Dzhidinskoe rudnoe pole, Yugo-Zapadnoe Zabaikal'e) [Mineral composition and formation conditions of the Inkur tungsten deposit ores (Dzhidinsky ore field, South-Western Transbaikalia)], *Geologiya, poiski i razvedka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* [Geology, Prospecting and Exploration of Mineral Deposits], 2020, V. 43, No 3 (72), pp. 290–306. (In Russ.).
8. Kidin V. V., Torshin S. P. Agrokhimiya [Agrochemistry], Moscow, Prospekt Publ., 2016, 608 p.
9. Kozlova A. A., Khalbaev V. L., Aisueva T. S., Egodurov A. E., Nechaeva V. V., Mokrushina A. S., Chirkova E. G., Vinokurova A. V. Soderzhaniya razlichnykh form zheleza v pochvakh Yuzhnogo Predbaikal'ya [Contents of different forms of iron in the soils of Southern Predbaikaliye], *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International journal of applied and fundamental research], 2014, No 5-2, pp. 56–61. (In Russ.).
10. Lomonosov I. S., Grebenshchikova V. I., Bryukhanova N. N., Noskov D. A., Yanovskii L. M., Didenkov Yu. N. Raspredelenie selena i fтора v komponentakh okruzhayushchei sredy Pribaikal'ya [Distribution of selenium and fluorine in environmental components of the Baikal region], *Problemy regional'noi ekologii* [Problems of regional ecology], 2008, No 5, pp. 28–32. (In Russ.).



11. Mineralogo-geokhimicheskie kriterii otsenki ekologicheskoi opasnosti gornopromyshlennykh territorii. Metodicheskie rekomendatsii № 200 [Mineralogical and geochemical criteria for assessing the environmental hazard of mining territories. Methodological recommendations No. 200], Moscow, IMGRE Publ., 2020, 53 p.
12. Narkelyun L. F. Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya i gorno-tekhnologicheskikh otkhodov [Complex use of mineral raw materials and mining and technological waste], Chita, ChitGTU Publ., 1996, 139 p.
13. Prezentatsiya investproekta “Inkurskoe i Kholtosonskoe mestorozhdenia vol'framovykh rud”, GK “Akropol” [Presentation of the investment project “Inkurskoye and Holtosonskoye deposits of tungsten ores”, Acropolis Group of Companies], available at: nedradv.ru/nedradv/invetsp?obj=4f4588000fe129836fce938f3019c877. (Access: 26.01.2024).
14. Tel'nov A. E. Barun-Narynskoe tekhnogennoe mestorozhdenie vol'frama (Respublika Buryatiya, Zakamenskii raion) [Barun-Naryn technogenic tungsten deposit (Republic of Buryatia, Zakamensky district)], *Novoe v poznanii protsessov rudoobrazovaniya: sbornik materialov Odinnadtsatoi Rossiiskoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi Shkoly* [New in the knowledge of ore formation processes: collection of materials of the Eleventh Russian Youth Scientific and Practical School], Moscow, 28 November – 2 December 2022, IGEM RAN Publ., 2022.
15. Tishkov A. G. Ekologiya ekonomicheski vygodna [Ecology economically profitable], *Prirodoresurnye vedomosti* [Natural resource statements], 2004, No 21–22 (230–231), pp. 2–3. (In Russ.).
16. Trofimov V. T., Ziling D. G., Baraboshkina T. A., Zhigalin A. D., Khar'kina M. A. Transformatsiya ekologicheskikh funktsii litosfery v epokhu tekhnogeneza [Transformation of ecological functions of the lithosphere in the era of technogenesis], Moscow, Noosfera Publ., 2006, 720 p.
17. Fedotov P. K., Petukhov V. I., Fedotov K. V., Burdonov A. E. Analiz napravlenii pererabotki lezhalnykh khvostov Dzhidinskogo VMK [Analysis of the directions of processing stale tailings of the Dzhidinsky VMK], *Obogashchenie rud* [Ore enrichment], 2016, No 1 (361), pp. 40–46. (In Russ.).

Самсонов Алексей Андреевич (samsonov@geol.msu.ru)

кандидат геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник

Бурмистров Алексей Алексеевич

кандидат геол.-минерал. наук, доцент

Тельнов Афанасий Евгеньевич

магистрант

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия



СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

553.411 : 581.192.2 (571.53/65)

Поведение органического вещества и золота в условиях складчатых деформаций

Ганжа Г. Б., Арсентьева И. В.

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

Аннотация. В статье приведён краткий обзор опубликованной литературы, посвящённой природному органическому веществу (ОВ) и его трансформации на разных этапах преобразования осадочных толщ. Показано, что изменение состава, строения и свойств ОВ сопровождалось изменением концентрации металлов, в том числе и золота. Поведение ОВ и золота в условиях складчатых деформаций авторами рассмотрено на примере формирования зон интенсивной складчатости в крупных золоторудных регионах России (Центрально-Колымском и Байкало-Патомском). С пластическими деформациями осадочных пород сопряжена активная миграция золота в составе растворимых компонентов ОВ. Возникающие при складчатости структуры выжимания и нагнетания обеспечивали закономерное разнонаправленное перемещение ОВ наиболее пониженной вязкости в области разуплотнения осадочных пород. Результат этой миграции – аномальные концентрации золота и ОВ в замковых частях складок. Интенсивно этот процесс проявился в терригенно-сланцевой толще в пределах Декдеканской зоны складчатых дислокаций (Центрально-Колымский регион), где выделена золото-битумная минерализация, представленная крупной линзовидной залежью размером 500–800 × 2500 м. Здесь единственным концентратором металла являются нефтеподобные битумы, образующие в породе тончайшую рассеянную вкрапленность.

Ключевые слова: углеродистые толщи, складчатые деформации, области выжимания и нагнетания, золото-битумная минерализация, золото-сульфидное оруденение.

Для цитирования: Ганжа Г. Б., Арсентьева И. В. Поведение органического вещества и золота в условиях складчатых деформаций. Руды и металлы. 2024. № 1. С. 36–61. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10003.

Behavior of organic matter and gold under conditions of folding deformations

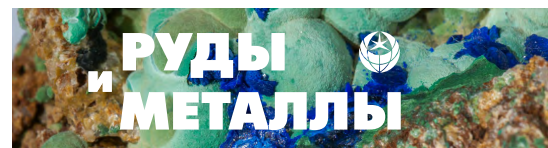
Ganzha G. B., Arsentieva I. V.

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

Annotation. The article provides a brief overview of publications on natural organic matter (OM) and its transformation at various stages of the sedimentary rocks conversion. It is demonstrated, that the changes in the composition, structure, and properties of OM were accompanied by changes in the concentration of metals, including gold. The OM and gold behavior under conditions of folding deformations was examined by the authors on the example of the formation of zones of intense folding in large gold-mining regions of Russia (Central Kolyma and Baikal-Patom). Plastic deformations of sedimentary rocks are associated with active migration of gold in the composition of soluble OM components. The squeezing and injection structures that arise during the folding ensured the natural multidirectional movement of OM of the lowest viscosity into the areas of decompaction of sedimentary rocks. This migration resulted in anomalous concentrations of gold and OM in the locking parts of the folds. This process was intensely manifested in the terrigenous-shale rock sequence within the Dekdekan zone of folded dislocations (Central Kolyma region), where gold-bitumen mineralization was identified, represented by a large lens-shaped deposit 500–800 × 2500 m in size. The only metal concentrator here is oil-like bitumen forming very fine dissemination in the rock.

Keywords: carbonaceous rock sequences, folding deformations, areas of squeezing and injection, gold-bitumen mineralization, gold-sulfide mineralization.

For citation: Ganzha G. B., Arsentieva I. V. Behavior of organic matter and gold under conditions of folding deformations. Ores and metals, 2024, № 1, pp. 36–61. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10003.



В локализации многих золоторудных месторождений в углеродистых терригенных и карбонатно-терригенных толщах трансгрессивного ряда большую роль играют складчатые структуры. Со складчатыми деформациями связаны процессы неравномерного метаморфизма осадочных пород, деструкция рассеянного органического вещества (ОВ) и миграция седиментогенного золота в составе углеводородных флюидов. Большое влияние на подвижность металлоносных углеродистых комплексов и направление их миграции оказывали геодинамические особенности развития пластических деформаций – чередование областей выжимания и нагнетания. Надёжным индикатором интенсивности дислокационного метаморфизма является ОВ, тонкорассеянное в осадочных породах. Роль его в рудообразующем процессе относится к дискуссионной проблеме. По существующим представлениям, соединения углерода либо могли быть источником металла, либо служить сорбционным барьером на пути гидротермальных флюидов, обогащённых золотом [6]. Поэтому, чтобы оценить роль ОВ в формировании золоторудных объектов, необходимо провести сравнительный анализ динамики поведения ОВ и Au на разных этапах литификации и метаморфизма осадочных пород.

Органическое вещество и золото на разных этапах формирования углеродистых осадочных формаций. Значительные по мощности углеродистые осадки формировались на стадии субмаринного рифтогенеза на разной глубине. По мере развития трансгрессии в осадок поступало всё большее количество ОВ в виде взвеси, образующего с глинистыми минералами смешанную органо-минеральную систему с высокой сорбционной ёмкостью (микстинит). Вместе с продуктами разрушения кор выветривания в морской бассейн выносилось кластогенное и хемогенное Au, растворённое в воде и сорбированное углеродисто-глинистыми частицами. В результате в бассейнах накапливались углеродистые осадки в основном с кларковым содержанием металла. Более высокие концентрации золота связаны с вулканическими металлоносными сернисты-

ми и углекислыми эксгаляциями. Об этом свидетельствуют повышенные содержания металла в современных сульфидных рудах, образующихся в результате гидротермальной деятельности в спрединговых зонах Мирового океана [1].

При дальнейшем погружении осадочной толщи происходило постепенное нарастание степени преобразования пород и трансформации ОВ. Литификация осадков сопровождалась отщеплением основной массы подвижных продуктов, в которых значительную роль играли газообразные и жидкие углеводороды: углекислота, вода, сероводород, аммиак, его гомологи и другие углеводороды. В совокупности комплекс углеводородных компонентов составляет основу микронепти. Сравнение поведения ОВ и золота в условиях додеформационного литогенеза погружения и дислокационного метаморфизма позволит оценить роль разных компонентов ОВ в формировании месторождений золото-углеродистых формаций.

В результате проведённых комплексных исследований неметаморфизованных битуминозных карбонатных пород венда и нижнего кембрия восточной части Сибирской платформы установлено присутствие золота во всех фракциях ОВ (особенно в асфальтенах и смолах) и выделена парагенетическая ассоциация Au-C_{орг.} со значимыми положительными коэффициентами корреляции: $r_{0,5} = 0,51-0,77$ [18]. В растворимой части битумов и керогене Au присутствует в двух формах: свободное ультратонкое легкоподвижное и химически связанное. Для неметаморфизованного рифей-вендского терригенно-карбонатного комплекса Лено-Тунгусской провинции выявлена зависимость содержания золота от состава нефти, что подтверждается ранговыми коэффициентами корреляции Au с сернистостью ($r_{0,5} = 0,82$), содержанием смол ($r_{0,5} = 0,94$), асфальтенов ($r_{0,5} = 0,81$). Отмечается закономерное утяжеление нефтей в направлении от палеопрогибов в сторону палеоподнятий и увеличение содержания золота. Повышенные концентрации металла обнаруживаются в тяжёлых нефтях, локализованных в карбонатных коллекторах со слабой степенью катагенетических преобразований и приуро-

Табл. 1. Растворимость золота в различных фракциях нефтей Среднеботуобинского месторождения [18]

Table 1. Solubility of gold in various fractions of oils from the Srednebotuobinskoe field [18]

Фракция нефти	Масса фракции, г	Масса золота, мг	Объём растворённого Au за год		Содержание Au во фракции, г/т
			мг	%	
Асфальтены	0,8149	29,15	0,1	0,34	122,7
Асфальтены из охлаждённой нефти	0,6286	20,88	0,16	0,77	254
Нафтено-ароматические углеводороды из битуминозного доломита	0,1988	35,89	0,04	0,11	201,2
Асфальтены из битумов доломита	1,1489	33,545	0,05	0,15	43,5

ченных к наиболее приподнятым структурам, что связано с увеличением содержания асфальтенов, асфальтеновых смол, тяжёлых металлов в нефти.

Такие же результаты получены по Западной Сибири и Туркмении. В СНИИГГиМС под руководством В. И. Бгатова [18] было экспериментально доказано, что золото интенсивно растворяется в различных фракциях нефтей, особенно в тяжёлых – фракции асфальтенов (табл. 1). В этой битумной фракции концентрация металла может достигать десятков и сотен г/т. Вывод о способности нефтей мобилизовать металлы из вмещающей углеродистой толщи и транспортировать их в концентрациях, достаточных для участия в рудообразующих процессах, подтверждён недавними экспериментами И. В. Кубраковой [11]. Установлено, что в определённых физико-химических условиях (температура > 150 °С, присутствие веществ-восстановителей) происходит восстановление молекулярных форм благородных металлов в углеводородной среде с образованием наночастиц, которые могут служить формой переноса золота природными углеводородными растворами.

Важным фактором, влияющим на концентрацию металла, является степень катагенеза осадочной толщи. В бассейнах с невысокой степенью катагенеза содержание смолисто-асфальтеновых компонентов в битумах составляет 70–80 %, а содержание золота в них выше, чем в материнских породах [18]. В более жёстких термобарических условиях отме-

чается уменьшение содержания асфальтенов, асфальтеновых смол и связанного с ними металла. Повышенные концентрации золота обнаруживаются в тяжёлых нефтях, локализованных в карбонатных коллекторах со слабой степенью катагенетических преобразований и приуроченных к наиболее приподнятым зонам.

Выделено несколько этапов постседиментационного преобразования органики, заключённой в осадочных породах [21]:

1. Первые перемещения ОВ, находящегося в состоянии истинного или коллоидного раствора, проявляются уже в диагенетическую фазу. В результате возникают вторичные концентрации ОВ в виде жильных и гнездовых скоплений, которые сохраняют основные черты материнского субстрата и состоят из вещества липидной природы и продуктов преобразования углеводно-белкового материала.

2. Основная масса подвижных битумов отщепляется от ОВ в зоне катагенеза. В эту фазу происходит обуглероживание исходного ОВ – его уплотнение, потеря функциональных периферических групп, увеличение содержания углерода, сопровождающееся новообразованиями битумов. Остаточное ОВ (кероген) образует в неметаморфизованных осадках сгустки, прожилки и корочки, обволакивающие обломочные и аутигенные минералы, и представлено битумами типа асфальтита и низшего керита.

3. Завершаются постседиментационные преобразования осадочных толщ метакатагенезом, который является промежуточной стадией меж-

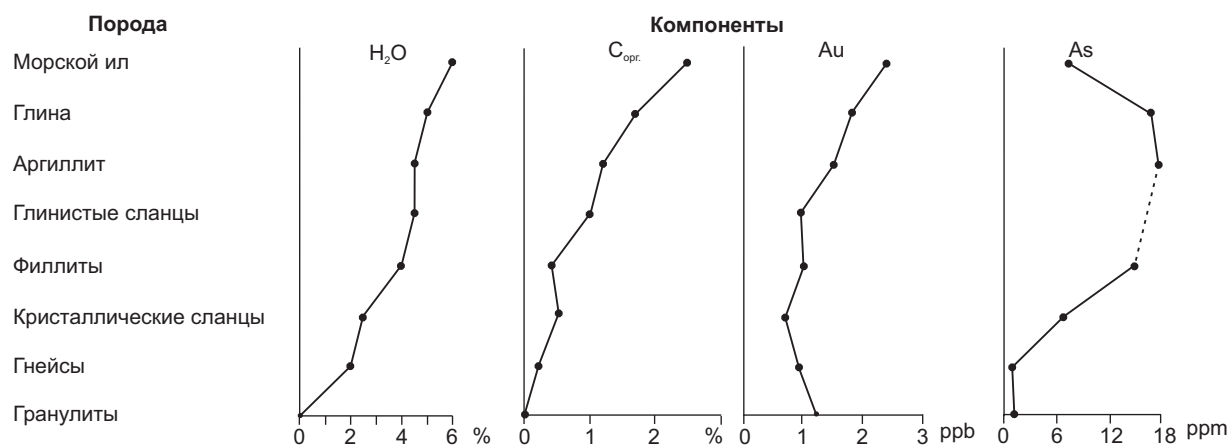
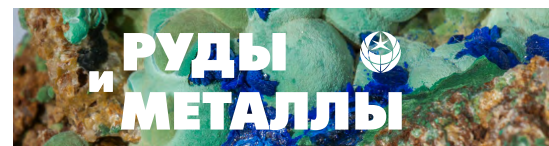


Рис. 1. Поведение $C_{орг.}$, Au, H_2O и As в процессе литификации и метаморфизма осадочных пород [24]

Fig. 1. Behavior of $C_{org.}$, Au, H_2O , and As in the course of lithification and metamorphism of sedimentary rocks [24]

ду литогенезом погружения и метаморфизмом осадочных толщ, вовлечённых в складчатые деформации. На этом этапе ОВ соответствует продуктам высшей карбонизации битумов ряда высшего керита и антраксолита.

Проблема миграции золота в условиях погружения осадочной толщи и на разных стадиях преобразования осадков изучена слабо. Но немногочисленные исследования, проведённые российскими и зарубежными геологами, свидетельствуют о высокой подвижности металла в зонах литогенеза. Интересные данные приводятся немецкими учёными, изучавшими осадочные породы, в разной степени литифицированные и метаморфизованные [24]. В результате нейтронно-активационного анализа содержаний 25 микроэлементов в образцах от морских осадков до гранулитов установлено значительное перераспределение многих элементов, которые считались малоподвижными. Из всех микроэлементов золото выделяется пространственной сопряжённостью с $C_{орг.}$, которая отчётливо прослеживается на стадиях литификации – начального регионального метаморфизма (рис. 1). В зонах метаморфизма органическое вещество графитизируется, снижается содержание золота.

Примером высокой подвижности золота в углеродистых осадочных толщах могут быть терригенные комплексы Южного и Западного

Верхоянья, подвергшиеся поздним катагенетическим, метагенетическим и раннеметаморфическим преобразованиям [10]. Нейтронно-активационным методом (Уральское ТГУ) определено содержание золота в 654 пробах карбона, перми и триаса Верхоянского терригенного комплекса. Пробы отбирались вне рудных полей и в породах, не содержащих эпигенетических сульфидов и прожилков. В результате проведённых исследований установлено, что углеродистые осадочные породы, претерпевшие изменения в интервале катагенез – метагенез – зеленосланцевый метаморфизм, в среднем теряют до 44 % золота, а их глинистые разности – до 64 %. Максимальные потери металла фиксируются в глинистых породах на стадии позднего метагенеза – начального метаморфизма (около 80 %). Важную роль в преобразовании осадочных пород верхоянского терригенного комплекса играли дислокационные процессы [20]. Слагающие его осадочные толщи смяты в линейные и брахиформные складки и надвинуты на структуры Сибирской платформы. Характерно широкое развитие сложнопостроенных чешуйчато-надвиговых структур. В современном строении складчато-надвигового Верхоянского пояса отмечается чередование антиклинорных и синклинорных зон. С направлением складчатых и разрывных структур согласу-

ется метаморфическая зональность и распространение основных золото-кварцевых месторождений.

В предлагаемой статье рассматриваются особенности поведения ОВ и Au в зонах интенсивных складчатых деформаций углеродистых терригенных и карбонатно-терригенных комплексов. Исследования проводились в различных по геологическому строению и возрасту складчатых областях, являющихся крупными золоторудными регионами России (Центрально-Колымский (ЦКР) и Байкало-Патомский (БПР)). Приведённые материалы и выводы основаны на большом объёме работ по определению содержаний Au и $C_{орг.}$ и связи их с текстурно-структурными особенностями строения складчатых структур. Это позволило установить общие закономерности дислокационного метаморфизма углеродистой толщи и влияние его на направление миграции золотоносных водно-углеводородных флюидных потоков. Миграция золота в составе растворимых компонентов ОВ может быть продемонстрирована на примере золото-битумной минерализации, приуроченной к участкам интенсивной складчатости сланцевой толщи ЦКР.

Центрально-Колымский регион – один из крупнейших регионов россыпного и рудного золота России. В его углеродисто-терригенных толщах распространены и достаточно хорошо изучены месторождения золото-кварцевой, золото-сурьмяной, золото-редкометалльной и другой минерализации. Установлено, что основная часть золота известных рудных объектов имеет наложенный характер, тесно связана с жильной и прожилковой кварцевой минерализацией и отлагалась из гидротермальных растворов с поздними сульфидами. В одной из структур региона выявлен новый тип оруденения, локализованный в углеродистых сланцах и не связанный ни с золотоносными кварцевыми жилами, ни с сульфидными рудопоявлениями. В зонах интенсивной складчатости установлены повышенные концентрации Au в составе битумоидов [3].

В тектоническом отношении ЦКР охватывает юго-восточную часть Яно-Колымской складчатой системы. Разрез осадочных пород,

слагающих структуру, в целом непрерывный и представлен мощными, преимущественно терригенными углеродистыми отложениями Верхоянского комплекса пермского, триасового и юрского возрастов, испытавшими преобразование от позднего катагенеза до слабого регионального метаморфизма хлоритовой, реже биотитовой фации [5, 22]. Наибольшим распространением пользуются пермские и юрские стратифицированные осадочные комплексы. В позднепермское–раннемеловое время толща была дислоцирована и собрана в крупные линейные складки северо-западного простирания. Здесь выделяются две крупные линейные структуры – Аян-Юряхский антиклинорий, сложенный преимущественно триасовыми и пермскими отложениями, и Иньяли-Дебинский синклинорий, сложенный отложениями триас-юрского возраста (рис. 2). С завершающей фазой формирования этой структуры связано внедрение интрузивных тел и даек, относящихся к позднемезозойской гранодиорит-гранитовой и гранитовой формациям.

Район проведённых исследований расположен в пределах Аян-Юряхского антиклинория, представленного тремя сопряжёнными складками северо-западного простирания – Колымской и Тенькинской антиклиналями и разделяющей их Таяхтахской синклиналью. Основная структура района – фрагмент северо-западного фланга Тенькинской антиклинали, вдоль оси которой протягивается одноимённый разлом, контролирующий распределение золото-кварцевой минерализации. Выделенная площадь расположена в бассейнах рек Дегдекан и Токичан – левых притоков р. Неручи и входит в состав Тенькинской металлогенической зоны (рис. 3). В геологическом отношении она представляет собой область развития морских терригенных отложений пермского возраста. Осадки плохо стратифицированы, характеризуются литологической монотонностью разрезов и отсутствием маркирующих горизонтов. В составе осадочных пород преобладают глинистые сланцы, алевролиты и диамиктиты.

Более 50 % рассматриваемой площади занимают верхнепермские отложения пионер-

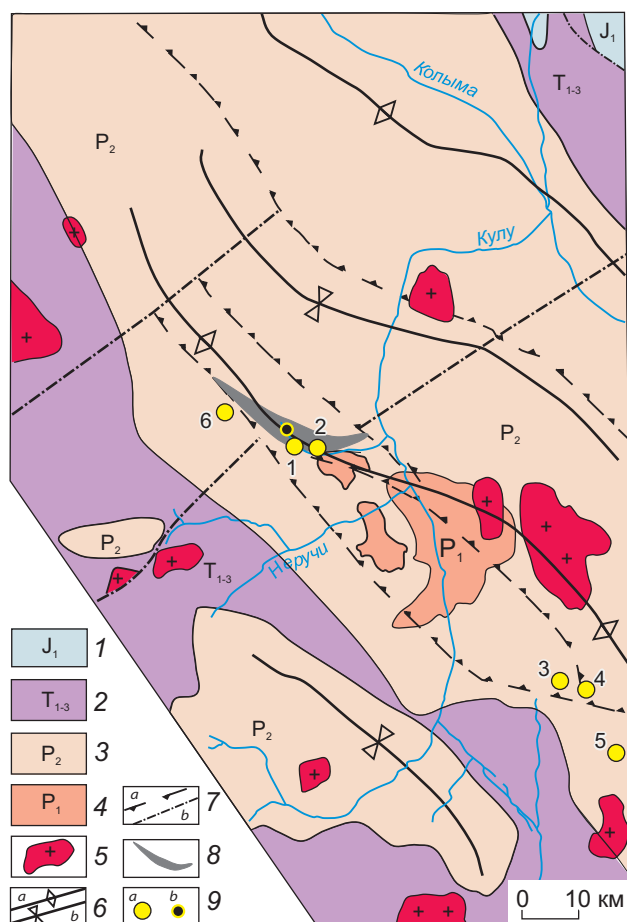
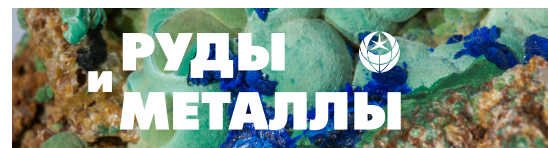


Рис. 2. Схематическая геологическая карта Аян-Юряхского антиклинория (составлена по материалам [14]):

1 – нижнеюрские отложения: песчаники, алевролиты, аргиллиты, туфы андезитов, базальты; 2 – триасовые отложения: аргиллиты, алевролиты, песчаники, линзы известняков; 3 – верхнепермские отложения: алевролиты, аргиллиты, песчаники, диамиктиты, конгломераты; 4 – нижнепермские отложения: алевролиты, аргиллиты, песчаники; 5 – меловые граниты, гранит-порфиры, гранодиориты; 6 – оси складок (*a* – антиклиналей, *b* – синклиналей); 7 – тектонические нарушения (*a* – надвиги, *b* – разломы); 8 – Дегдеканская зона складчатых дислокаций; 9 – *a* – золото-кварцевые месторождения (1 – Верное, 2 – Дегдекан, 3 – Наталка, 4 – Омчак, 5 – Павлик, 6 – Боец), *b* – золото-битумное проявление

Fig. 2. Schematic geological map of the Ayan-Yuryakh anticlinorium (compiled based on materials from [14]):

1 – Lower Jurassic formations: sandstones, siltstones, mudstones, andesite tuffs, basalts; 2 – Triassic formations: mudstones, siltstones, sandstones, limestone lenses; 3 – Upper Permian formations: siltstones, mudstones, sandstones, diamictites, conglomerates; 4 – Lower Permian formations: siltstones, mudstones, sandstones; 5 – Cretaceous granites, granite porphyries, granodiorites; 6 – axes of folds (*a* – anticlines, *b* – synclines); 7 – tectonic disturbances (*a* – thrusts, *b* – faults); 8 – Degdekan zone of folded dislocations; 9 – (*a*) gold-quartz deposits (1 – Verное, 2 – Degdekan, 3 – Natalka, 4 – Omchak, 5 – Pavlik, 6 – Boets), (*b*) – gold-bitumen occurrence

ской свиты. Свита является наиболее монотонной глинистой частью пермского разреза и имеет мощность до 2000 м. Детальное изучение толщи позволило выделить в ней несколько разновидностей углеродсодержащих сланцев – глинистые, кремнисто-глинистые, доломитисто-глинистые и пиритсодержащие глинистые сланцы, которые образуют три пачки ритмичного переслаивания мощностью от 200 до 700 м. Выше по разрезу их сменяют глинисто-алевролитовые отложения мощностью около 200–250 м. Необычным литологическим составом выделяется атканская свита, которая протягивается двумя удлинёнными, с отдельными раздувами, полосами северо-западного простирания. В ней преобладают диамиктиты, представляющие собой глинистые сланцы с примесью песчаного и гравий-

но-галечного материала и редкими валунами. Среднее содержание $C_{орг}$ в сланцах пионерской свиты – 1,52 %, в диамиктитах атканской свиты – 0,45 % [2].

По результатам литогеохимической съёмки в пионерской свите, являющейся рудовещающей для золото-кварцевых месторождений (Дегдекан и Верное), на основе анализа 470 проб углеродистых сланцев, не содержащих сульфидов и кварцевых прожилков, обнаружена высококонтрастная аномалия Au, развитая на фоне ореола выноса металла ($< 1 \text{ мг/т}$)¹ (чувствительность определения 1 мг/т). Для определения концентрации золота использовал-

¹ Содержание золота определялось в отделении экспериментальных исследований в г. Тула (ЦНИГРИ).

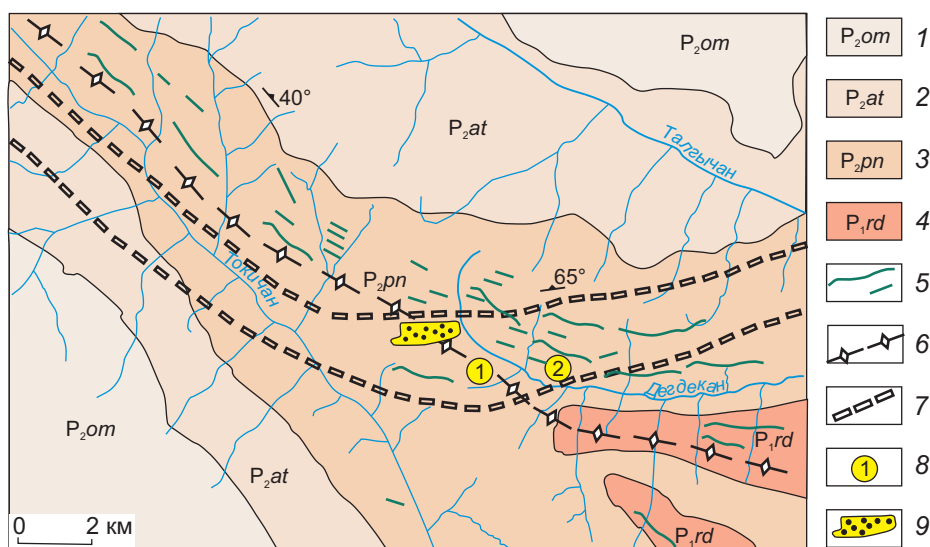


Рис. 3. Геолого-структурная схема северо-западного участка Тенькинского рудного района (составлена по материалам (Ю. П. Карелин и др., 1990)):

верхнепермские свиты: 1 – омчакская (алевролиты, глинистые сланцы, прослой диамиктитов), 2 – атканская (диамиктиты, алевролиты, песчаники, когломораты), 3 – пионерская (глинистые сланцы, алевролиты, песчаники); 4 – нижнепермская родионовская свита (алевролиты, алевролитовые глинистые сланцы с прослоями алевролитов и песчаников); 5 – позднемерловые и позднеюрские дайки; 6 – ось Тенькинской антиклинали; 7 – контуры Дегдеканской зоны складчатых дислокаций; 8 – золото-кварцевые месторождения: 1 – Верное, 2 – Дегдекан; 9 – площадь распространения золото-битумной минерализации

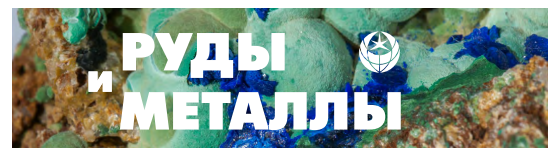
Fig. 3. Schematic geological-structural map of the northwestern Tenkinsky ore region (compiled based on materials from Yu. P. Karelin et al., 1990):

Upper Permian formations: 1 – Omchak (siltstones, shales, diamictite interlayers), 2 – Atkan (diamictites, siltstones, sandstones, conglomerates), 3 – Pioneer (shales, siltstones, sandstones); 4 – Lower Permian formation: Rodionovskaya (siltstones, silty shales with interlayers of siltstones and sandstones); 5 – Late Cretaceous and Late Jurassic dikes; 6 – axis of the Tenkinsky anticline; 7 – outlines of the Degdekan zone of folded dislocations; 8 – gold-quartz ore deposits: 1 – Vernoe, 2 – Degdekan; 9 – area of distribution of gold-bitumen mineralization

ся пробирно-спектральный анализ с исходными навесками материала 50–100 г. Было установлено, что повышенные концентрации золота связаны с перераспределением ОВ и битуминизацией осадочных пород в пределах Дегдеканской зоны складчатых дислокаций. Это явилось основанием для выделения золото-битумного типа оруденения в составе золото-углеродистой формации, в котором единственным концентратором золота являются нефтеподобные битумы. Для определения контура распространения золото-битумной минерализации использовались пробы слабоветрелых пород с содержаниями металла около 1 г/т и более, а также более интенсивно изме-

нённые породы с содержаниями до десятых долей г/т. Во всех случаях использовались пробы с содержанием $C_{орг.} > 1,5 \%$. Выделенная золото-битумная залежь в плане имеет линзовидную форму размером 800×2500 м со средним содержанием металла 2,94 г/т.

Дегдеканская зона складчатых дислокаций, с которой связано формирование золото-битумной минерализации, прослежена от верхнего течения р. Дегдекан вдоль долины р. Токичан до её верховьев (см. рис. 3). Видимая мощность структуры в бассейне р. Дегдекан – 2,5 км, р. Токичан – 1,5 км. Зона пересекает шарнир Тенькинской антиклинали под острым углом и представлена изоклиналь-



ми складками, запрокинутыми к югу. Общее восточно-северо-восточное простирание осей складок к западу постепенно сменяется на субширотное и северо-западное. В плане зона складчатых дислокаций имеет дугообразную форму, обращённую выпуклой стороной к югу, и по механизму формирования отвечает зоне «пластичного надвига». Надвиговые движения пластичных осадочных пород обусловили деформацию северо-восточного крыла Тенькинской антиклинали и её локальный изгиб в районе Дегдеканского рудного поля. Зона складчатых дислокаций сформировалась в поздне меловое время после внедрения позднеюрских даек и синхронных с ними золото-кварцевых руд Дегдеканского рудного поля. В зоне интенсивной складчатости дайки были будинированы, а золотоносные кварцевые жилы и прожилки – будинированы и птигматизированы.

Формирование выделенной структуры сопровождалось неравномерными метаморфическими преобразованиями рудовмещающей толщи, проявившимися в серицитизации сланцев, замещении сингенетичного пирита пиротином, раскристаллизации кремнистых пород, перераспределении и графитизации ОВ. На большей части изученной территории, где указанные признаки проявлены весьма интенсивно, установлено снижение содержания $C_{орг.}$ на 30–50 % (в графитизированных сланцах составило 1 %, в диамиктитах – 0,38 %). В пределах новообразованной складчатой структуры осадочные породы испытали в целом слабые метаморфические изменения, выраженные в незначительной перекристаллизации породообразующих минералов. Это подтверждается широким распространением в её пределах сохранившегося сингенетичного пирита и менее карбонизированных микровключений ОВ – керита, антраксолита, фрагментов углистого вещества. Дегдеканская зона складчатых дислокаций выделяется повышенным содержанием органического углерода (в среднем 1,8 % в глинистых сланцах, 0,7 % – в диамиктитах) и широким разбросом частных количественных определений $C_{орг.}$ (от 0,4 до 4,2 %).

Геологическая структура зоны изоклиальной складчатости указывает на чередование в ней областей выжимания и нагнетания разного порядка, что стало причиной перераспределения первичных концентраций рассеянной органики. В местах нагнетания (антиклинали) содержание углерода может увеличиться до 3–4 %, а выжимания (синклинали) – уменьшиться до 0,4–0,6 %. Распределение ОВ в деформированных сланцах строго подчинено рисунку складчатости (рис. 4). Наиболее интенсивно перераспределение и нагнетание углеродистого вещества, имеющего более низкую вязкость по сравнению с вмещающей средой, проявились на участке пересечения оси Тенькинской антиклинали Дегдеканской зоной складчатых дислокаций, где, кроме высокотемпературных микровключений ОВ, наблюдаются миграционные формы битумов, образующие в породе тонкие гнездовидные включения размером 0,00n–0,0n мм. Для осадочных пород этой части структуры характерно наиболее высокое содержание углерода (1,8–2,7 %).

Золото-битумная минерализация. В МГУ на кафедре горючих полезных ископаемых проведён пиролиз и битуминологический анализ битумоидов, выделенных из сланцев с содержанием $C_{орг.}$ 2,4 % и Au 0,6 г/т. В породе установлены свободные жидкие углеводороды в количестве 0,011 % и остаточные – 0,027 %. Состав этих компонентов определялся на хромато-масс-спектрометре Thermo Focus II. Полученные данные характеризуют присутствие в углеродистых сланцах алкановых и циклических нафтеновых и ароматических углеводородов. По составу углеводородов установлено, что условия накопления углеродистых осадков отвечают восстановительной геохимической обстановке в отсутствие сероводородного заражения вод бассейна. Исходным материалом для керогена послужило гумусово-сапропелевое вещество. Низкотемпературные битумы представлены ОВ сапропелевого типа, имеют миграционную природу и мигрировали из толщи, достигшей условий главной фазы нефтеобразования в интервале температур 110–250 °С. Они представлены хлорофор-

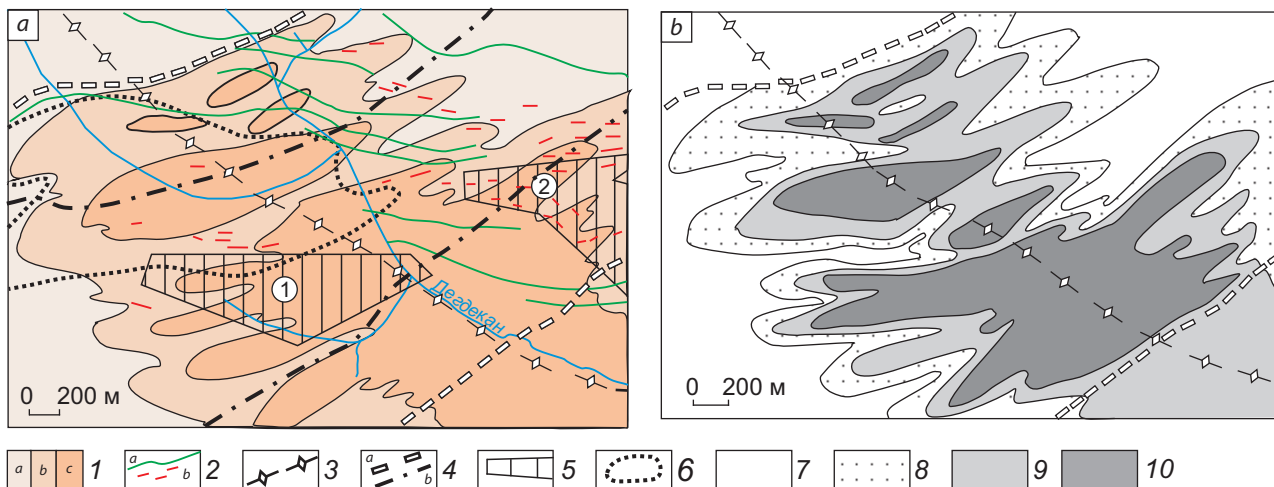


Рис. 4. Литолого-структурная схема участка пересечения Тенькинской антиклинали Дегдеканской зоной складчатых дислокаций (а) и схема распределения $C_{орг}$ в сланцах пионерской свиты (б):

1 – ритмопачки пионерской свиты: а – верхняя, б – средняя, с – нижняя; 2 – дайки: а – поздне меловые, б – позднеюрские; 3 – ось Тенькинской антиклинали; 4 – границы Дегдеканской зоны складчатых дислокаций (а), тектонические нарушения (б); 5 – контуры золото-кварцевых месторождений: 1 – Верное, 2 – Дегдеканское; 6 – площадь распространения золото-битумной минерализации; содержания $C_{орг}$, в %: 7 – ≤ 1 , 8 – 1–1,5, 9 – 1,5–2, 10 – > 2

Fig. 4. (a) Schematic lithological-structural map of the intersection of the Tenkinsky anticline with the Degdekan zone of folded dislocations and (b) scheme of distribution of C_{org} in shales of the Pioneer Formation:

1 – rhythmic units of the Pioneer Formation: a – upper, b – middle, c – lower; 2 – dikes: a – Late Cretaceous, b – Late Jurassic; 3 – axis of the Tenkinsky anticline; 4 – (a) boundaries of the Degdekan zone of folded dislocations and (b) faults; 5 – outlines of the gold-quartz ore deposits: 1 – Vernoye, 2 – Degdekanskoje; 6 – area of distribution of gold-bitumen mineralization; C_{org} contents, in %: 7 – ≤ 1 , 8 – 1–1.5, 9 – 1.5–2, 10 – > 2

менными (ХБ) и спирто-бензольными (СББ) битумоидами, обогащёнными гетеросоединениями. Содержание ХБ битумоидов в породе – 0,016 %, СББ – 0,018 %. Результаты анализа выделенных битумоидов свидетельствуют о высоком содержании в них асфальтенов: в ХБ – 20,8 %, в СББ – 70,8 %. По количеству масел (37,5 %) в составе битумоидов миграционное ОВ можно отнести к асфальтам.

Учитывая, что сланцы пионерской свиты в разной степени окислены, то количество выделенных миграционных битумов является остаточным продуктом гипергенного изменения микронепфти. В результате интенсификации процессов химического выветривания происходило окисление в первую очередь битумоидов, сопровождавшееся выносом металла в составе гипергенных растворов (табл. 2). Исходя из анализа содержаний $C_{орг}$ и Au в

разных гипергенных зонах первичная битуминозность и золотоносность в невыветрелых породах могла быть выше. Окисление органических соединений выражается в замещении атомов водорода, находящихся в химической связи с углеродом, атомами кислорода, азота и серы, в том числе атомами двухвалентной серы – сульфидной [17]. Количество углерода изменяется незначительно или увеличивается, происходит образование кислород- и серосодержащих функциональных групп. В результате асфальт, окисляясь, преобразуется в оксикерит, характеризующийся повышенным содержанием кислородных соединений, рыхлой структурой и лучшим взаимодействием с водной средой.

В битуминизированных осадочных породах концентрация золота увеличивается. Установлено, что наиболее золотоносными являются

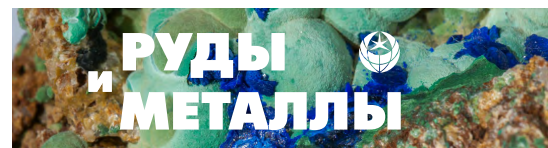


Табл. 2. Содержания золота и органического вещества в битуминизированных сланцах в зависимости от их положения в зонах гипергенеза

Table 2. Contents of gold and organic matter in the bituminized shales, depending on their position in hypergene zones

Степень окисления пород	Число проб	Среднее содержание		Коэффициент корреляции	
		Au, г/т	C _{орг.} , %	фактический	теоретический
Слабоокисленные	23	2,1	2,15	0,764	0,381
Среднеокисленные	42	0,32	2,07	0,288	0,25
Сильноокисленные	35	0,12	2,02	0,24	0,275

сланцы с содержаниями C_{орг.}, превышающими 1,8 %. В результате анализа распределения содержаний золота и органического углерода в сланцах пионерской свиты были определены контуры развития золото-битумной минерализации. Она представлена крупной линзовидной залежью размером 500–800 × 2500 м (см. рис. 4, а), характеризующейся содержаниями Au от 0,04 до 14,2 г/т (226 проб) и незначительными концентрациями S и As.

Главным концентратом золота, как показали детальные исследования на электронном микроскопе с лазерным микроанализатором, являются низкотемпературные битумы (асфальт), в которых содержания металла составили 244–629 г/т (ИГФМ Украинской национальной академии наук). Парагенетическая связь золота с ОВ подтверждается также высоким коэффициентом корреляции Au – C_{орг.}, равным 0,76 при K_{крит.} = 0,28. Результаты сканирования по профилю битумного выделения показали зонально-концентрическое распределение золота и серебра: максимальные концентрации золота фиксируются в центральной его части, к периферии снижаются и являются значимые содержания серебра.

Золото образует в битумоидах субмикроскопические выделения размером от 1–10 до 20–25 мкм и представлено двумя морфологическими типами: 1 – преобладают комковидные изометрично-округлые формы с гладкой слабоструктурированной поверхностью, пробность 800–890 ‰; 2 – реже встречается палочковидное золото со слабобугристой поверхностью с отдельными ответвлениями, пробность 730 ‰ (рис. 5). Некоторые относи-

тельно крупные знаки были изучены с применением сканирующего электронного микроскопа JSM 5300 с энергодисперсионным анализатором Link в лаборатории электронной микроскопии ИГЕМ РАН. В изученном золоте установлены примеси Ag, Al и C, в палочковидном – до 1,5 % Fe. Элементный состав и пробность золота рассчитаны по программе SEM-Qant аналитиком М. И. Лапиной.

Таким образом, при формировании Дегдеканской зоны складчатых дислокаций углеродистые сланцы испытали неравномерный дислокационный метаморфизм. Известно, что в условиях повышения температуры и давления сапропелевый материал генерирует гамму газообразных гомологов метана, низкокипящих жидких, а также более тяжёлых углеводородов. В совокупности этот комплекс углеводородных компонентов ОВ формирует основу микронепти, многие фракции которой, особенно асфальтеновые, хорошо растворяют золото. Процессы образования подвижных форм металлосодержащих битумов, их миграция и локализация в благоприятных структурах контролируются мощной зоной складчатых деформаций. Источник металла в данном случае – осадочные породы Дегдеканского рудного поля.

Приведённый фактический материал показывает тесную связь становления золото-битумного рудопроявления, выделенного в чёрных сланцах Центральной Колымы, со складчатыми дислокациями углеродистых толщ. Также известны пространственная связь многих золото-сульфидных месторождений с областями развития углеродистых формаций, подвергшихся интенсивной складчатости, и

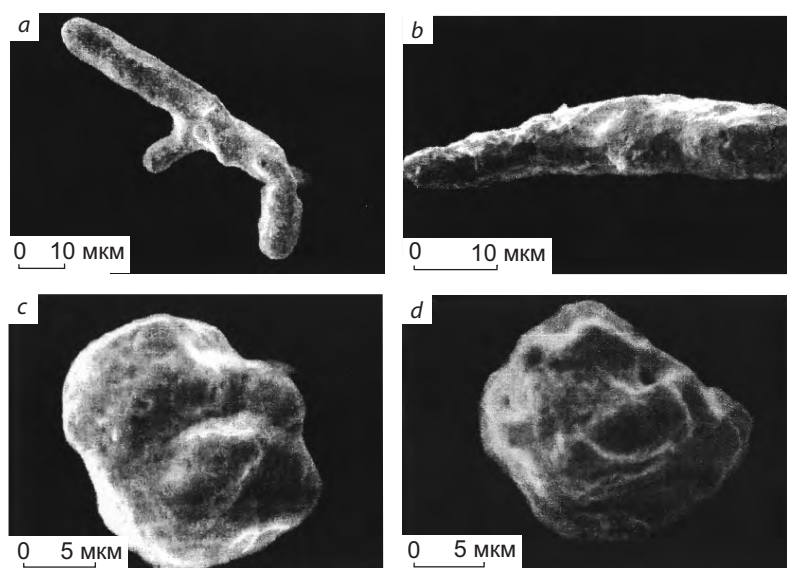


Рис. 5. Морфология выделений самородного золота в черносланцевых породах с золото-битумной минерализацией. Проба У-62 из расчистки № 1: *a, b* – палочковидные выделения; *c, d* – комковидные изометрично-округлые выделения

Fig. 5. Morphology of native gold segregations in black shale rocks with gold-bitumen mineralization. Sample U-62 from Cutting No. 1:

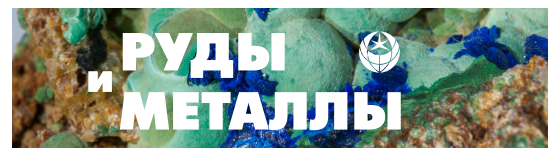
a, b – stick-shaped segregations; *c, d* – lump-shaped isometric-rounded segregations

присутствие в рудах битумов и углеводородных соединений в газовой и жидкой формах. Примером могут быть месторождения Байкало-Патомской провинции (Сухой Лог, Вернинское и др.), приуроченные к замковым частям антиклинальных складок и сосредоточенные в локальных зонах углеродистой толщи с аномальными концентрациями $C_{орг.}$.

Байкало-Патомская провинция – один из основных источников золота в Восточной Сибири. Она расположена в пределах одноимённой складчатой системы, которая, в свою очередь, является частью Саяно-Байкальской складчатой области, обрамляющей Сибирскую платформу, и приурочена к её северной части. Основная золотоносная структура Байкало-Патомской провинции – Бодайбинский синклиний, в пределах которого сосредоточены основные коренные месторождения золота. Большую часть площади Патомского нагорья (90 %) занимают флишеидные терригенные, терригенно-карбонатные и карбонатные формации позднего рифея и венда, сформированные в относительно глубоком Бодайбинском бассейне. Рудовмещающими породами для месторождений золота служат породы хомолхинской и аунакитской свит с повышенными исходными содержаниями металла, которые часто варьируют в пределах трёх-пятикрат-

ного и до десятикратного превышения кларковых значений. Содержания $C_{орг.}$ в породах рассматриваемой части разреза терригенной толщи также сильно изменяются: от десятых долей до 1–3,7 % в сланцах аунакитской свиты, среднее 1,23 % (194 пробы), до 5,7 % – в хомолхинской, среднее 1,36 % (83 пробы) (С. Д. Шер и др., 1984). Залегающие выше по разрезу отложения вачской свиты отличаются от рудовмещающих толщ повышенным содержанием $C_{орг.}$ – среднее 2,1 % (53 пробы), а также незначительной примесью известковистого материала (CO_2 до 2,5 %).

Важный этап в истории развития осадочных отложений Бодайбинского бассейна – покровно-складчатые деформации в венд-кембрийское время, в результате которых породы были смяты в субширотные линейные складки различной морфологии – от широких синклиналей до тесно сжатых антиклиналей [12, 23]. В этот период на месте Бодайбинского прогиба сформировался крупный одноимённый синклиний, разделённый субширотными зонами надвигов на синформы и антиформы. В Бодайбинском синклинии известные месторождения золото-сульфидной формации приурочены к зонам наиболее интенсивной складчатости, осложняющим крылья крупной синклиналиной структуры.



Вернинско-Невская зона смятия мощностью 3–4 км и протяжённостью в десятки километров контролирует распространение прожилково-вкрапленной золото-сульфидной минерализации Вернинского и Невского месторождений. Она представлена серией кулисообразно чередующихся антиклиналей и синклиналей. Самая главная из них – Вернинская антиклиналь, сильно сжатая и опрокинута на юг под углами 35–40°, осложнена более пологими антиклинальными складками, мелкой складчатостью и гофрировкой, кливажем течения и скола, а также субширотными разрывами, сопровождающимися серией оперяющих трещин. В центральной части антиклинали, сложенной осадочными породами нижней подсвиты аунакитской свиты вендского возраста, расположено Вернинское месторождение (рис. 6, 7). Подсвета мощностью 100–400 м представлена переслаивающимися филлитовидными сланцами, алевролитами, песчаниками, известковистыми породами и известняками. В слоистых пачках этой подсвиты, вблизи контакта с известняками, в нормальном и опрокинутах крыльях антиклинали, а также в её приосевой части выделено несколько рудных залежей, согласных с напластованием пород.

Влияние пластических деформаций на концентрацию золота и ОВ в породах аунакитской свиты можно продемонстрировать на примере опорного пересечения Вернинско-Невского рудного поля (БЛ +9) протяжённостью около 4 км (рис. 8, а). По этому разрезу из керн-скважин были отобраны пробы с интервалом 10–15 м, здесь же отбирался материал для изготовления полированных и прозрачных шлифов. На основании анализа и обобщения полученных аналитических данных и микроскопических исследований составлена литолого-петрографическая характеристика пород и изучены закономерности распределения золота и ОВ в пределах складчатой структуры.

Особенностями рудовмещающей толщи являются неравномерное распределение ОВ и широкое распространение в углеродистых тонкозернистых породах сингенетичного пирита

[4]. Содержание $C_{орг.}$ в осадочных породах аунакитской свиты варьирует от десятых долей до 3,7 % и зависит как от литофациальных условий формирования осадка, так и от степени вторичных преобразований. Органическое вещество, присутствующее в рудах и вмещающих породах, имеет сложный фракционно-групповой состав и представлено тонкорассеянным нерастворимым углеродистым веществом (керогеном) и незначительным количеством битумоидов (ХБ (0,004–0,005 %) и СББ (0,001–0,009 %)). По данным В. А. Виленкина, суммарное содержание битумоидов увеличивается по направлению к рудной зоне примерно в 1,5 раза, при этом относительное содержание ХБ снижается, а СББ – возрастает в 3,5–4,5 раза. В рассеянном органическом веществе из околорудной зоны установлена концентрация ХБ 0,7 % и СББ 0,2 %, в рудной зоне соответственно 0,42–0,57 % и 0,66–0,94 % [19]. Результаты анализа показали, что в битумоиде (СББ) присутствуют две формы золота: химически связанное (фильtrat) и «свободное», которое можно представить в виде восстановленных форм коллоидных высокодисперсных частиц или ультрадисперсных кластерных частиц. Все выделенные фракции битумоида содержат золото, но наибольшей золотоносностью обладают асфальтены и асфальтеновые кислоты, на долю которых приходится соответственно 6,05 и 12,03 %. Содержание золота в этих фракциях составляет 3,5 и 0,91 г/т.

Выделения ОВ, как рассеянные, так и сегрегационные, насыщены пылевидным глобулярным пиритом, количество которого зависит от содержания $C_{орг.}$ в породе. С участками распространения глобулярного пирита в углеродистых осадочных комплексах аунакитской свиты связаны аномальные содержания золота, составляющие десятые доли г/т. Такие участки наиболее характерны для антиклинальных замыканий складчатой структуры. Степень золотоносности глобулярного пирита, определённая путём расчёта по содержанию золота и сульфидной серы во вмещающих породах, в среднем составила 26 г/т (С. Д. Шер и др., 1984). Исследование отдельных глобулей на электронном сканирующем микроскопе

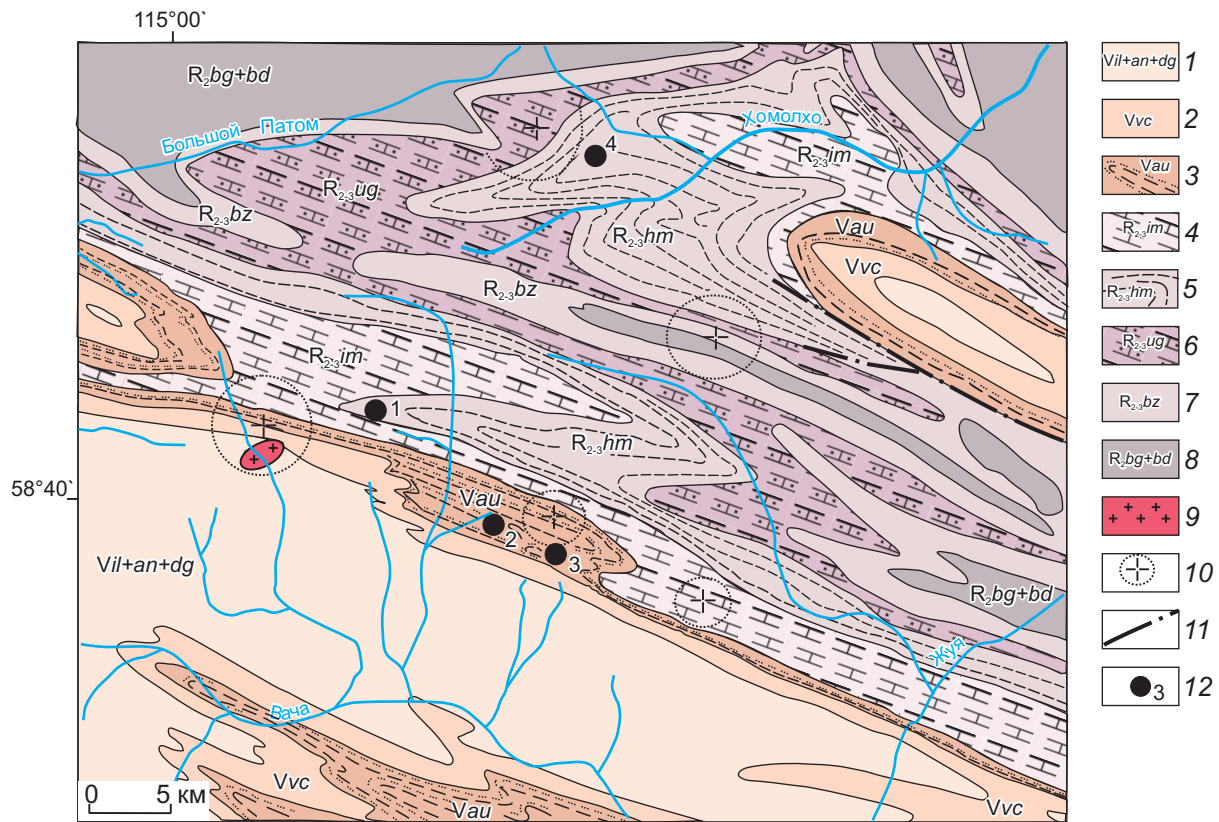


Рис. 6. Схематическая геологическая карта центральной части Патомского нагорья (составлена по материалам [8]):

вендские свиты: 1 – илигирская, догалдынская, анангрская (песчаники аркозовые, полимиктовые, реже граувакковые, прослои сланцев, гравелиты), 2 – вачская (сланцы с прослоями кварцевых песчаников), 3 – аунакитская (сланцы, алевролиты, прослои кварцевых песчаников, часто известковистых, известняки); средне-верхнерифейские свиты: 4 – имняхская (известняки, алевролиты, сланцы, песчаники), 5 – хомолхинская (сланцы, алевролиты с редкими прослоями песчаников), 6 – угаханская (известняки с редкими прослоями сланцев и песчаников), 7 – бужуихтинская (песчаники, сланцы); среднерифейские: 8 – бугорихтинская, бодайбоканская (песчаники полимиктовые с прослоями сланцев, в верхней части – известняки с прослоями сланцев); 9 – гранитоиды конкудер-мамаканского комплекса; 10 – контур невоскрытых гранитоидных массивов (по геофизическим данным); 11 – тектонические нарушения; 12 – золото-сульфидные месторождения (1 – Сухой Лог, 2 – Вернинское, 3 – Невское, 4 – Голец Высочайший)

Fig. 6. Schematic geological map of the central Patom Highlands (compiled based on materials from [8]):

Vendian formations: 1 – Iligir, Dogaldyn, Anangra (arkosic, polymictic, less often greywacke sandstones; shale interlayers; gravelites), 2 – Vacha (shales with interlayers of quartz sandstones), 3 – Aunakit (shales; siltstones; interlayers of quartz sandstones, often calcareous; limestones); Middle-Upper Riphean formations: 4 – Imnyakhskaya (limestones, siltstones, shales, sandstones), 5 – Khomolkha (shales, siltstones with rare interlayers of sandstones), 6 – Ugakhanskaya (limestones with rare interlayers of shales and sandstones), 7 – Buzhuikhtinskaya (sandstones, slates); Middle Riphean: 8 – Bugorikhtinskaya, Bodaibokanskaya (polymictic sandstones with shale interlayers; in the upper section, limestones with shale interlayers); 9 – granitoids of the Konkuder-Mamakan suite; 10 – outlines of unexposed granitoid massifs (according to geophysical data); 11 – faults; 12 – gold-sulfide ore deposits (1 – Sukhoi Log, 2 – Verninskoye, 3 – Nevskoye, 4 – Golets Vysochaishy)

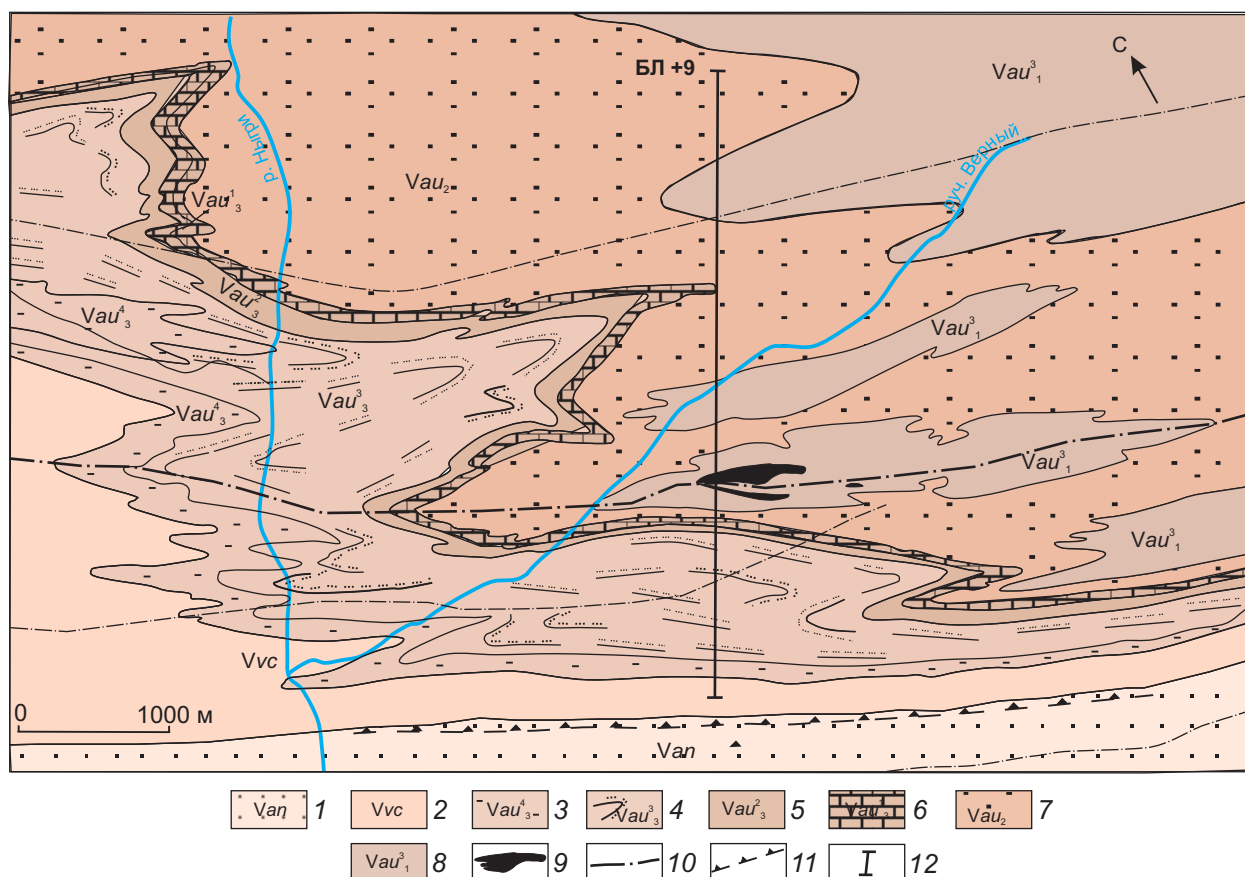


Рис. 7. Геологическая карта западного фланга Вернинско-Невского рудного поля (составлена по материалам (А. Д. Баранов и др., 1981)):

вендские свиты: 1 – илигирская, догалдынская, анангрская (песчаники полимиктовые и аркозовые, прослой сланцев), 2 – вачская (сланцы, прослой песчаников), аунакитская свита: пакчи верхней подсвиты: 3 – четвёртая (слабоизвестковистые сланцы, алевролиты, тонкие прослой песчаников), 4 – третья (грубое переслаивание кварцевых песчаников, известковистых сланцев и алевролитов), 5 – вторая (известковистые сланцы с редкими прослоями песчаников), 6 – первая (известняки, известковистые сланцы, реже песчаники), 7 – средняя подсвита (сланцы, алевролиты, тонкие прослой известковистых песчаников), 8 – нижняя подсвита (переслаивание сланцев, алевролитов, песчаников, известняков); 9 – рудные залежи; 10 – тектонические нарушения; 11 – надвиг; 12 – линия разреза

Fig. 7. Geological map of the western flank of the Verninsko-Nevsky ore field (compiled based on materials from A. D. Baranov et al., 1981):

Vendian formations: 1 – Iligir, Dogaldy, Anangra (polymictic and arkosic sandstones, shale interlayers), 2 – Vacha (shales, sandstone interlayers); Aunakit formation: members of the upper subformation: 3 – fourth (weakly calcareous shales, siltstones, thin sandstone interlayers), 4 – third (coarse interlayering of quartz sandstones, calcareous shales, and siltstones), 5 – second (calcareous shales with rare sandstone interlayers), 6 – first (limestones, calcareous shales, less often sandstones); 7 – middle subformation (shales, siltstones, thin layers of calcareous sandstones), 8 – lower subformation (interlayering of shales, siltstones, sandstones, limestones); 9 – ore deposits; 10 – faults; 11 – thrust; 12 – section line

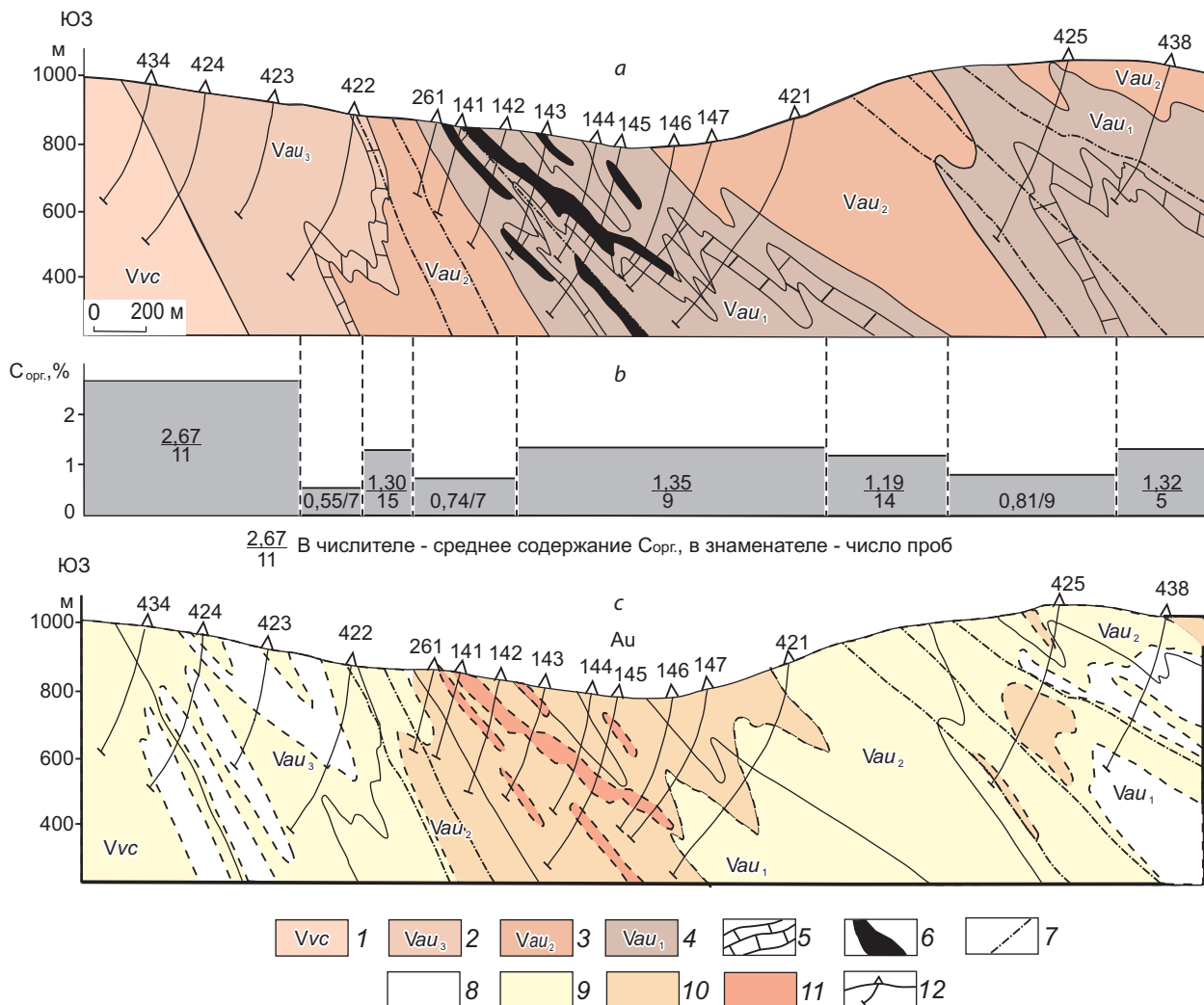


Рис. 8. Геологический разрез по линии БЛ +9 (а), распределение содержаний $C_{орг.}$ (b) и золота (c) в сланцах аунакитской свиты:

1 – вачская свита (сланцы, прослои песчаников); аунакитская свита: 2 – верхняя подсвита (сланцы, алевролиты, кварцевые песчаники, известковистые сланцы и песчаники, известняки), 3 – средняя подсвита (сланцы и алевролиты с тонкими прослоями песчаников), 4 – нижняя подсвита (сланцы, алевролиты, песчаники, известняки), 5 – известняки с тонкими прослоями известковистых сланцев; 6 – рудные залежи; 7 – тектонические нарушения; содержание золота, г/т: 8 – 0,001–0,01, 9 – 0,01–0,1, 10 – 0,1–1, 11 – ≥ 1 ; 12 – буровые скважины и их номера

Fig. 8. Geological section along line БЛ +9 (a) and the distribution of (b) $C_{орг.}$ and (c) gold in shales of the Aunakit Formation:

1 – Vacha Formation (shales, sandstone interlayers); Aunakit formation: 2 – upper subformation (shales, siltstones, quartz sandstones, calcareous shales and sandstones, limestones), 3 – middle subformation (shales and siltstones with thin sandstone interlayers), 4 – lower subformation (shales, siltstones, sandstones, limestones), 5 – limestones with thin interlayers of calcareous shales; 6 – ore deposits; 7 – faults; gold content in g/t: 8 – 0.001–0.01, 9 – 0.01–0.1, 10 – 0.1–1, 11 – ≥ 1 ; 12 – boreholes and their numbers

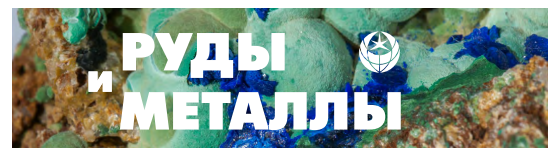


Табл. 3. Элементный состав сингенетических сульфидов аунакитской свиты и содержание в них основных элементов-примесей

Table 3. Elemental composition of syngenetic sulfides in the Aunakit Formation and their contents of major trace elements

Сульфиды		Число анализов	Fe	S	Au	Ag	As	Ni	Co
			%		г/т		%		
Пирит глобулярный	ядро	3	47,4	53	698	< 1	0,0753	0,044	< 0,0001
	оболочка	3	45,6	53,5	< 1	221	0,2534	0,077	< 0,0001
Пирит линзовидный		4	46,8	52,9	< 1	< 1	0,0207	0,06	< 0,0001
Пирротин		5	59,5	38,4	< 1	< 1	< 0,0001	0,26	0,01

подтвердили его высокую золотоносность² (табл. 3), сопоставимую с содержанием золота в пиритах современных субмаринных колчеданных построек [1]. Послойный характер распределения в рудовмещающей толще и тесная ассоциация с ОВ свидетельствуют о формировании тонкозернистого пирита из гидротермальных растворов на стадии седиментации. Образование фрамбоидального пирита в морских осадках связывается с деятельностью сульфатредуцирующих бактерий. Рядом исследований доказана способность микроорганизмов концентрировать металлы, особенно велика роль бактериальных сообществ в накоплении золота. В позднерифейском бассейне БПР установлено развитие разных типов водорослей и бактерий. Судя по морфологии и размерам микрофоссилий, основной объём ОВ поставлялся бентосом бактериальных сообществ [16].

Комплексное изучение керна скважин, проведённое на опорном пересечении Вернинского рудного поля (БЛ +9) длиной около 4 км, позволило установить ряд закономерностей, связанных со складчатыми структурами. Рудовмещающая толща при формировании Вернинско-Невской зоны смятия испытала неравномерные метаморфические преобразования. Структурные изменения наиболее отчётливо прослеживаются в прослоях и горизонтах пес-

чаников аунакитской свиты. Псаммитовые мелко-среднезернистые кварцевые песчаники с кварц-карбонатным контактовым, поровым, иногда базальным типом цементации распространены в осевой части антиклинали; на крыльях складки они сменяются кварцито-песчаниками, а за пределами складчатой структуры – кварцитами. В этом же направлении усиливается степень мраморизации известняков от мелкозернистых, местами с реликтами оолитовой структуры, до мраморов.

Сульфидная минерализация представлена почти исключительно пиритом, образующим по форме разнообразные выделения. Сингенетические сульфиды, широко распространённые в углеродистых сланцах, образуют последовательный морфогенетический ряд от оси антиклинали к флангам зоны: рассеянная и послойная пылевидная вкрапленность глобулярного пирита в осевой зоне → линзовидные выделения («глазковые») и прослой тонкокристаллического пирита на крыльях складки → мелколинзовидные выделения и прослой пирротина на флангах складчатой структуры и за её пределами. Перекристаллизация сингенетического пирита сопровождалась значительным снижением концентрации золота. Глобулярный пирит образует рассеянную вкрапленность, сгустки и послойные скопления, присутствует в рудных зонах и часто встречается в образовавшихся позже метакристаллах пирита и арсенипирита. Перекристаллизация сингенетического пирита сопровождалась снижением концентрации золота, серебра, серы

² Исследования выполнялись на электронном микроанализаторе СХА-773 в лаборатории импортного оборудования ИГФМ Украинской национальной АН (оператор А. С. Иванов).

и мышьяка в мелколинзовидных и послойных выделениях пирита и пирротина (см. табл. 3) и появлением рассеянной вкрапленности метакристаллов кубического пирита размером от n мм до 2–3 см.

Неравномерный динамометаморфизм углеродистой толщи, связанный с чередованием областей пластического выжимания и нагнетания разных размерных порядков, сопровождался изменением состава и содержания ОВ. В осевой, наименее метаморфизованной части антиклинали, углеродистая фракция представлена преимущественно керитом и антраксолитом, на крыльях складки – шунгитом [7]. Изотопные исследования ОВ вмещающих пород и руд подтверждают, что выделенный битумный ряд керит – антраксолит – шунгит наследует осадочную природу морской органики (С. Г. Кряжев и др., 2012). За пределами зоны смятия в породах, метаморфизованных в зеленосланцевой фации, примесь углеродистого материала, по данным рентгеноструктурных и термографических исследований, преобразована до графита слабоупорядоченной формы.

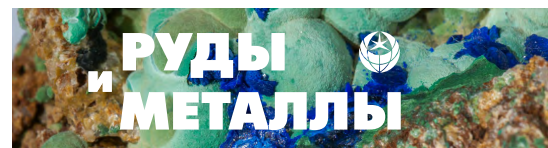
В замковой части Вернинской антиклинали, представляющей мощную зону нагнетания, широко проявлены гофрировка, будинаж, кливаж течения, которые сопровождалась локальным перераспределением тонкорассеянного ОВ и породообразующих минералов с образованием сегрегаций углеродистого и кварцуглеродистого состава в виде гнёзд, линз и прожилков. С этими деформациями связана высокая дисперсия содержаний $C_{орг.}$ от 0,4 до 3,7 % в сланцах, от 0,2 до 1,1 % в песчаниках. С глубиной в осадочных породах антиклинали отмечаются тенденция снижения эффективной пористости пород, содержания $C_{орг.}$ и появление шунгита в составе керогена, что свидетельствует о нарастании напряжения в этой части складчатой структуры сверху вниз. В результате складчатых деформаций в замковой части антиклинали реализуются условия растяжения, а ниже – условия сжатия. Судя по интенсивности преобразования осадочных пород, наибольшее сжатие испытали синклинали и крылья складок, которые вы-

деляются равномерным распределением ОВ и уменьшением концентрации $C_{орг.}$ в 1,5–2 раза (см. рис. 8, *b*). Слабый дислокационный метаморфизм также проявлен на юго-западе представленного разреза в породах вачской свиты и верхней части аунакитской, по-видимому, оказавшихся в зоне влияния надвига. В пределах зоны складчатых дислокаций прослеживается вполне очевидная связь уровня золотоносности толщи с областями разуплотнения пород. Наиболее высокие содержания металла приурочены к замковым частям антиклиналей и пространственно совпадают с аномальными концентрациями органического углерода (см. рис. 8, *c*).

Как показали исследования, проведённые в пределах изученного разреза протяжённостью около 4 км (см. рис. 8), рудовмещающая углеродистая толща в дорудный этап покровно-складчатых деформаций испытала неравномерные термодинамические преобразования. Надёжным индикатором этого процесса, наряду со структурно-вещественными признаками, является ОВ. Присутствие керита, антраксолита и шунгита в осадочных породах складчатой структуры свидетельствует, что степень их преобразования не превышала метагенеза [21].

Деструкция ОВ в зонах повышенных стрессовых напряжений (зоны выжимания) сопровождалась генерацией газообразных и жидких углеводородов, гетерогенных комплексов, H_2O , H_2S и выносом золота в составе этих углеводородных флюидов в области нагнетания. Дальнейшее увеличение стрессовых напряжений на более глубоких горизонтах, на флангах складчатой структуры, а также за её пределами завершилось выносом из рудовмещающей толщи, учитывая масштабы распространения пирротина, значительного количества серы. Высокая сорбционная способность серы позволяет предположить её большую роль в формировании золото-сульфидных месторождений.

Со следующим этапом палеозойской тектоно-магматической активизации связаны гидротермально-метасоматические преобразования осадочных толщ, которые начались с появления метакристаллов магнезиально-же-



лезистых карбонатов и последующего образования прожилково-вкрапленных золото-сульфидных руд. Разгрузка рудоносных растворов и формирование стратиформных залежей происходили в замковой части складки, сложенной породами с повышенной эффективной пористостью. Рудные тела имеют линзовидную форму и представлены гнездовидными скоплениями крупнокристаллических золотосодержащих пирита и арсенопирита, реже арсенопиритовыми прожилками. Ориентировка кристаллов, секущих слоистость и сланцеватость вмещающих пород, а также недеформированные порфиروبласты карбонатов с равномерным распределением тонкодисперсного керогена свидетельствуют о формировании их в условиях отсутствия тектонических напряжений. Сульфидные агрегаты пересекают продукты дислокационного метаморфизма – углеродсодержащие минеральные комплексы, а присутствие органического вещества в рудовмещающих породах не оказывает существенного влияния на распределение сульфидов. Наиболее благоприятными для развития прожилково-вкрапленной золото-сульфидной минерализации во флишоидной карбонатно-терригенной толще являются наименее углеродистые и наиболее проницаемые прослойки и горизонты псаммитовых песчаников. Для вкрапленных метакристаллов сульфидов характерны видимые выделения золота (сотые доли миллиметра). Кроме свободного золота в рудах присутствует трудноизвлекаемое, связанное с гидротермально-осадочным пиритом, и незначительное количество – с реликтами битумоидов.

Сухоложская антиклиналь – наиболее яркий структурный элемент Бодайбинского золоторудного района. Она расположена севернее Вернинско-Невской зоны смятия и сложена терригенными и терригенно-карбонатными породами хомолхинской и имняхской свит средне-познерифейского возраста (рис. 9). Месторождение Сухой Лог локализовано в породах верхней подсвиты хомолхинской свиты, в которой преобладают углеродистые филлитовидные сланцы и алевролиты. Важнейшим рудо-локализирующим элементом структуры рудного

поля является зона смятия северо-западного простирания, пересекающая ось антиклинали под углом 8–10°. Она, хотя не имеет резких геологических границ, достаточно отчетливо маркируется по совокупности структурных элементов. Максимальная мощность зоны смятия отмечается в центральной части рудного поля и составляет 200–250 м. Зона имеет сложное строение как по падению, так и по простиранию и характеризуется широким развитием пластических деформаций, сочетающихся с хрупкими разрывами. В ней широко проявлены мелкая складчатость сложной формы и гофрировка, осложняющие плоскости кливажных трещин, и многочисленные зоны повышенного рассланцевания, ориентированные под острым углом к трещинам приосевого кливажа. Структурным элементам выделенной зоны смятия подчинены распределение и морфология проявлений кварцевой и пиритовой минерализации. По характеру деформаций и особенностям внутреннего строения зона была отнесена к разрывным структурам сдвига-надвиговой природы с незначительными амплитудами перемещений и широкими проявлениями пластических деформаций [13]. Решение вопроса о возрастных соотношениях антиклинали и зоны смятия имеет большое значение для понимания генезиса золото-сульфидной минерализации месторождения.

После завершения складчатости рудовмещающие породы месторождения испытали гидротермально-метасоматические преобразования, более интенсивные по сравнению с Вернинским месторождением. Характерными для метасоматитов месторождения являются порфиروبласты магнезиально-железистых карбонатов линзовидной, ромбоидальной и изометрической формы размером до 2,5 × 3,5 мм и кварца размером 0,7–1 мм с тонкой рассеянной вкрапленностью сульфидов. Во вмещающих породах широко проявлены мелколинзовидные (глазковые) выделения и метакристаллы пирита разного размера. Арсенопирит в виде тонкоигольчатых выделений известен только на глубоких горизонтах западного фланга месторождения. Рудная зона представлена зо-

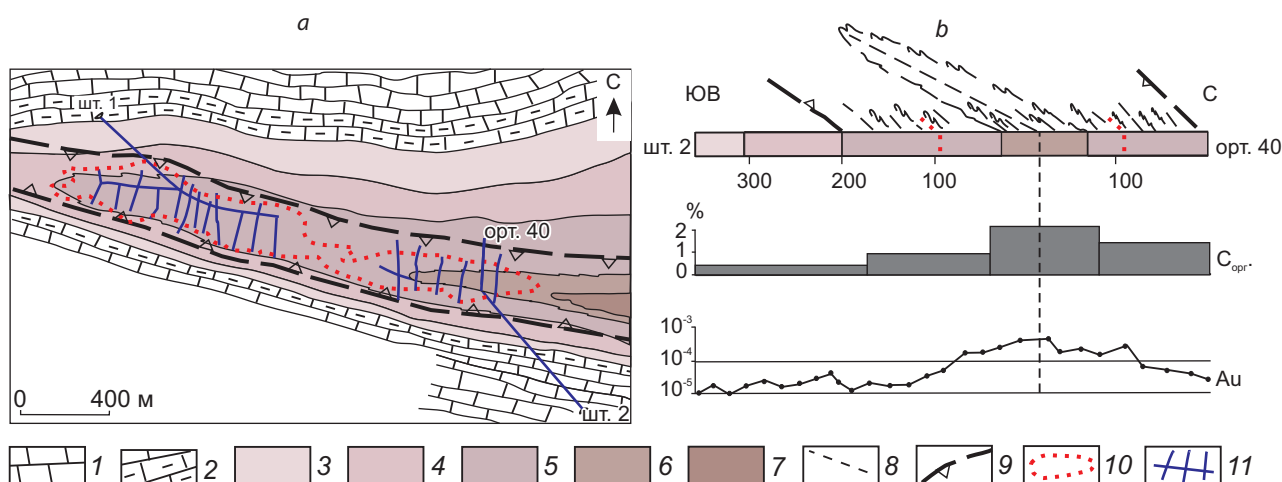


Рис. 9. Геолого-структурный план месторождения Сухой Лог (а), штольневый горизонт, и распределение $C_{орг}$ и Au в филлитовидных сланцах сечения шт. 2 – орт. 40 (b) (составлен по материалам (С. Д. Шер и др., 1977)):

средне-верхнерифейские свиты: имняхская свита: 1 – известняки, 2 – известково-сланцевые сланцы, известковистые песчаники и алевролиты; хомолхинская свита, верхняя подсвита: 3 – пятая пачка (алевритистые и филлитовидные сланцы, прослой мелкозернистых песчаников), 4 – четвертая пачка (тонкое переслаивание филлитов и алевролитов), 5 – третья пачка (алевритистые сланцы, прослой известковистых песчаников и алевролитов), 6 – вторая пачка (филлиты с тонкими прослоями песчаников и алевролитов), 7 – первая пачка (филлиты, известковистые сланцы с прослоями песчаников и алевролитов); 8 – ось антиклинали; 9 – границы рудовмещающей зоны складчато-разрывных деформаций; 10 – контуры рудной залежи; 11 – подземные выработки

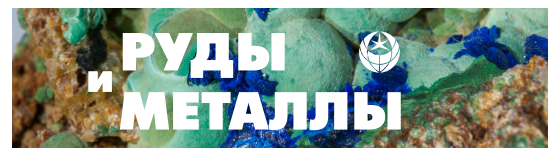
Fig. 9. Geological and structural plan of the Sukhoi Log deposit, adit horizon (a); (b) distribution of C_{org} and Au in phyllitic shales of section Drift 2 – Ort 40 (based on materials from S. D. Sher et al., 1977):

Middle-Upper Riphean formations: Imnyakh Formation: 1 – limestones, 2 – calcareous-micaceous shales, calcareous sandstones and siltstones; Khomolkha Formation, upper subformation: 3 – fifth member (silty and phyllitic shales, interlayers of fine-grained sandstones), 4 – fourth member (thin interbedded phyllites and siltstones), 5 – third member (silty shales, interlayers of calcareous sandstones and siltstones), 6 – second member (phyllites with thin interlayers of sandstones and siltstones), 7 – first member (phyllites, calcareous shales with interlayers of sandstones and siltstones); 8 – axis of the anticline, 9 – boundaries of the ore-hosting zone of fold-fault deformations; 10 – contours of the ore deposit; 11 – underground workings

лотосодержащей кварц-пиритовой и кварц-карбонатно-пиритовой минерализацией разной интенсивности. Основной тип минерализации – линзовидно-прожилковый и прожилково-вкрапленный, обусловленный сочетанием структур разрывной тектоники и пластического течения. Прямой связи между масштабом рудной минерализации и содержанием ОВ в породах не наблюдается.

В групповом составе рассеянного ОВ преобладает нерастворимая фракция, битумоиды составляют незначительную его часть. По содержанию углерода и водорода кероген относится к высшему антраксолиту (шунгит). Это

показывает, что ОВ руд Сухоложского месторождения более метаморфизовано по сравнению с Вернинским месторождением, но менее, чем ОВ регионально метаморфизованных пород [19]. Растворимая составляющая ОВ представлена ХБ и СББ битумоидами в количестве 0,002 % и 0,009 % [15]. Значительную долю в битумоидах составляют фракции смол и асфальтенов. Наиболее высокие концентрации золота связаны с асфальтенами и асфальтеновыми кислотами, которых в битумоидах содержится 2–35 % (табл. 4). Анализ золота в асфальтенах выявил, что часть его химически связана со структурами асфальтенов, а часть



представляет тонкодисперсные частицы размером 1–10 мкм.

Влияние складчатых деформаций на распределение ОБ и золота в породах хомолхинской свиты изучено в разрезе шт. 2 – орт. 40 протяжённостью 570 м (см. рис. 9, б), пересекающим подвёрнутое крыло и центральную часть Сухоложской антиклинали. В этом интервале по северной стенке подземных выработок через 10 м были отобраны пробы на содержание $C_{орг.}$ и золота. Исходными породами этого фрагмента складки являются алевролиты и филлитовидные сланцы хомолхинской свиты, для которых характерны многочисленные порфиробласты магнезиально-железистых карбонатов, кварца и пирита. В пределах изученного разреза отчётливо прослеживаются все стадии перекристаллизации метасоматических образований и синхронного перераспределения ОБ. Установлено увеличение содержания $C_{орг.}$ в направлении от крыльев к оси антиклинали: в филлитовидных сланцах от 0,6 до 1,8 %, в алевролитах – от 0,45 до 1,3 % (см. рис. 9, б). Особенно интенсивное перераспределение ОБ испытало в зоне смятия, которая выделяется широкими вариациями содержаний $C_{орг.}$: от десятых долей до 5,7 %. Как видно на рис. 9, б, повышенная концентрация золота пространственно совпадает с зоной аномального содержания ОБ.

За пределами зоны смятия, в породах подвёрнутого крыла антиклинали (400–420 м от устья штольни) и на контакте с зоной смятия (орт. 40) хорошо сохранились первичные структурно-текстурные особенности рудовмещающих пород: слоистость и сланцеватость, подчёркнутая равномерным распределением ОБ; изометрические и слабовытянутые формы порфиробластов карбоната с равномерным распределением ОБ и обломочного кварца. По мере приближения к рудолокализирующей структуре наблюдается деформация порфиробластов, сопровождавшаяся перераспределением породообразующих минералов. В результате появились линзовидные карбонатные выделения, вытянутые вдоль сланцеватости, с многочисленными точечными скоплениями ОБ. На контакте с зоной смятия карбонаты полностью

Табл. 4. Содержание золота во фракциях хлороформенных (числитель) и спирто-бензольных (знаменатель) битумоидов, г/т

Table 4. Gold content in fractions of chloroform (numerator) and alcohol-benzene (denominator) bitumen, g/t

№ пробы	УВ	БС	СБС	АК	АСФ
1	$\frac{не\ обн.}{0,07}$	$\frac{0,17}{не\ обн.}$	$\frac{0,4}{0,61}$	$\frac{0,16}{1,05}$	$\frac{6,71}{8,99}$
3	$\frac{0,05}{0,02}$	$\frac{0,15}{0,3}$	$\frac{0,08}{0,55}$	$\frac{0,34}{1}$	$\frac{3}{6,78}$
5	$\frac{0,02}{не\ обн.}$	$\frac{0,23}{0,51}$	$\frac{0,6}{0,43}$	$\frac{5,38}{2,15}$	$\frac{4,78}{9,11}$

Примечание. УВ – углеводороды, БС – бензольные смолы, СБС – спирто-бензольные смолы, АК – асфальтеновые кислоты, АСФ – асфальтены.

очищаются от углеродистого вещества и тонкообломочного кварца, которые образуют сегрегации по периферии порфиробластов. Наиболее интенсивно деформированы и перекристаллизованы метасоматические образования в зоне смятия. В отличие от Вернинского месторождения углеродсодержащие сегрегации в пределах Сухоложской зоны смятия имеют более сложный состав. Отмечаются многочисленные сегрегации углеродистого, углеродисто-кварцевого, углеродисто-кварц-карбонатного и углеродисто-мусковит-карбонат-кварцевого состава с реликтами пирита, которые образуют послойные линзовидные и прожилковидно-линзовидные выделения мощностью до 8–10 мм (рис. 10).

Рассмотренные выше месторождения Бодайбинского золоторудного района приурочены к зонам интенсивной складчатости и рассланцевания в пределах мощного коллизионного пояса. Рудная минерализация, отчётливо контролируемая складчато-сдвиговыми деформациями, концентрируется в центральных частях антиклинальных структур. Сочетание деформационных и литологических факторов влияло на направление миграции флюидных потоков, а также на состав, распределение и степень метаморфизма ОБ в осадочных породах. Изотопный состав ОБ в алевропелитах

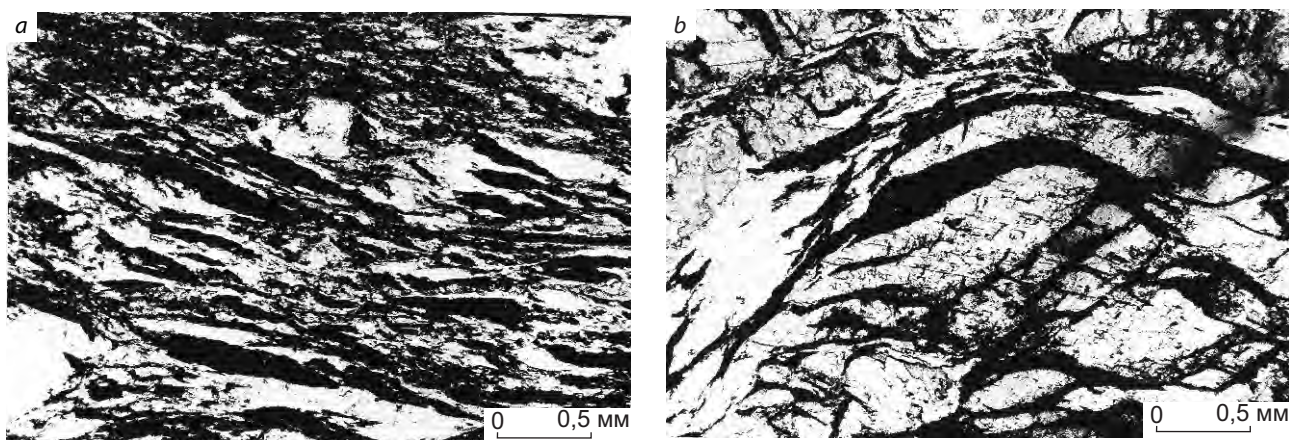


Рис. 10. Линзовидные сегрегации УВ (чёрное) в ассоциации с тонкозернистым кварцем в метаалевролитах (а); чешуйчатые, прожилковидные сегрегации УВ (чёрное), тонкозернистого кварца (белое) в перекристаллизованном карбонате (серое) (b)

Fig. 10. (a) Lenticular segregations of hydrocarbons (black) in association with fine-grained quartz in metasiltstones, (b) scaly vein-like segregations of hydrocarbons (black), fine-grained quartz (white) in recrystallized carbonate (gray)

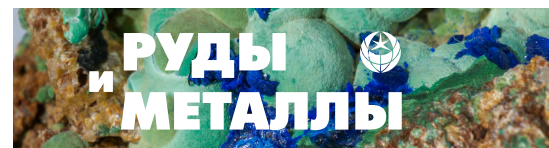
хомолхинской свиты изменяется в узких пределах $\delta^{13}\text{C}$ от $-16,6$ до -18 ‰, среднее $-17,1$ ‰ [19]. Существенно более «лёгкая» органика содержится в породах аунакитской и вачской свит: $\delta^{13}\text{C}$ от $-21,1$ до $-21,7$ ‰.

Обсуждение результатов. Результаты проведённых исследований и анализ опубликованных материалов показывают, что битумоиды, особенно их кислые фракции – асфальтеновые, являются потенциальными концентраторами и транспортёрами металла на всех стадиях преобразования осадка. Наиболее активная миграция золота в составе растворимых углеводородных компонентов сопряжена с процессами складчатости и дислокационно-го метаморфизма углеродистых толщ.

Миграция золота совместно с продуктами деструкции ОВ продемонстрирована на примере золото-битумного проявления, приуроченного к участку пересечения приосевой части Тенькинской антиклинали Дегдеканской зоной складчатых дислокаций. Источником золота в битуминизированных сланцах являются первичные накопления металла в осадочных породах Дегдеканского рудного поля. Установленная генетическая связь золото-битумной минерализации с продуктами соскладчатого динамометаморфизма определила ряд

признаков, отражающих специфические условия её развития. Важнейшим литологическим фактором, влияющим на формирование оруденения, является наличие мощной углеродистой сланцевой толщи с невысокой степенью региональных преобразований осадка, легко поддающейся пластическим деформациям. Только в зонах катагенеза и метагенеза сапропелевое ОВ может продуцировать достаточное количество подвижных битумов, транспортирующих золото к месту разгрузки.

Значительные параметры площадного развития золотоносных битуминизированных сланцев и большая роль углеродсодержащих отложений в разрезах осадочного чехла многих регионов России увеличивает перспективы поисков нетрадиционных месторождений золота в черносланцевых толщах. А выявление в последние годы в некоторых зарубежных странах месторождений с близким минеральным составом руд подтверждает практическую значимость рассмотренного типа оруденения. Так, в Южном Китае в чехле платформы известны пласты битуминизированных углеродистых флишоидов с линзами асфальто-битумов [26]. В последних, попавших в локально инверсионные сжатые складки, отмечается тонкое золото, содержание которого



в рудах составляет от 0,5–0,7 до 5,9 г/т. Установлена положительная связь между содержанием металла и ОВ. В Неваде на месторождении карлинского типа Эль-Родео были описаны жилы пиробитума, содержащие до 100 г/т золота. Эти жилы представляют интерес, поскольку золото распределено однородно, а жилы срослись с нижележащими микропрожилками, что позволяет предположить, что они фиксируют миграцию жидких углеводородов и, в свою очередь, мобилизацию золота [25].

Выделенная золото-битумная минерализация отличается от золото-сульфидных руд Патомского нагорья более высоким содержанием в породе углеводородов, хлороформенных и спиртобензолных битумоидов, а в составе последних – асфальтенов и асфальтеновых кислот. Единственным концентратором золота в ней являются нефтеподобные битумы, образующие в сланцах тончайшую гнездовидную вкрапленность. В рудах Вернинского и Сухоложского месторождений золотосодержащие битумоиды имеют остаточный характер и являются реликтами синскладчатой золото-битумной минерализации. Учитывая высокую золотоносность глобулярного пирита и его деструкцию, синхронную с битуминизацией толщи, роль золото-битумной минерализации в формировании золото-сульфидных месторождений могла быть значительной.

Проведённые в разных регионах России исследования подтверждают полихронный характер концентрирования золота, обусловленный рядом литологических и геодинамических событий. На стадии седиментации значительная часть металла связана с сульфидами и органической частью породы. Погружение осадка на глубину сопровождалось выделением H_2O , дебитуминизацией ОВ и формированием металлоносных водно-углеводородных флюидов, в которых ионы золота образовывали с кислород-, азот- и серосодержащими компонентами ОВ комплексы.

Наиболее активная генерация, миграция и аккумуляция металлоносных битумоидов по времени сопряжена с процессами складчатости и раннего метаморфизма углеродистых отложений. Важным фактором, приводящим

в движение вещество, является термодинамическая анизотропия деформируемых осадочных пород, выраженная в чередовании областей выжимания и нагнетания в складчатых поясах. Эти области отличаются интенсивностью динамометаморфических преобразований. Наиболее благоприятные условия для притоков и разгрузки рудоносных растворов как синскладчатых с образованием золото-битумной минерализации, так и наложенных гидротермальных создаются в замках антиклиналей.

Поведение золота и ОВ в зонах складчатых деформаций рассмотренных регионов согласуется с моделью, которая базируется на принципах общекоровой складчатости земной коры в результате горизонтального сжатия [9]. Согласно этой схеме, в деформируемом слое возникают зоны сжатия и растяжения, разделённые нейтральной зоной и образующие рудогенерирующие и рудолокализирующие области. Например, при отрицательном изгибе коры ниже нейтральной поверхности реализуются условия растяжения, приводящие к разуплотнению пород, падению общего давления и мобилизации рудного вещества. В области растяжения снижается общее давление, увеличивается объём трещинно-порового пространства и накапливаются флюиды, лишённые возможности подниматься вверх. Их разгрузка возможна после снятия тектонических сил, вызванных изгибом коры. В случае положительного изгиба в верхней части слоя возникают условия растяжения, сменяющиеся ниже нейтральной зоны сжатием. Предлагаемая А. Ю. Кисиним модель горизонтального сжатия позволяет объяснить основные геологические процессы, возникающие на коллизиионном этапе формирования складчатых областей, закономерности миграции и отложения рудного вещества.

Выводы. В основе предложенной модели формирования золоторудных месторождений в черносланцевых толщах лежат способность седиментогенного золота растворяться во всех фракциях ОВ и высокая подвижность металлоносных нафтидов в условиях складчатых деформаций. Так как важная роль в мигра-

ции и накоплении золота в осадочных породах принадлежит ОВ, то необходимым условием для образования золото-органических флюидов является невысокая степень преобразования осадочных пород. Приведённый фактический материал показывает тесную связь становления золото-битумного рудопоявления Центральной Колымы с процессом складчатого метаморфизма углеродистых сланцев, что позволяет рассматривать данный объект как продукт дислокационного метаморфизма.

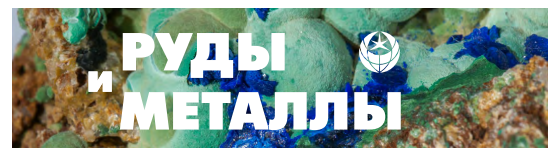
С процессами складчатости и метаморфизма осадочных толщ Бодайбинского бассейна сопряжена активная миграция золота в составе растворимых компонентов ОВ. Главный источник металла для золото-сульфидных месторождений – осадочно-гидротермальный пирит, подвергшийся в зонах пластического выжимания перекристаллизации с образо-

ванием мелколинзовидного пирита, на флангах и за пределами зоны смятия – пирротина. Перекристаллизация сингенетического пирита сопровождалась значительным снижением концентрации золота, серебра, мышьяка и серы. С деструкцией ОВ связано образование водно-углеводородных флюидов, способных экстрагировать золото. Основной особенностью рудообразования золото-сульфидных месторождений является взаимодействие глубинных гидротермальных и метаморфогенных золото-битумных флюидов.

Пространственно-временная сопряжённость процессов сжатия–растяжения углеродистых толщ и миграция золотосодержащих битумоидов позволяют сделать вывод, что черносланцевые комплексы выступают в качестве источника металла для золото-битумных проявлений и дополнительного при формировании золоторудных месторождений.

Список литературы

1. Бортников Н. С., Кабри Л., Викентьев Л. И., Тагиров Б. Р., Мак Мэйхон Г., Богданов Ю. А., Ставрова О. О. Невидимое золото в сульфидных субмаринных колчеданных построек // Геология рудных месторождений. – 2003. – Т. 45, № 3. – С. 228–240.
2. Ведерников И. Л. Распределение органического углерода в золотоносных толщах перми Аян-Юряхского антиклинория // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции, посвящённой памяти академика К. В. Симакова. – Магадан : СВНЦ ДВО РАН, 2009. – С. 42–43.
3. Ганжа Г. Б., Ганжа Л. М. Золото-битумная минерализация в черносланцевой толще, Центральная Колыма // Руды и металлы. – 2004. – № 1. – С. 24–32.
4. Ганжа Г. Б., Развозжаева Э. А. Органическое вещество в осадочных породах Вернинского золоторудного месторождения, Патомское нагорье // Руды и металлы. – 2014. – № 3. – С. 65–73.
5. Горячев Н. А. Геология мезозойских золото-кварцевых жильных поясов Северо-Востока Азии. – Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 1998. – 210 с.
6. Ермолаев Н. П., Созинов Н. А., Котина Р. П., Пашкова Е. А. Механизмы концентрирования благородных металлов в терригенно-углеродистых отложениях. – М. : Научный мир, 1999. – 121 с.
7. Иншин П. В., Абаулина Л. И., Фридман И. Д., Иншина В. М. [и др.]. Изучение углеродистого вещества золоторудных месторождений прожилково-вкрапленного типа с целью совершенствования поисковых критериев. – Тула : ЦНИГРИ ; ОЭИ, 1982. – 173 с.
8. Казакевич Ю. П., Шер С. Д., Жаднова Т. П., Стороженко А. А., Кондратенко А. К., Николаева Л. А., Аминев В. Б. Ленский золотоносный район. Т. 1. Стратиграфия, тектоника, магматизм и проявления коренной золотоносности. – М. : Недра, 1971. – 163 с.
9. Кисин А. Ю., Коротеев В. А. Блоковая складчатость и рудогенез. – Екатеринбург : ИГГ УрО РАН, 2017. – 349 с.
10. Коробицын А. В., Волкодав И. Г., Ивенсен В. Ю. Золото в породах Верхоянского комплекса // Тезисы докладов IV Якутской региональной геологической конференции по золоту «Геология месторождений Якутии. Критерии и методы их поисков и оценки». – Якутск : ЯТГУ, 1979. – С. 89–92.
11. Кубракова И. В., Набиуллина С. Н., Пряжников Д. В., Киселева М. С. Органическое вещество как формирующий и транспортирующий агент в процессах переноса ЭПГ и золота // Геохимия. – 2022. – Т. 67, № 8. – С. 41–49.
12. Кузьмин М. И., Ярмолюк В. В., Спиридонов А. И., Немеров В. К., Иванов А. И., Митрофанов Г. Л.

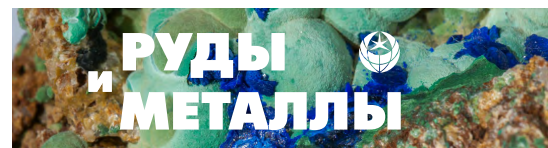


- Геодинамические условия преобразования золоторудных месторождений Бодайбинского неопротерозойского прогиба // Доклады Российской академии наук. – 2006. – Т. 407, № 6. – С. 793–797.
13. Лобанов М. П., Радченко К. М., Чернецкая И. И., Охотников И. А., Номоконова Ю. А., Новикова Э. Ф. Рудоносные углистые пелитоиды линейных зон смятия Патомского нагорья // Геология и геофизика. – 1976. – № 9. – С. 34–44.
 14. Маннафов Н. Г. Металлогеническая карта Охотско-Колымского региона м-ба 1 : 500 000. Объяснительная записка. – Магадан : Магадангеология ГГП, 2000.
 15. Немеров В. К., Спиридонов А. М., Развозжаева Э. А., Матель Н. Л., Будяк А. Е., Станевич А. М. Основные факторы онтогенеза месторождений благородных металлов суходожского типа // Отечественная геология. – 2005. – № 3. – С. 17–24.
 16. Немеров В. К., Станевич А. М., Развозжаева Э. А., Будяк А. Е., Корнилова Т. А. Биогенно-седиментационные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах Байкало-Патомского региона // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51, № 5. – С. 729–747.
 17. Пеньков В. Ф. Генетическая минералогия углеродистых веществ. – М. : Недра, 1996. – 221 с.
 18. Попова М. В., Шаламов И. В. Золото в нефтях и нефтематеринских породах (на примере Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции) // Природные битумы и тяжёлые нефти : материалы Международной научно-практической конференции к столетию со дня рождения В. А. Успенского. – СПб. : Недра, 2006. – С. 458–472.
 19. Русинов В. Л., Русинова О. В., Кряжев С. Г., Щегольков Ю. В., Альшеева Э. И., Борисовский С. Е. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50, № 1. – С. 3–45.
 20. Татаринов А. В., Яловик Л. И. Динамометаморфизм – главный фактор формирования коллизионных месторождений золота // Золоторудные месторождения Востока России: труды III Всероссийского симпозиума «Золото Сибири и Дальнего Востока: геология, геохимия, технология, экономика, экология», Улан-Удэ, 21–25 сентября 2004. – Магадан : БНЦ СО РАН, 2006. – С. 32–49.
 21. Успенский В. А., Неручев С. Г., Радченко О. А. [и др.]. Формирование основных типов ископаемого органического вещества и их эволюция на последовательных стадиях литогенеза // Природа органического вещества современных и ископаемых осадков. – М. : Наука, 1973. – С. 68–78.
 22. Фридовский В. Ю., Соловьев Э. Ю., Полуфунтикова Е. И. Динамика формирования и структуры юго-восточного сектора Адыча-Нерской металлогенической зоны // Отечественная геология. – 2003. – № 3. – С. 16–21.
 23. Шашорин Б. Н., Толкачев А. Е., Афанасьева Р. Н. Покровно-складчатые деформации и золотоносность Ходоканского рудного поля // Отечественная геология. – 2004. – № 6. – С. 17–22.
 24. Beuge P., Rosler H. J. u. a. Untersuchungen zur Geohemie der Metamorphose mit Hilfe der zerstörungsreien Neutronenaktivierungsanalyse // Zeitschrift für angewandte Geologie. Bd. 24. – 1978. – Heft 7/8. – P. 334–339.
 25. Emsbo P., Koenig A. E. Transport of Au in petroleum: evidence from the northern Carlin trend, Nevada // Proceedings of the 9th Biennial SGA Meeting / eds. Andrew C. J. [et. al.]. – Dublin : Millpress, 2007. – P. 695–698.
 26. Li Jianming, Ying Hanlong, Ye Jie Chen Xurui. Sediment-hosted micro-disseminated gold deposits in China // The 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, August 6–17, 2000. Congress Program. – Rio de Janeiro : Geological Survey of Brazil.

References

1. Bortnikov N. S., Kabri L., Vikent'ev L. I., Tagirov B. R., Mak Meikhon G., Bogdanov Yu. A., Stavrova O. O. Nevidimoe zoloto v sul'fidakh submarinnykh kolchedannykh postroek [Invisible gold in sulfides from seafloor massive sulfide edifices], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits], 2003, V. 45, No 3, pp. 228–240. (In Russ.).
2. Vedernikov I. L. Raspredelenie organicheskogo ugleroda v zolotonosnykh tolshchakh permi Ayan-Yuryakhsogo antiklinoriya [Distribution of organic carbon in the Permian gold-bearing strata of the Ayan-Yuryakh anticlinorium], *Tezisy dokladov Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi pamyati akademika K. V. Simakova* [Abstracts of the All-Russian scientific conference dedicated to the memory of Academician K. V. Simakov], Magadan, SVNTs DVO RAN Publ., 2009, pp. 42–43.
3. Ganzha G. B., Ganzha L. M. Zoloto-bitumnaya mineralizatsiya v chernoslantsevoi tolshche, Tsentral'naya Kolyma [Gold-bitumen mineralization in the black shale strata, Central Kolyma], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2004, No 1, pp. 24–32. (In Russ.).

4. Ganzha G. B., Razvozzhaeva E. A. Organicheskoe veshchestvo v osadochnykh porodakh Verninskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya, Patomskoe nagor'e [Organic substance in sedimentary rocks of Verninskoye gold deposit, Patom uplands], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2014, No 3, pp. 65–73. (In Russ.).
5. Goryachev N. A. Geologiya mezozoiskikh zolotokvartsevykh zhil'nykh poyasov Severo-Vostoka Azii [Geology of the Mesozoic gold-quartz vein belts of Northeast Asia], Magadan, SVKNII DVO RAN Publ., 1998, 210 p.
6. Ermolaev N. P., Sozinov N. A., Kotina R. P., Pashkova E. A. Mekhanizmy kontsentrirvaniya blagorodnykh metallov v terrigenno-uglerodistykh otlozheniyakh [Mechanisms of concentration of precious metals in terrigenous-carbonaceous deposits], Moscow, Nauchnyi mir Publ., 1999, 121 p.
7. Inshin P. V., Abaulina L. I., Fridman I. D., Inshina V. M. [et al.]. Izuchenie uglerodistogo veshchestva zolotorudnykh mestorozhdenii prozhilkovokraplennogo tipa s tsel'yu sovershenstvovaniya poiskovykh kriteriev [Study of carbonaceous matter of streaked-interspersed gold deposits in order to improve search criteria], Tula, TsNIGRI and OEI Publ., 1982, 173 p.
8. Kazakevich Yu. P., Sher S. D., Zhadnova T. P., Storozhenko A. A., Kondratenko A. K., Nikolaeva L. A., Aminev V. B. Lenskii zolotonosnyi raion. T. 1. Stratigrafiya, tektonika, magmatizm i proyavleniya korennoi zolotonosnosti [Lensky gold-bearing area. Vol. 1. Stratigraphy, tectonics, magmatism and manifestations of indigenous gold content], Moscow, Nedra Publ., 1971, 163 p.
9. Kisin A. Yu., Koroteev V. A. Blokovaya skladchatost' i rudogenez [Block folding and oreogenesis], Ekaterinburg, IGG UrO RAN Publ., 2017, 349 p.
10. Korobitsyn A. V., Volkodav I. G., Ivensen V. Yu. Zoloto v porodakh Verkhoyanskogo kompleksa [Gold in rocks of the Verkhoyansk complex], Tezisy dokladov IV Yakutskoi regional'noi geologicheskoi konferentsii po zolotu "Geologiya mestorozhdenii Yakutii. Kriterii i metody ikh poiskov i otsenki" [Abstracts of the IV Yakut regional geological conference on gold "Geology of deposits of Yakutia. Criteria and methods of their search and evaluation"], Yakutsk, YaTGU Publ., 1979, pp. 89–92.
11. Kubrakova I. V., Nabiullina S. N., Pryazhnikov D. V., Kiseleva M. S. Organicheskoe veshchestvo kak formiruyushchii i transportiruyushchii agent v protsessakh perenosa EPG i zolota [Organic matter as a forming and transporting agent in transfer processes PGE and gold], *Geokhimiya* [Geochemistry International], 2022, V. 67, No 8, pp. 41–49. (In Russ.).
12. Kuz'min M. I., Yarmolyuk V. V., Spiridonov A. I., Nemerov V. K., Ivanov A. I., Mitrofanov G. L. Geodinamicheskie usloviya preobrazovaniya zolotorudnykh mestorozhdenii Bodaibinskogo neoproterozoiskogo progiba [Geodynamic conditions for the transformation of gold deposits of the Bodaibinsky Neoproterozoic trough], *Doklady Rossiiskoi akademii nauk* [Reports of the Russian Academy of Sciences], 2006, V. 407, No 6, pp. 793–797. (In Russ.).
13. Lobanov M. P., Radchenko K. M., Chernetskaya I. I., Okhotnikov I. A., Nomokonova Yu. A., Novikova E. F. Rudonosnye uglitnye pelitoidy lineinykh zon smyatiya Patomskogo nagor'ya [Ore-bearing carbonaceous pelitoids of linear crushing zones of the Patom upland], *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 1976, No 9, pp. 34–44. (In Russ.).
14. Mannafov N. G. Metallogenicheskaya karta Okhotsko-Kolym'skogo regiona m-ba 1 : 500 000. Ob'yasnitel'naya zapiska [Metallogenic map of the Okhotsk-Kolyma region m-ba 1:500,000. An explanatory note], Magadan, Magadangeologiya GGP Publ., 2000.
15. Nemerov V. K., Spiridonov A. M., Razvozzhaeva E. A., Matel' N. L., Budyak A. E., Stanevich A. M. Osnovnye faktory ontogeneza mestorozhdenii blagorodnykh metallov sukholozhskogo tipa [The main factors of ontogenesis of deposits of precious metals of the Sukholozhsky type], *Otechestvennaya geologiya* [National Geology], 2005, No 3, pp. 17–24. (In Russ.).
16. Nemerov V. K., Stanevich A. M., Razvozzhaeva E. A., Budyak A. E., Kornilova T. A. Biogenno-sedimentatsionnye faktory rudoobrazovaniya v neoproterozoiskikh tolshchakh Baikalo-Patomskogo regiona [Biogenic sedimentation factors of mineralization in the Neoproterozoic strata of the Baikal-Patom region], *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2010, V. 51, No 5, pp. 729–747. (In Russ.).
17. Pen'kov V. F. Geneticheskaya mineralogiya uglerodistykh veshchestv [Genetic mineralogy of carbonaceous substances], Moscow, Nedra Publ., 1996, 221 p.
18. Popova M. V., Shalamov I. V. Zoloto v neftnykh i neftematerinskikh porodakh (na primere Lenotungusskoi neftegazonosnoi provintsii) [Gold in oils and oil-bearing rocks (on the example of the Lena-Tunguska oil and gas province)], *Prirodnye bitумы i tyazhelye nefi: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii k stoletiyu so dnya rozhdeniya V. A. Uspenskogo* [Natural bitumen and heavy oils: materials of the International scientific and practical Conference on the centenary of the birth of V. A. Uspensky], St. Petersburg, Nedra Publ., 2006, pp. 458–472.



19. Rusinov V. L., Rusinova O. V., Kryazhev S. G., Shchegol'kov Yu. V., Alysheva E. I., Borisovskii S. E. Okolorudnyi metasomatizm terrigennykh uglevodnykh porod v Lenskom zolotorudnom raione [Near-ore metasomatism of terrigenous carbonaceous rocks in the Lena gold ore region], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits], 2008, V. 50, No 1, pp. 3–45. (In Russ.).
20. Tatarinov A. V., Yalovik L. I. Dinamometamorfizm – glavnyi faktor formirovaniya kollizionnykh mestorozhdenii zolota [Dynamometamorphism – the main factor in the formation of collisional gold deposits], *Zolotorudnye mestorozhdeniya Vostoka Rossii: trudy III Vserossiiskogo simpoziuma “Zoloto Sibiri i Dal'nego Vostoka: geologiya, geokhimiya, tekhnologiya, ekonomika, ekologiya”*, Ulan-Ude, 21–25 sentyabrya 2004 [Gold ore deposits of the East of Russia: proceedings of the III All-Russian Symposium “Gold of Siberia and the Far East: geology, geochemistry, technology, economics, ecology”, Ulan-Ude, September 21–25, 2004], Magadan, BNTs SO RAN Publ., 2006, pp. 32–49.
21. Uspenskii V. A., Neruchev S. G., Radchenko O. A. [et al.]. Formirovanie osnovnykh tipov iskopaemogo organicheskogo veshchestva i ikh evolyutsiya na posledovatel'nykh stadiyakh litogeneza [Formation of the main types of fossil organic matter and their evolution at successive stages of lithogenesis], *Priroda organicheskogo veshchestva sovremennykh i iskopaemykh osadkov* [Nature of organic matter of modern and fossil sediments], Moscow, Nauka Publ., 1973, pp. 68–78. (In Russ.).
22. Fridovskii V. Yu., Solov'ev E. Yu., Polufuntikova E. I. Dinamika formirovaniya i struktury yugovostochnogo sektora Adycha-Nerskoj metallogenicheskoi zony [Dynamics of formation and structures of the southeast quadrant of the Adycha-Nersky metallogenic zone], *Otechestvennaya geologiya* [National Geology], 2003, No 3, pp. 16–21. (In Russ.).
23. Shashorin B. N., Tolkachev A. E., Afanas'eva R. N. Pokrovno-skladchatye deformatsii i zolotonosnost' Khodokanskogo rudnogo polya [Cover fold deformations and gold potential of Khodokan ore field], *Otechestvennaya geologiya* [National Geology], 2004, No 6, pp. 17–22. (In Russ.).
24. Beuge P., Rosler H. J. u. a. Untersuchungen zur Geohemie der Metamorphose mit Hilfe der zerstörungsreien Neutronenaktivierungsanalyse, *Zeitschrift für angewandte Geologie*, Bd. 24, 1978, Heft 7/8, pp. 334–339.
25. Emsbo P., Koenig A. E. Transport of Au in petroleum: evidence from the northern Carlin trend, Nevada, *Proceedings of the 9th Biennial SGA Meeting*, eds. Andrew C. J. [et. al.], Dublin, Millpress, 2007, pp. 695–698.
26. Li Jianming, Ying Hanlong, Ye Jie Chen Xurui. Sediment-hosted micro-disseminated gold deposits in China, *The 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, August 6–17, 2000. Congress Program*, Rio de Janeiro, Geological Survey of Brazil, 2000, pp. 36–37.

Ганжа Галина Борисовна

ветеран ЦНИГРИ

Арсентьева Ирина Викторовна (arsenteva@tsnigri.ru)

кандидат геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник

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



СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.41 : 553.07 : 550.93 (571.61/.62)

Геологические и изотопные реперы возраста месторождений Соловьёвского золоторудного центра Приамурской провинции

Степанов В. А.¹, Мельников А. В.²

¹ Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

² Институт геологии и природопользования ДВО РАН, г. Благовещенск, Россия

Аннотация. Приведены сведения о геологическом и изотопном возрасте золоторудных месторождений Соловьёвского центра Приамурской провинции, отнесённых к золотополиметаллической, золото-сульфидно-кварцевой и золото-кварцевой формациям. Показано, что возраст наиболее продуктивных месторождений золотополиметаллической (Березитовое) и золото-сульфидно-кварцевой (Кировское) формаций по геологическим данным является раннемеловым, а по изотопным определениям – барремским в интервале 131–125 млн лет. Геологический возраст малопродуктивных месторождений золото-кварцевой формации трудно определить ввиду того, что вмещающие породы чаще всего представлены гнейсами и кристаллосланцами докембрийского возраста. Изотопный возраст формирования золото-кварцевых месторождений Снежинка и Золотая Гора колеблется, соответственно, в пределах от поздне триасового (212 млн лет) до позднеюрского (155 млн лет).

Ключевые слова: золоторудный центр, месторождение, изотопный возраст.

Для цитирования: Степанов В. А., Мельников А. В. Геологические и изотопные реперы возраста месторождений Соловьёвского золоторудного центра Приамурской провинции. Руды и металлы. 2024. № 1. С. 62–77. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10004.

Geological and isotopic reference points of the age of gold deposits of the Solovyovsky gold ore center in the Amur province

Stepanov V. A.¹, Melnikov A. V.²

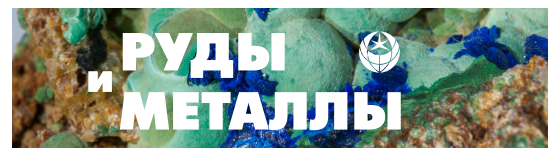
¹ Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

² Institute of Geology and Nature Management, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Blagoveshchensk, Russia

Annotation. The data are presented on the geological and isotopic age of gold deposits of the Solovyovsky gold ore center in the Amur province, assigned to the gold-polymetallic, gold-sulfide-quartz, and gold-quartz formation types. It is demonstrated that the geological and isotopic age of the most productive ore deposits of the gold-polymetallic (Berezitovoe) and gold-sulfide-quartz (Kirovskoe) types is Early Cretaceous according to geological data and Barremian (in the range of 131–125 million years) according to isotopic determinations. The geological age of poorly productive ore deposits of the gold-quartz type is difficult to determine due to the fact that the host rocks are most often represented by gneisses and crystal shales of Precambrian age. The isotopic age of formation of the Snezhninka and Zolotaya gora gold-quartz deposits is, respectively, Late Triassic (212 million years) and Late Jurassic (155 million years).

Keywords: gold ore center; ore deposit; isotopic age; gold-polymetallic, gold-sulfide-quartz, and gold-quartz formation types.

For citation: Stepanov V. A., Melnikov A. V. Geological and isotopic reference points of the age of gold deposits of the Solovyovsky gold ore center in the Amur province. Ores and metals. 2024. № 1. С. 62–77. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10004.



Введение. На территории Дальнего Востока известны золоторудные провинции палеозойского (Омолонская), мезозойского и кайнозойского (Восточно-Забайкальская, Верхоянская, Колымо-Чукотская, Охотско-Чукотская, Приамурская и Камчатская) возраста [7]. Здесь наиболее древним является месторождение Кубака, изотопный возраст которого 335–330 млн лет [18], а у наиболее молодых месторождений, расположенных в Камчатской провинции, изотопный возраст от 41,4 до 0,7 млн лет [13]. Для Приамурской провинции характерны позднемезозойский возраст формирования золотого оруденения и тенденция его омоложения с запада на восток [17]. В этом же направлении в провинции протягивается цепочка из трёх исторически сложившихся золоторудных центров, из месторождений которых добыты наибольшие объёмы золота, – Соловьёвского, Гонжинского и Токурского [19]. Эти центры соответствуют определению для минерально-сырьевых или промышленно-сырьевых узлов [1]. В статье подробно рассмотрены основные геологические и изотопные реперы возраста формирования золотого оруденения Соловьёвского центра, в котором в конце XIX века впервые началась добыча рудного золота Приамурья.

Геологическое строение. Соловьёвский золоторудный центр располагается на западном фланге Приамурской провинции на сочленении Алдано-Станового, Монголо-Охотского и Амурского геоблоков, разделённых Северо-Тукурингским и Южно-Тукурингским региональными разломами. В ансамбль разрывных нарушений входит также Желтулакский внутриблоковый разлом, оперяющий Северо-Тукурингский. Он делит Алдано-Становую блок на две части – западную Селенгино-Становую и восточную Джугджуро-Становую (рис. 1).

Северо-Тукурингский разлом разделяет Алдано-Становую и Монголо-Охотский геоблоки и представляет собой пологий надвиг или сбросо-надвиг, наклонённый к северу. Он относится к «надмантийным» разломам, проявляющимся смещениями на границе Мохоровичича. Вертикальные амплитуды смещения поверхности Мохоровичича, которая зале-

гает на глубине 38–42 км, составляют 1–6 км. В отличие от него Южно-Тукурингский разлом является «надбазитовым», проявляющимся смещениями по поверхности протобазальтового слоя [14]. Желтулакский разлом сдвигового, сбросо-сдвигового и надвигового типов – коровый, но имел связь с мантией на разных этапах своего развития [5]. Эти три разлома, по-видимому, играли роль рудоподводящих и рудоконтролирующих структур.

Алдано-Становый геоблок занимает северную, основную, часть центра. Он развивался по кратонному типу и представляет собой фрагмент фундамента Сибирской платформы. Южная часть геоблока в рифее–раннем палеозое испытала регенерацию. В позднем палеозое и мезозое в его пределах проявилась многократная активизация. Переработка в позднеархейское и раннепротерозойское время складчато-инъективных структур раннего архея обусловила плутоно-метаморфическую, складчатоблоковую природу его внутренней структуры [14].

Селенгино-Становая и Джугджуро-Становая части Алдано-Станового геоблока сложены гнейсами и кристаллосланцами преимущественно архейского возраста, прорванными гранитоидными интрузиями широкого возрастного диапазона – от архея и протерозоя до мезозоя. Они разделены Желтулакским разломом, который имеет древнее, раннедокембрийское заложение. В конце раннего протерозоя вдоль него в условиях растяжения образовались рифтогенные прогибы, выполненные осадочными и вулканогенно-осадочными породами желтулакской и удоканской серий.

Монголо-Охотский складчато-надвиговой геоблок протягивается узкой полосой субширотного простирания в южной части центра. Он сложен мощными комплексами кремнисто-вулканогенно-осадочных и терригенных образований, метаморфизованных в фации глаукофановых и зелёных сланцев. Возраст их трактуется от рифея до раннего палеозоя. Интрузивные образования представлены раннепермскими магматитами пиканского комплекса габбро-плагиогранитовой формации.

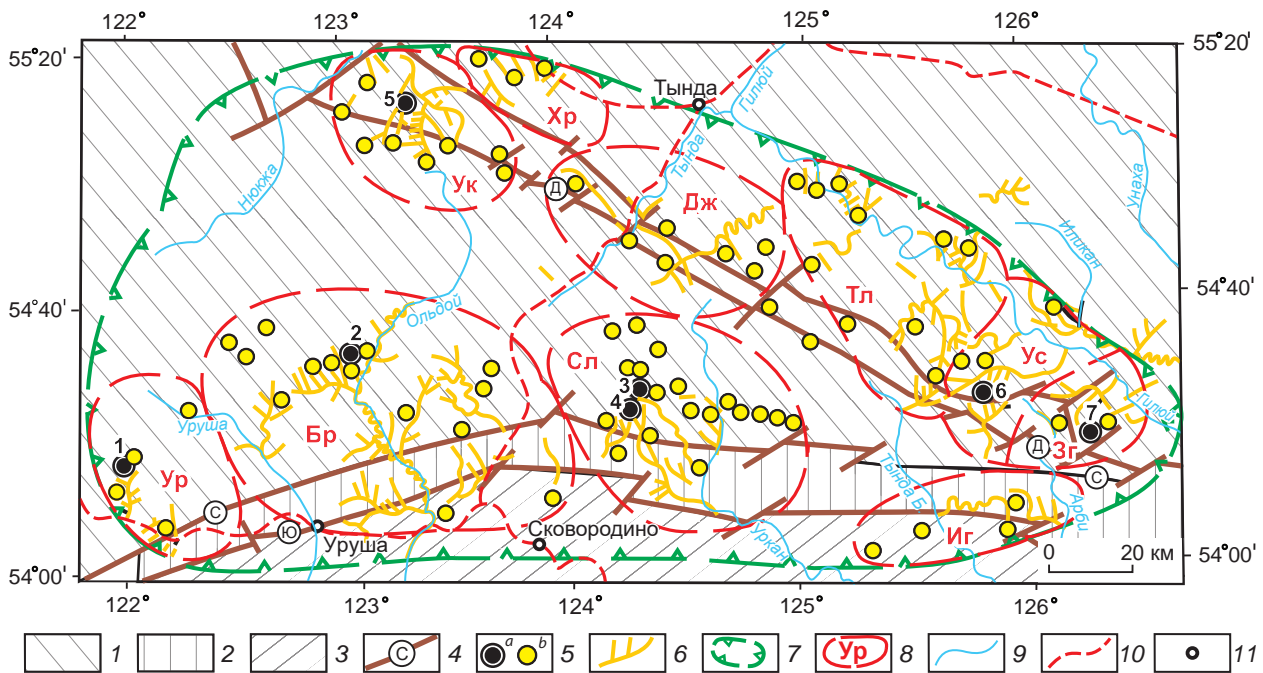


Рис. 1. Геологическая схема Соловьёвского золоторудного центра:

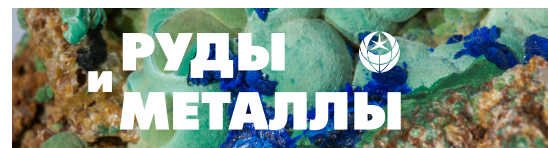
геоблоки: 1 – Алдано-Становой, 2 – Монголо-Охотский, 3 – Амурский; 4 – региональные разломы (Д – Джелтулакский, С – Северо-Тукурингрский, Ю – Южно-Тукурингрский); 5 – золоторудные месторождения (а) (1 – Снежинка, 2 – Березитовое, 3 – Кировское, 4 – Соловьёвское, 5 – Одолго, 6 – Успенское, 7 – Золотая Гора), проявления (б); 6 – россыпи золота; 7 – контур Соловьёвского золоторудного центра; 8 – границы рудно-россыпных узлов (Ур – Уркинский, Бр – Березитовый, Сл – Соловьёвский, Ук – Уркиминский, Хр – Хорогочинский, Дж – Джелтулакский, Тл – Талгинский, Ус – Успеновский, Зл – Золотогорский, Иг – Игакский); 9 – водотоки; 10 – железные дороги; 11 – населённые пункты

Fig. 1. Schematic geological map of the Solovyovskiy gold ore center:

geoblocks: 1 – Aldan-Stanovoi, 2 – Mongol-Okhotsk, 3 – Amur; 4 – regional faults (Д – Dzheltulak, С – Northern Tukuringra, Ю – Southern Tukuringra); 5 – gold objects: (а) ore deposits (1 – Snezhinka, 2 – Berezitovoe, 3 – Kirovskoe, 4 – Solovyovskiy, 5 – Odolgo, 6 – Uspenovskoe, 7 – Zolotaya Gora) and (b) ore occurrences; 6 – gold placers; 7 – outlines of the Solovyevskiy gold ore center; 8 – boundaries of lode-placer gold clusters (Ур – Urkinsky, Бр – Berezitovy, Сл – Solovyevskiy, Ук – Urkiminsky, Хр – Khorogochinsky, Дж – Jeltulaksky, Тл – Talginsky, Ус – Uspenovskiy, Зл – Zolotogorsky, Иг – Igaksky); 9 – watercourses; 10 – railways; 11 – settlements

Южный край Соловьёвского центра сложен породами Амурского геоблока. Амурский геоблок сформировался на некрайонизированной подвижной коре. Он обладает мозаично-складчато-блоковым строением с контрастно высокоамплитудными движениями составляющих его блоков и накоплением осадочных формаций значительной мощности. Фрагменты докембрийского кристаллического фундамента геоблока представлены позднеархейскими и раннепротерозойскими стратифици-

руемыми и интрузивными образованиями. К структурам деформированного чехла относятся рифейско-вендско-нижнекембрийские структурно-вещественные комплексы и палеозойские осадочные отложения. Окончательная консолидация геоблока наступила после интенсивной позднепалеозойской магматической активности, с которой связано становление гранитоидных плутонов [14]. Преобладают в пределах геоблока терригенно-карбонатные осадки раннего и среднего палеозоя, прорван-



ные интрузиями и дайками раннего мела. Вдоль Южно-Тукурингского разлома располагаются впадины с терригенными осадками юрского возраста.

Золотоносность. В пределах центра находятся рудно-россыпные узлы (РРУ) Янканской (Уркинский, Березитовый, Соловьёвский, Игакский) и большей части Джелтулакской (Уркиминский, Хорогочинский, Джелтулакский, Талгинский, Успеновский и Золотогорский) металлогенических зон Приамурской золотоносной провинции. В них известны семь золоторудных месторождений, десятки проявлений и сотни россыпей золота. Добыча рудного золота началась в 1890 г. на месторождении Джалинда (ныне Кировское) и продолжается в настоящее время на Березитовом и Соловьёвском месторождениях. Всего из золоторудных месторождений добыто около 53 т золота. Гораздо больше извлечено золота из россыпей, соотношение добычи россыпного золота к рудному равно 6 : 1, что свидетельствует о значительных перспективах центра на выявление новых золоторудных месторождений [21].

Шесть из семи золоторудных месторождений Соловьёвского центра эксплуатировались на золото. Одно из них отнесено к золото-полиметаллической (месторождение Березитовое), два к золото-сульфидно-кварцевой (Кировское и Соловьёвское) и четыре (Золотая Гора, Успеновское, Одолго и Снежинка) к золото-кварцевой формациям.

Геологический и изотопный возраст золоторудных месторождений. Имеющиеся сведения об изотопном возрасте месторождений отдельных формаций отражены в таблице.

Золотополиметаллическая формация. Наиболее значительная часть рудного золота Соловьёвского центра извлечена из *месторождения Березитовое* золотополиметаллической формации. Оно расположено в северной части Березитового РРУ, на левом борту низовьев р. Хайкта. Вмещающими породами служат порфиридные граниты и гнейсовидные гранодиориты Хайктинско-Орогжанского массива позднего палеозоя. Отмечаются внутрирудные дайки метапорфиритов и пострудные –

диоритовых порфиритов и спессартитов раннемелового возраста.

Рудное тело представляет собой крупную зону рудоносных метасоматически изменённых пород. Она объединяет два крутонаклонных воронкообразных тела – Центральное и Северное, сопряжённых вблизи поверхности, но выклинивающихся на глубине. Метасоматиты сложены агрегатом турмалин-гранат-ортоклаз-мусковит-кварцевого состава. Метасоматические породы брекчированы и сцементированы сульфидными минералами, среди которых преобладают галенит, сфалерит, пирит и пирротин. Среди второстепенных и редких минералов отмечаются халькопирит, арсенипирит, самородные золото и висмут, блёлые руды, теллуриды Au и Ag и др. Основными полезными компонентами руд являются золото, серебро, свинец и цинк [2]. Выявлены золотополиметаллический и золоторудный минеральные комплексы. К первому отнесена основная масса золотосодержащих полиметаллических руд с низким содержанием золота. Ко второму – спорадически развитые в полиметаллических рудах, во вмещающих гранодиоритах и дайках метапорфиритов тонкие жилы и прожилки сульфидного, турмалинового, турмалин-кварцевого, кварц-сульфидного, кварц-гранатового и кварц-гранат-сульфидного состава с высоким содержанием золота. Золото свободное, от мелкого до крупного, проба его колеблется в широких пределах (666–999 ‰, средняя – 861 ‰).

Выделены два этапа рудообразования: ранний золотополиметаллический и поздний – золотой. Геологическим репером, разделяющим эти этапы, являются внутрирудные дайки метапорфиритов. Они не содержат золотополиметаллическую минерализацию, но пересекаются золотоносными прожилками сульфидного и кварц-сульфидного состава. Завершают рудный процесс дайки диоритовых порфиритов и спессартитов, которые пересекают минеральные образования обоих золотоносных комплексов и являются пострудными (рис. 2).

Нижней возрастной границей Березитового месторождения служит возраст вмещающих золотое оруденение гранитоидов Хайк-

Геологический и изотопный возраст месторождений, вмещающих пород и пострудных даек Соловьёвского золоторудного центра

Geological and isotopic age of the ore deposits, host rocks, and post-ore dikes of the Solovyovsky gold ore center

Место-рождение	Добыча золота, т	Вмещающие породы	Пострудные дайки	Изотопный возраст золотого оруденения		Источ-ник
				метод	млн лет	
<i>Золотополиметаллическая формация</i>						
Березитовое	34,3	Верхнепалеозойские гранодиориты и граниты	Нижнемеловые дайки диоритовых порфириров и спессартитов	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$132 \pm 2,9 \div 127,3 \pm 4,4$	[9]
<i>Золото-сульфидно-кварцевая формация</i>						
Кировское	9,7	Нижнемеловые граниты и гранодиориты	Нижнемеловые дайки диоритовых порфириров	Rb/Sr	131–126	[11]
Соловьёвское	5,2	Терригенные породы долохитской толщи средней юры	Нижнемеловые дайки диоритовых порфириров	-	-	[10]
<i>Золото-кварцевая формация</i>						
Золотая Гора	2,0	Нижнеархейские гнейсы и амфиболиты	Мезозойские дайки микродиоритов, фельзит-порфириров и сиенит-порфириров	Rb/Sr	155 ± 7	[16]
Успенское	1,0	Нижнеархейские гнейсы, кристаллические сланцы и амфиболиты	Пострудные дайки не отмечаются	-	-	[10]
Одолго	0,5	Нижнепротерозойские метапесчаники, слюдястые сланцы и биотитовые гнейсы	Дайки гранит-порфириров олёкмо-станового комплекса нижнего мела	-	-	[10]
Снежинка	-	Граниты и граносиениты верхнего триаса	Дайки гранит-порфириров, граносиенит-порфириров, диоритовых порфириров и спессартитов верхнего триаса	Rb/Sr	212 ± 5	[20]

тинско-Орогжанского массива. Изотопный возраст их надёжно определен U-Pb методом по цирконам на приборах SHRIMP-II и LA-ICP-MS. Для порфировидных гранитов он составляет 344–355 млн лет, для гнейсовидных гранодиоритов – $379,0 \pm 1,1$ млн лет, что отвечает границе позднего девона и раннего карбона [3].

Изотопный возраст первого, золотополиметаллического, этапа рудообразования, определен $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом в Институте геологии и минералогии СО РАН. Он составляет для гранат-кварц-мусковит-калишпатовых ме-

тасоматитов $129,7 \pm 3,2 \div 127,3 \pm 4,4$ млн лет, а для мусковит-кварцевых метасоматитов – $132 \pm 2,9 \div 131,3 \pm 2,3$ млн лет [9]. Приведённые определения близки по возрасту и соответствуют поздней части готеривского и ранней половине барремского ярусов раннемеловой эпохи. Внутрирудный этап внедрения даек метапорфириров оценён по результатам $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ изотопно-геохронологических исследований, проведённых в Институте геологии и минералогии СО РАН, в $125,2 \pm 2,4$ и $125,2 \pm 3,4$ млн лет [15]. Этот возраст отвечает границе баррем-

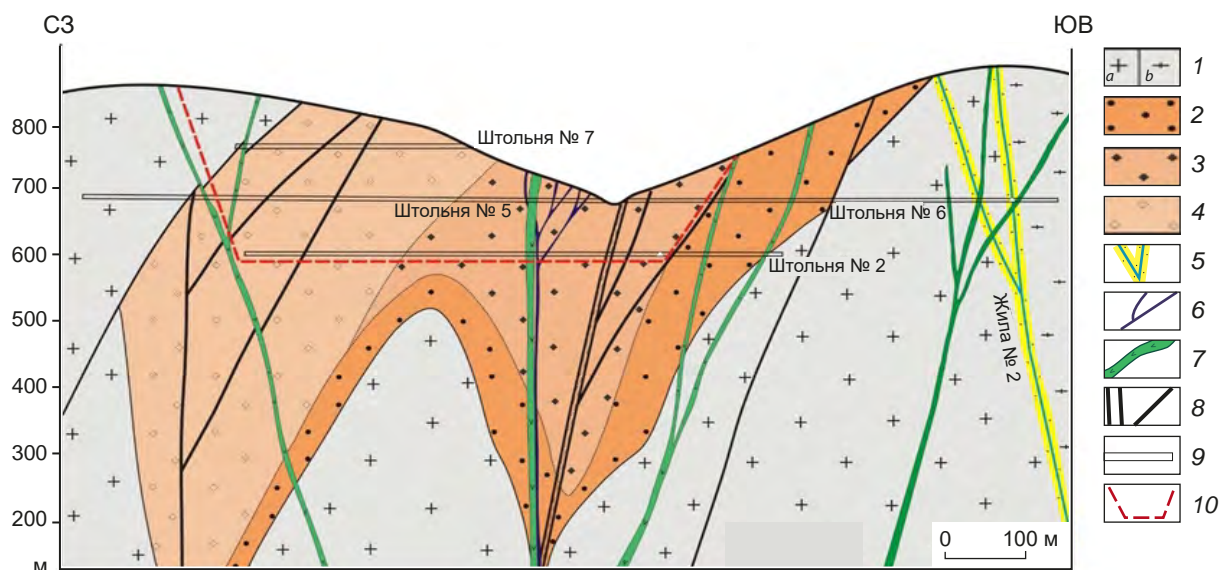
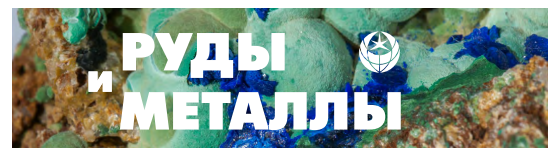


Рис. 2. Вертикальная проекция Березитового месторождения. Составлена по материалам ПГО «Дальгеология»:
 1 – позднепалеозойские порфировидные гранодиориты и граниты (а), гнейсовидные гранодиориты (b); метасоматиты: 2 – турмалин-гранат-ортоклаз-мусковит-кварцевые, 3 – турмалин-гранат-мусковит-кварцевые, 4 – турмалин-гранат-кварц-мусковитовые; 5 – кварцевые жилы; дайки: 6 – метапорфиритов, 7 – диоритовых порфиритов и спессартитов; 8 – разломы; 9 – разведочные горные выработки; 10 – контур эксплуатационного карьера

Fig. 2. Vertical projection of the Berezitovoe deposit. Compiled based on materials of PGO “Dalgeologia”:

1 – Late Paleozoic porphyritic granodiorites and granites (a), gneissic granodiorites (b); metasomatites: 2 – tourmaline-garnet-orthoclase-muscovite-quartz, 3 – tourmaline-garnet-muscovite-quartz, 4 – tourmaline-garnet-quartz-muscovite; 5 – quartz veins; dikes: 6 – metaporphyrites, 7 – diorite porphyrites and spessartites; 8 – faults; 9 – exploration workings; 10 – open pit mine outlines

ского и аптского ярусов раннего мела. Вероятно, изотопный возраст собственно золотого этапа формирования Березитового месторождения близок к 125 млн лет. Следовательно, изотопный возраст Березитового золотополиметаллического месторождения растянут во времени от 132 до, по крайней мере, 125 млн лет.

Изотопный возраст пострудных даек гранит-порфиров, гранодиорит-порфиров и порфиритов изучен менее точным К-Ar методом и составляет 105–100 млн лет (альбский ярус раннего мела) [8].

Изотопный возраст формирования золотополиметаллического и внутрирудного этапов Березитового месторождения оценивается Ar-Ar методом в пределах готеривского (его поздней части) и барремского ярусов раннемеловой эпохи. Изотопный возраст золоторудного этапа вряд ли будет установлен в связи с

тем, что месторождение в значительной мере отработано. Возраст его ограничен баррем-аптским возрастом внутрирудных даек и альбским пострудных. В целом раннемеловой возраст Березитового золоторудного месторождения в пределах готерив-аптского ярусов не вызывает сомнения.

Золото-сульфидно-кварцевая формация. Следующими по уровню добычи рудного золота являются месторождения золото-сульфидно-кварцевой формации – Кировское (Джалиндинское) и Соловьёвское.

Кировское месторождение располагается в северо-западной части Соловьёвского РРУ, в верховьях р. Джалинда. Вмещающими породами служат граниты и гранодиориты юго-западной окраины Джалиндинской интрузии верхнеамурского раннемелового комплекса, а также гнейсы и кристаллосланцы архея в

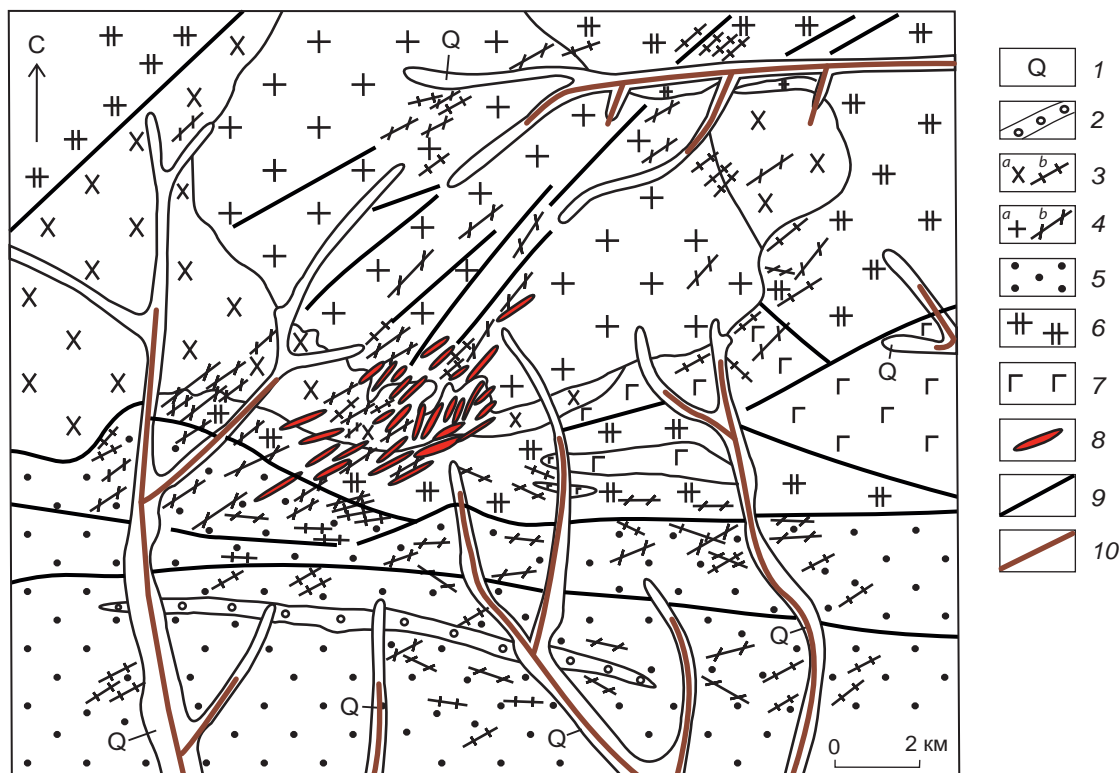


Рис. 3. Схематическая геологическая карта района Кировского месторождения по [4]:

1 – четвертичные отложения; 2 – меловые отложения стрелкинской свиты: песчаники, алевролиты, конгломераты, гравелиты с прослоями песчаников и углистых алевролитов; меловой комплекс: 3 – диориты, габбродиориты, диоритовые порфириты (*a* – интрузивы, *b* – дайки), 4 – гранодиориты, граниты (*a* – интрузивы, *b* – дайки); 5 – юрские отложения, долохитская свита: алевролиты, песчаники, туфопесчаники, конгломераты, гравелиты; 6 – раннепротерозойский позднестановой комплекс: субщелочные гнейсовидные граниты; 7 – раннеархейский комплекс: габброамфиболиты; 8 – рудные тела; 9 – разломы; 10 – россыпи золота

Fig. 3. Schematic geological map of the Kirovskoe gold deposit area, after [4]:

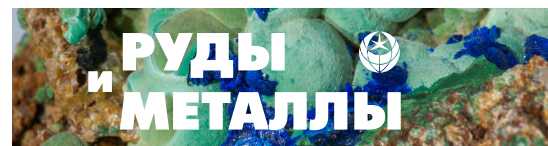
1 – Quaternary sediments; 2 – Cretaceous deposits of the Strelkinsky Formation: sandstones, siltstones, conglomerates, and gravelites with interlayers of sandstones and carbonaceous siltstones; Cretaceous Complex: 3 – diorites, gabbrodiorites, diorite porphyrites (*a* – intrusions, *b* – dikes), 4 – granodiorites, granites (*a* – intrusions, *b* – dikes); 5 – Jurassic deposits, Dolokhite Formation: siltstones, sandstones, tuffaceous sandstones, conglomerates, gravelites; 6 – Early Proterozoic Pozdnestanovoy Complex: subalkaline gneiss-like granites; 7 – Early Archaean Complex: gabbroamphibolites; 8 – ore bodies; 9 – faults; 10 – gold placers

её экзоконтакте. В ряде работ указано на генетическую связь золотого оруденения с гранитоидами Джалиндинской интрузии [4, 6, 12].

Рудные тела представлены золотоносными кварцевыми и сульфидно-кварцевыми жилами и жильно-прожилковыми зонами, располагающимися в эндо- и экзоконтактах Джалиндинской гранитоидной интрузии. Рудоносной системой служит пучок синрудных даек диоритовых порфиритов и гранодиорит-пор-

фиров раннего мела и парагенетически связанных с ними золотоносных кварцевых и сульфидно-кварцевых жил субширотного и северо-восточного направления, совпадающих с простираем главных разрывных нарушений (рис. 3).

Выделяется два типа рудных тел: золото-сульфидно-кварцевые жилы и жильно-прожилковые зоны субширотного простираения и малосульфидные золото-кварцевые жилы се-



веро-восточной ориентировки. Золото-сульфидно-кварцевые жилы и жильно-прожилковые зоны располагаются преимущественно в южной части месторождения. Они сложены кварцем, карбонатами, серицитом и сульфидами, количество которых нередко достигает 10–15 %. Среди них преобладают сфалерит, галенит и халькопирит. Золото мелкое и тонкое. Его проба 850–864 ‰. Околорудные изменения представлены березитизацией и аргиллизацией.

Во вторую группу входят золото-кварцевые жилы. Околорудные изменения представлены березитизацией. Из жильных минералов преобладает кварц, менее развиты карбонаты, полевой шпат и серицит. Среди рудных минералов, количество которых не превышает 3–5 %, преобладают пирит, арсенопирит, висмутин, халькопирит и золото. Реже встречаются сфалерит, галенит, блёклые руды, магнетит, буланжерит, молибденит, шеелит и самородный висмут. Золото свободное, крупных размеров, нередко встречаются самородки массой до 10–15 г. Проба его высокая – 924–953 ‰ [6].

Выявлена трёхстадийная последовательность формирования золотосодержащих минеральных ассоциаций. В первую стадию отлагались шеелит-сульфидно-кварцевые руды, среди которых выделены молибденит-шеелит-кварцевая и шеелит-халькопирит-кварцевая ассоциации. Во вторую стадию формировались сульфидно-кварцевые руды, представленные пирит-арсенопирит-кварцевой, халькопирит-карбонатно-кварцевой и золото-висмутин-кварцевой ассоциациями. В третью стадию образовались жилы и микропрожилки с Cu-Ni и Sb-Co минерализацией. Они представлены пентландит-халькопирит-кварцевой и арсенопирит-глаукокодот-кварцевой ассоциациями [10].

Нижней возрастной границей золотого оруденения служит раннемеловой возраст наиболее молодых вмещающих пород – гранодиоритов и гранитов Джалиндинской интрузии верхнеамурского комплекса. Возраст комплекса определяется по прорыванию им раннепозднеюрских терригенных отложений Верхнеамурского прогиба и позднеюрских субщелочных гранитов магдагачинского комплекса.

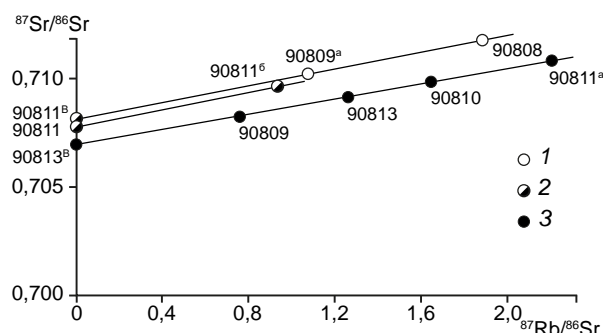


Рис. 4. Rb-Sr изохронные графики рудосопровождающих минералов Кировского месторождения по [11]: стадии минералообразования: 1 – ранняя, 2 – средняя, 3 – поздняя

Fig. 4. Rb-Sr isochron plots of ore-accompanying minerals of the Kirovskoe deposit, after [11]: mineral formation stages: 1 – early, 2 – middle, 3 – late

Верхняя возрастная граница определяется по прорыванию пород верхнеамурского комплекса интрузиями буриндинского [14]. Восточнее, в бассейне р. Елна, изотопный возраст массива диоритов буриндинского комплекса, установленный U-Pb методом по цирконам, составил $117,8 \pm 2,6$ млн лет, то есть в пределах аптского яруса раннего мела [14].

Изотопный возраст Джалиндинского массива вначале был определён K-Ar методом в интервале 110–140 млн лет [6]. Затем этот интервал был сужен до 117–135 млн лет. Дальнейшие U-Pb геохронологические исследования цирконов массива методом LA-ICP-MS установили его возраст в $125,55 \pm 0,68$ млн лет [4], что отвечает границе барремского и аптского ярусов раннемеловой эпохи.

Определение изотопного возраста золотого оруденения произведено Rb-Sr методом в лаборатории изотопной геологии ВСЕГЕИ [11]. Анализировались серицит и кальцит трёх рудных стадий минерализации жил – Немецкой и Толстой. Получены три изохроны с возрастом $126 \pm 8,8$, 128 и 131 млн лет (рис. 4). Таким образом, изотопный возраст золотого оруденения оценивается в 126–131 млн лет, что отвечает барремскому ярусу раннего мела.

Небольшая разница в изотопном возрасте между внедрением Джалиндинской интрузии и формированием в её эндо- и экзоконтактах

золоторудных кварцевых жил Кировского месторождения объясняется разными методами исследования, а также вероятной погрешностью определений.

Изотопные определения подтверждают мнение большинства исследователей Кировского месторождения о его генетической связи с Джалиндинской интрузией верхнеамурского комплекса и парагенетической – с серией сопровождающих рудные тела даек пёстрого состава. Изотопный возраст пострудных даек диоритовых порфириров, определённый К-Аг методом, составляет 105 млн лет [6].

Соловьёвское месторождение, открытое и разведанное в начале XXI века, находится на юго-восточном фланге Кировского месторождения, в экзоконтакте Джалиндинской интрузии гранодиоритов нижнего мела. Вмещающие породы состоят из песчаников, алевролитов и аргиллитов долохитской толщи среднеюрского возраста. Интрузивные образования представлены серией даек диоритовых порфириров, гранодиорит-порфириров, гранодиоритов и гранодиорит-порфириров раннемелового возраста.

Рудные тела представлены минерализованными зонами, сложенными альбит-ортоклаз-мусковит-кварцевыми метасоматитами с кварцевыми жилами и прожилками. Содержание рудных минералов не превышает 3 %. Среди них преобладает арсенопирит, реже встречаются пирит, халькопирит, молибденит, лёллингит, шеелит, теллуриды висмута, висмутин и самородный висмут, а также высокопробное самородное золото (870–1000 ‰).

Из геологических реперов возраста золотого оруденения отметим среднеюрский возраст вмещающих терригенных пород, а также раннемеловой возраст сопровождающих золотое оруденение даек пёстрого состава. По геолого-структурной позиции и составу руд Соловьёвское месторождение является аналогом Кировского месторождения. В связи с этим, несмотря на отсутствие изотопных анализов возраста руд, раннемеловой, предположительно барремский, возраст его не вызывает сомнения.

Золото-кварцевая формация. В эту группу входят четыре месторождения – Золотая Го-

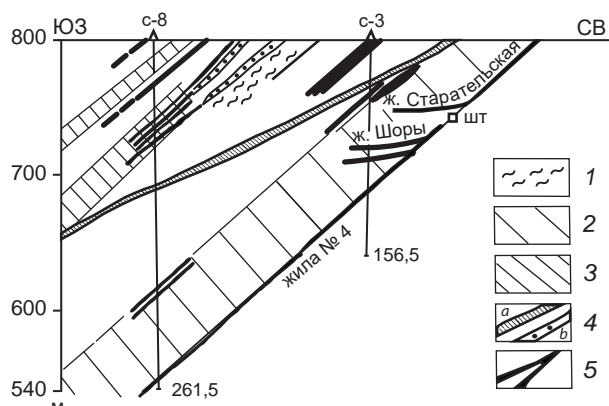


Рис. 5. Разрез месторождения Золотая Гора по [10]:

1 – биотитовые и двуслюдяные гнейсы с зонами диафторитов; 2 – пачки переслаивания гнейсов и амфиболитов; 3 – биотит-амфиболовые гнейсы и амфиболиты; 4 – дайки микродиоритов (а), фельзитов и сиенит-порфириров (b); 5 – золоторудные жилы

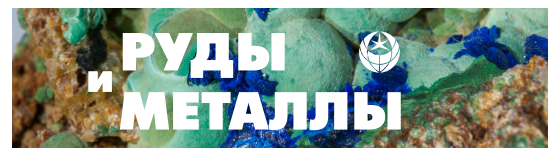
Fig. 5. Geological section across the Zolotaya Gora ore deposit, afer [10]:

1 – biotite and two-mica gneisses with diaphthorite zones; 2 – units of interbedded gneisses and amphibolites; 3 – biotite-amphibole gneisses and amphibolites; 4 – dikes: (a) microdiorites and (b) felsites and syenite porphyries; 5 – gold ore veins

ра, Успенское, Одолго и Снежинка. Они являются малопродуктивными ввиду небольших параметров рудных тел. На трёх из них, кроме Снежинки, велась относительно небольшая добыча золота (от 0,5 до 2 т).

Золото-кварцевое месторождение *Золотая Гора* расположено в центральной части одноимённого РРУ, в верховьях р. Хугдер. Вмещающими породами служат биотитовые, двуслюдяные, нередко графитсодержащие гнейсы и амфиболиты раннего архея. Интрузивные образования представлены пострудными дайками микродиоритов, фельзит-порфириров и сиенит-порфириров мезозойского возраста, прорывающими золоторудные жилы [12]. Взаимоотношение пострудных даек и оруденения показано на рис. 5.

Рудные тела представлены серией мало-сульфидных кварцевых, карбонатно-кварцевых и кварц-полевошпатовых жил с высоким содержанием золота. В составе жил преобладают стекловидный кварц и калиевый по-



левой шпат, встречаются прожилки и линзы кальцита. Рудные минералы (в количестве от 5 до 15 %) – пирит, пирротин, халькопирит, галенит, молибденит и высокопробное (927–997 ‰) самородное золото.

Нижней возрастной границей служит раннеархейский возраст вмещающих оруденение гнейсов и кристаллосланцев. Верхней – позднемезозойский возраст пострудных даек микродиоритов, фельзит-порфиров и сиенит-порфиров.

Изотопный возраст оруденения определён в лаборатории изотопной геологии ВСЕГЕИ на приборе МИ-1201Т. Исследовались мономинеральные фракции полевого шпата. В результате получены изохроны с возрастом 155 ± 7 млн лет, что отвечает границе киммериджского и оксфордского ярусов верхней юры [16].

Месторождение Успенское располагается в юго-западной части одноимённого РРУ, в долине р. Малый Джуваскит. Вмещающими породами служат биотитовые, биотит-роговообманковые гнейсы и амфиболиты позднего архея. Из интрузивных образований отмечаются пластовые тела метаморфизованных габбро, габбро-амфиболитов и серпентинизированных гипербазитов позднепалеозойского возраста, а также дайки диорит-порфиров, спессартитов, гранодиорит-порфиров и гранит-порфиров олёкмо-станового комплекса раннего мела. К-Аг изотопный возраст даек составляет 122–140 млн лет, что отвечает низам раннемеловой эпохи [14].

Рудные тела представлены кварцевыми, кварц-карбонат-полевошпатовыми и сульфидно-кварцевыми жилами, а также зонами прожилкового окварцевания с сульфидной вкрапленностью. Из сульфидов отмечаются пирит, арсенопирит, молибденит, сфалерит и халькопирит. Золото крупное, свободное, часто видимое, размеры его от 0,1 до 4 мм. Проба золота колеблется в пределах 799–882 ‰, в среднем 837,4 ‰.

Нижней возрастной границей служит раннеархейский возраст вмещающих оруденение гнейсов и амфиболитов. Взаимоотношения даек раннемеловой эпохи с рудными

телами не наблюдалось. Можно предположить, что они наиболее близки по времени к формированию золотого оруденения.

Месторождение Одолго находится в северной части Уркиминского РРУ, на правом берегу р. Одолго. Вмещающими породами служат метапесчаники, биотитовые гнейсы, слюдястые сланцы и кварциты джелтулакской серии позднего архея. Часть некондиционных рудных тел располагается в массиве порфировидных гранитов и гранодиоритов раннего протерозоя. Рудными телами являются сложной формы залежи кварц-серицит-мусковитовых метасоматитов с прожилками и линзами гранулированного кварца. Из рудных минералов отмечаются титаномагнетит, пирит, пирротин и самородное золото. Золото свободное, от мелкого до крупного, высокопробное (940–960 ‰). Рудные тела пересекают пострудные дайки мелкозернистых гранит-порфиров олёкмо-станового комплекса раннего мела (рис. 6). Сделано предположение о генетической связи дайкового комплекса с ранне-позднемеловыми интрузивными и вулканогенными комплексами. К-Аг изотопный возраст даек соответствует интервалу от 120 ± 15 до 110 ± 10 млн лет, что отвечает раннемеловому этапу [14].

Нижней границей возраста золотого оруденения являются вмещающие гранитоиды раннего протерозоя. Верхней возрастной границей служит раннемеловой возраст пострудных даек гранит-порфиров, пересекающих рудные тела.

Месторождение Снежинка располагается на юго-западном фланге Соловьёвского центра в рамках Уркинского РРУ, на правом борту верховьев р. Мал Урка. Вмещающими породами служат лейкократовые граниты и граносиениты уркинского комплекса позднего триаса [8]. Широко развиты пострудные дайки гранит-порфиров и граносиенит-порфиров светлинского комплекса, а также диоритовых порфиров и спессартитов уктунского комплекса позднего триаса. Взаимоотношение рудных тел и даек показано на рис. 7.

Месторождение Снежинка представлено зонами прожилкового окварцевания и кар-

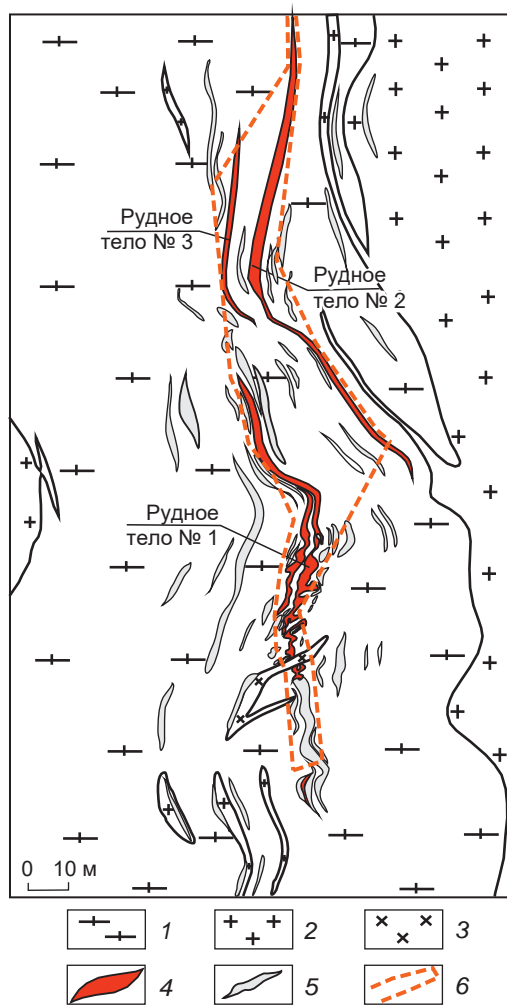


Рис. 6. Геологическое строение месторождения Одолго [14]:

1 – джелтулакская серия раннего протерозоя нерасчленённая: метапесчаники, нередко превращённые в биотитовые гнейсы; 2 – раннепротерозойские биотитовые, биотит-роговообманковые порфировидные граниты и плагиограниты; 3 – раннемеловые дайки гранит-порфиров; 4 – промышленные рудные тела; 5 – некондиционные золотосодержащие тела; 6 – контур продуктивной зоны

Fig. 6. Schematic geological map of the Odolgo deposit [14]:

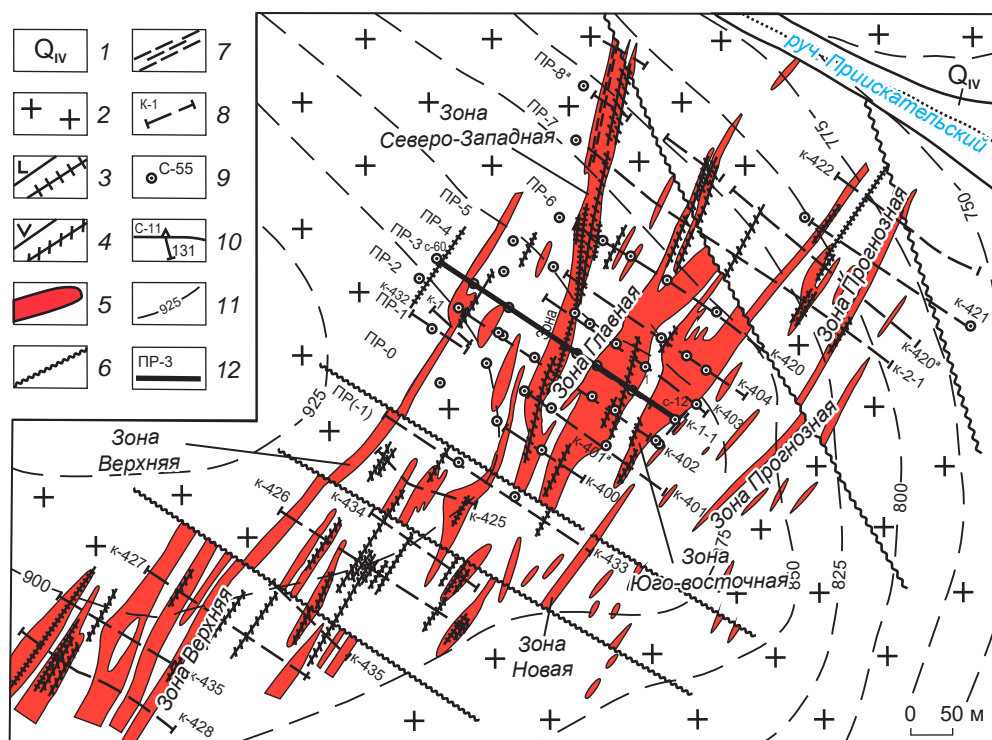
1 – Dzheltulak Series of the Early Proterozoic, undivided: metasandstones, often transformed into biotite gneisses; 2 – Early Proterozoic biotite, biotite-hornblende porphyritic granites and plagiogranites; 3 – Early Cretaceous granite-porphyrus and syenite-porphyrus dikes; 4 – commercial-grade ore bodies; 5 – subcommercial gold-bearing bodies; 6 – outlines of the productive zone

бонатно-кварцевыми жилами в березитизированных гранитах и граносиенитах. Рудные минералы – пирит, халькопирит, арсенопирит, галенит, сфалерит и самородное золото – встречаются в количестве первых процентов. Золото мелкое и тонкое, проба его меняется в пределах 772–870 ‰. Околорудные изменения представлены березитизацией и пропилитизацией, реже аргиллизацией [20].

Нижней возрастной границей золотого оруденения служит поздне триасовый возраст вмещающих лейкократовых гранитов и граносиенитов уркинского комплекса. Верхняя граница определена тоже в пределах триаса по наличию пострудных даек гранит-порфиров и граносиенит-порфиров светлинского комплекса, а также диоритовых порфиров и спессартитов уктунского комплекса позднего триаса.

Исследование изотопного возраста золотого оруденения проведено Rb-Sr методом в лаборатории изотопной геологии ВСЕГЕИ на приборе МИ-1201Т (аналитик Ю. П. Шергина). Исследованию подвергались мономинеральные фракции серицита и кальцита из околорудных березитов. При этом получена изохрона с возрастом $212 \pm 5,5$ млн лет, что отвечает норийскому ярусу позднего триаса (рис. 8). Это уточняет поздне триасовый возраст золотого оруденения, полученный по геологическим данным [20]. Вулкано-плутонические образования интрузивных пород уркинского, светлинского и уктунского комплексов, по-видимому, являются единой вулкано-плутонической ассоциацией, с поздними дериватами которой связано золотое оруденение месторождения Снежинка.

Обсуждение результатов. Ранее нами было показано, что формирование золоторудных месторождений Приамурской провинции произошло в единый поздне мезозойский этап тектоно-магматической активизации. Она была обусловлена коллизией Алдано-Станового и Амурского геоблоков с зажатой между ними Монголо-Охотской складчатой системой. Отмечалась тенденция омоложения возраста месторождений от позднего триаса (месторождение Снежинка) на западном фланге провинции до позднего мела на восточном (месторожде-



Геологический разрез по профилю № 3

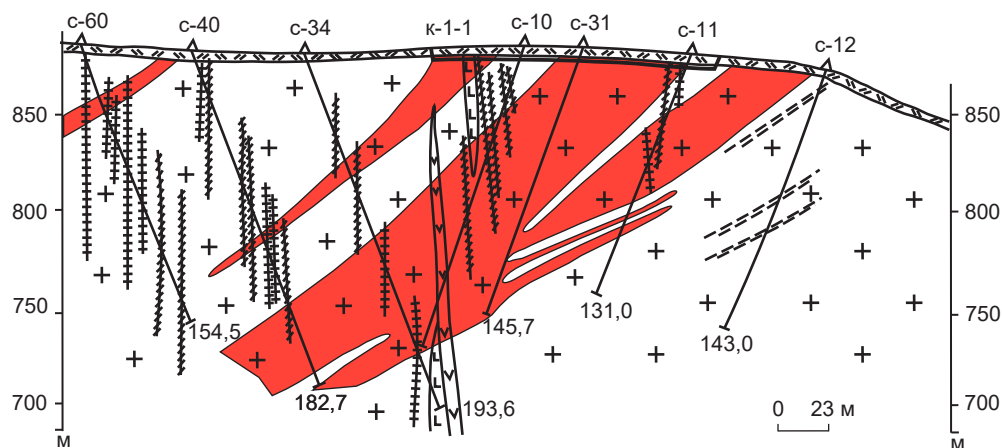


Рис. 7. План и разрез месторождения Снежинка по результатам разведочных работ [20]:

1 – аллювиальные отложения (Q_{IV}); 2 – граниты, граносиениты; дайки: 3 – гранит-порфиров, граносиенит-порфиров, 4 – диоритовых порфиров, спессартитов; 5 – контур рудных тел; 6 – разломы; 7 – зоны трещиноватости; 8 – канавы и их номера; скважины и их номера: 9 – на схеме, 10 – на разрезе; 11 – изолинии высот (м); 12 – геологический разрез по профилю № 3

Fig. 7. Plan and section of the Snezhinka deposit, based on the exploration results [20]:

1 – alluvial deposits (Q_{IV}); 2 – granites, granosyenites; dikes: 3 – granite porphyries, granosyenite porphyries, 4 – diorite porphyrites, spessartites; 5 – outlines of ore bodies; 6 – faults; 7 – fracture zones; 8 – ditches and their numbers; 9 – boreholes (on the plan) and their numbers; 10 – boreholes (on the geological section) and their numbers; 11 – altitude contours (m); 12 – geological section line along profile № 3

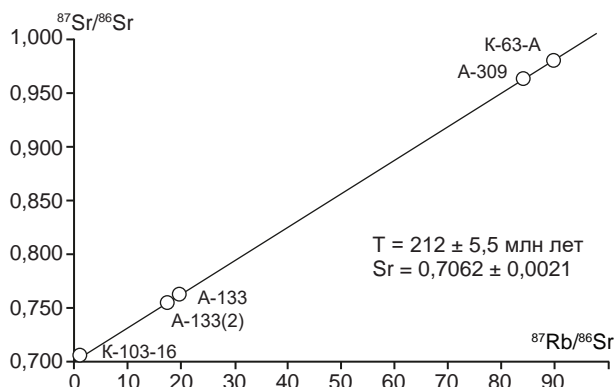


Рис. 8. Rb-Sr изохронный график для рудосопровождающих минералов месторождения Снежинка

Fig. 8. Rb-Sr isochron plot for ore-accompanying minerals of the Snezhinka deposit

ние Буровое) [17]. Расположенный на западном фланге провинции Соловьёвский золоторудный центр характеризуется изотопным возрастом золоторудных месторождений от позднего триаса (месторождение Снежинка) и ранней юры (месторождение Золотая Гора) до раннего мела (месторождения Березитовое, Кировское, Соловьёвское). Изотопный возраст других месторождений этого центра нуждается в дальнейшем изучении.

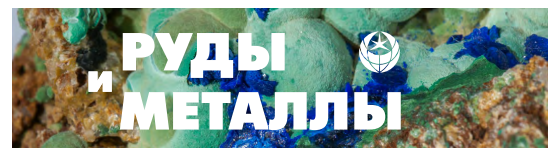
Определение геологического возраста формирования золотого оруденения Соловьёвского золоторудного центра сопряжено со значительными трудностями. Они заключаются главным образом в том, что нижняя возрастная граница, определяемая по вмещающим породам, в большинстве случаев значительно древнее изотопного возраста формирования золотого оруденения. На месторождениях Золотая Гора и Успенское вмещающими оруденение породами являются гнейсы и кристаллосланцы нижнего архея, на Одолго – метапесчаники и сланцы нижнего протерозоя, на Березитовом месторождении – верхнепалеозойские гранодиориты и граниты, на Соловьёвском – терригенные породы средней юры. Лишь на двух месторождениях возраст вмещающих интрузивных пород близок этапу формирования оруденения. На Кировском месторождении это Джалиндинская интрузия гранитов и гранодиоритов раннего мела,

а на месторождении Снежинка – граниты и граносиениты позднего триаса.

На верхнюю возрастную границу обычно указывает возраст внутри- или пострудных интрузивных образований или перекрывающих оруденение толщ. В Соловьёвском золоторудном центре перекрывающие оруденение толщи не известны, пострудные дайки развиты не на всех месторождениях, а внутрирудные известны только на Березитовом месторождении. Возраст внутрирудных даек метапорфиров этого месторождения оценён, по результатам $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ изотопно-геохронологических исследований, в $125,2 \pm 2,4$ и $125,2 \pm 3,4$ млн лет [15], а возраст пострудных даек диоритовых порфиров и спессартитов, по результатам анализа K-Ar методом, составляет 105–100 млн лет [8].

Пострудные дайки диоритовых порфиров известны на Кировском месторождении. Их изотопный возраст, определённый K-Ar методом, составляет 105 млн лет [6]. На месторождении Золотая Гора отмечаются пострудные дайки микродиоритов, фельзит-порфиров и сиенит-порфиров позднемезозойского возраста [11]. Пострудные дайки гранит-порфиров раннемелового возраста пересекают золоторудные тела месторождения Одолго [14]. Широкое развитие пострудных даек гранит-порфиров и граносиенит-порфиров, а также диоритовых порфиров и спессартитов позднего триаса отмечается на месторождении Снежинка [7].

Более точную информацию о возрастных границах формирования золотого оруденения дают изотопные методы исследования. Результаты Rb-Sr и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ анализов указывают на позднемезозойский изотопный возраст золотого оруденения Соловьёвского центра, в интервале от позднего триаса до раннего мела. Полные данные получены об изотопном возрасте месторождений Березитовое золотополиметаллической формации и Кировское – золото-сульфидно-кварцевой, которые являются основными продуцентами рудного золота центра. Из них добыто более 80 % рудного золота. Изотопный возраст этих месторождений практически совпадает: Березитовое –



132–125 млн лет, Кировское – 131–126 млн лет, отвечая готеривскому и барремскому ярусам раннего мела. Не вызывает сомнений близкий к ним возраст формирования Соловьёвского месторождения, являющегося аналогом Кировского и расположенного на его окраине.

Изотопные определения возраста небольших по продуктивности месторождений золото-кварцевой формации указывают на их более древнее происхождение. Для месторождения Снежинка Rb-Sr изотопный возраст равен 212 ± 5 млн лет (поздний триас), а для месторождения Золотая Гора – 155 ± 7 млн лет (поздняя юра).

Заключение. В результате исследования установлено, что по геологическим данным и изотопным определениям, золоторудные мес-

торождения Соловьёвского золоторудного центра Приамурской провинции были сформированы в мезозойское время. Выявлены два этапа формирования золотого оруденения. В ранний поздне триасовый–раннеюрский этап возникли низкопродуктивные месторождения золото-кварцевой формации (Снежинка и Золотая Гора). Не исключено, что в это же время образовались и другие месторождения этой же формации – Успенское и Одолго. Во второй, раннемеловой, этап были сформированы основные продуценты золотого оруденения Соловьёвского центра – месторождения Березитовое, Кировское и Соловьёвское. Они отнесены к следующим золоторудным формациям – золотополиметаллической (Березитовое) и золото-сульфидно-кварцевой (Кировское и Соловьёвское).

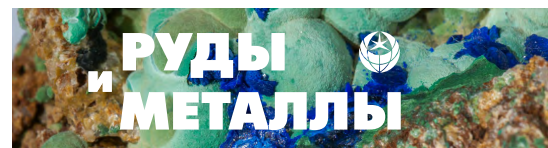
Список литературы

1. Алексеев Я. В., Заскинд Е. С., Конкина О. М. К вопросу выделения минерально-сырьевых центров твёрдых полезных ископаемых // Отечественная геология. – 2021. – № 2. – С. 19–27.
2. Вах А. С. Золотая минерализация и особенности генезиса Березитового полиметаллического месторождения (Верхнее Приамурье) : автореф. дис. на соискание учёного степеней. канд. геол.-минерал. наук. – Владивосток : ДВГИ ДВО АН СССР, 1989. – 23 с.
3. Вах А. С., Авченко О. В., Киселев В. И. [и др.]. Геохронологические U-Pb изотопные исследования цирконов из гранитов и рудоносных метасоматитов Березитового золото-полиметаллического месторождения (Верхнее Приамурье, Россия) // Тихоокеанская геология. – 2013. – Т. 32, № 6. – С. 20–39.
4. Гвоздев В. И., Горячев Н. А., Вах А. С. [и др.]. Минеральный состав и типоморфные особенности минералов золоторудных жил Кировского месторождения (Верхнее Приамурье) // Тихоокеанская геология. – 2013. – Т. 32, № 6. – С. 40–51.
5. Горошко М. В., Каплун В. Б., Малышев Ю. Ф. Джелтулакский разлом: глубинное строение, эволюция, металлогения // Литосфера. – 2010. – № 6. – С. 38–54.
6. Гуров Л. П. Минеральные ассоциации Кировского золоторудного месторождения (Верхнее Приамурье) // Золотая минерализация Верхнего Приамурья. – Владивосток : ДВНЦ, 1978. – С. 11–86.
7. Константинов М. М. Золоторудные провинции мира. – М. : Научный мир, 2006. – 358 с.
8. Копылов М. И., Петухова Л. Л. Сергачинская золоторудная зона и перспективы выявления новых месторождений золота // Руды и металлы. – 2019. – № 1. – С. 37–44.
9. Мельников А. В., Сорокин А. А., Пономарчук В. А., Травин А. В., Сорокин А. П. Золотополиметаллическое месторождение Березитовое: основные минерагенические особенности, возраст и связь с магматизмом // Геология и геофизика. – 2009. – № 3. – С. 258–265.
10. Месторождения рудного золота / под ред. В. А. Степанова. – Благовещенск : АмГУ, 2017. – 150 с.
11. Моисеенко В. Г., Степанов В. А., Шергина Ю. П. Возраст формирования Кировского золоторудного месторождения // Доклады Академии наук. – 1999. – Т. 369, № 3. – С. 354–356.
12. Моисеенко В. Г., Эйрш Л. В. Золоторудные месторождения Востока Азии. – Владивосток : Дальнаука, 1996. – 352 с.
13. Округин В. М. Новые данные о возрасте и генезисе эпitherмальных месторождений зоны перехода континент–океан // Геодинамика, магматизм и минерагения континентальных окраин Севера Тихоокеана : Материалы Всероссийского совещания, посвящённого 90-летию акаде-

- мика Н. А. Шило (XII годич. собр. Сев.-Вост. отделения ВМО) : [в 3-х т.]. – Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 2003. – Т. 3. – С. 39–41.
14. Петрук Н. Н., Шилова М. Н., Козлов С. А. [и др.]. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000. Лист N-51 – Сквородино (М-51). Объяснительная записка. – СПб. : Картфабрика ВСЕГЕИ, 2009. – 448 с.
 15. Сорокин А. А., Пономарчук В. А., Травин А. В., Рогулина Л. И., Пономарчук А. В. Корреляция процессов рудообразования на золото-полиметаллическом месторождении Березитовое западной части Селенгино-Станового супертеррейна и региональных тектономагматических событий // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55, № 3. – С. 432–448.
 16. Степанов В. А. Этапы формирования и генезис золоторудных месторождений Приамурья // Доклады Академии наук. – 2005. – Т. 403, № 1. – С. 83–87.
 17. Степанов В. А. Одноэтапность формирования золоторудных месторождений Приамурской провинции // Основные проблемы в учении об эндогенных рудных месторождениях: новые горизонты. – М. : ИГЕМ РАН, 2017. – С. 465–468.
 18. Степанов В. А., Шергина Ю. П., Шкорбатова Г. С. и др. Возраст руд Кубакинского месторождения // Тихоокеанская геология. – 1998. – Т. 17, № 5. – С. 89–97.
 19. Степанов В. А., Мельников А. В. Исторически сложившиеся центры рудного золота в Приамурской провинции // Разведка и охрана недр. – 2021. – № 12. – С. 15–23.
 20. Степанов В. А., Мельников А. В. Золоторудное месторождение Снежинка Уркинского рудно-россыпного узла Приамурской провинции // Отечественная геология. – 2022. – № 3. – С. 22–31.
 21. Степанов В. А., Мельников А. В. Перспективы Соловьёвского золоторудного центра Приамурской золотоносной провинции // Вестник ДВО РАН. – 2023. – № 1. – С. 6–20.

References

1. Alekseev Ya. V., Zaskind E. S., Konkina O. M. K voprosu vydeleniya mineral'no-syr'evykh tsentrov tverdykh poleznykh iskopaemykh [On the issue of allocation of mineral resource centers of solid minerals], *Otechestvennaya geologiya* [National Geology], 2021, No 2, pp. 19–27. (In Russ.).
2. Vakh A. S. Zolotaya mineralizatsiya i osobennosti genezisa Berезитового полиметаллического месторождения (Verkhnee Priamur'e) [Golden mineralization and features of the genesis of the Berезite polymetallic deposit (Upper Amur region): Extended abstract of candidate's thesis], Vladivostok, DVGI DVO AN SSSR Publ., 1989, 23 p.
3. Vakh A. S., Avchenko O. V., Kiselev V. I., Sergeev S. A., Presnyakov S. L. Geokhronologicheskie U-Pb izotopnye issledovaniya tsirkonov iz granitov i rudonosnykh metasomatitov Berезитового золотополиметаллического месторождения (Verkhnee Priamur'e, Rossiya) [U-Pb isotopic geochronologic investigations of zircons from granites and ore-bearing metasomatites of the Berезitiovoe gold-polymetallic deposit (Upper Amur region)], *Tikhookeanskaya geologiya* [Russian Journal of Pacific Geology], 2013, V. 32, No 6, pp. 20–39. (In Russ.).
4. Gvozdev V. I., Goryachev N. A., Vakh A. S., Fedoseev D. G., Semenyak B. I. Mineral'nyi sostav i tipomorfnye osobennosti mineralov zolotorudnykh zhil Kirovskogo месторождения (Verkhnee Priamur'e) [Mineral composition and typomorphic features of minerals from gold-ore veins of the Kirovskoe deposit (Upper Priamurye)], *Tikhookeanskaya geologiya* [Russian Journal of Pacific Geology], 2013, V. 32, No 6, pp. 40–51. (In Russ.).
5. Goroshko M. V., Kaplun V. B., Malyshev Yu. F. Dzhel'tulakskii razlom: glubinnoe stroenie, evolyutsiya, metallogeniya [The Dzheltulak fault: deep structure evolution and metallogeny], *Litosfera* [Lithosphere], 2010, No 6, pp. 38–54. (In Russ.).
6. Gurov L. P. Mineral'nye assotsiatsii Kirovskogo zolotorudnogo месторождения (Verkhnee Priamur'e) [Mineral associations of the Kirov gold deposit (Upper Amur region)], *Zolotaya mineralizatsiya Verkhnego i Srednego Priamur'ya* [Gold mineralization of the Upper and Middle Amur region], Vladivostok, DVNTs Publ., 1978, pp. 11–86.
7. Konstantinov M. M. Zolotorudnye provintsii mira [Gold ore provinces of the world], Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2006, 358 p.
8. Kopylov M. I., Petukhova L. L. Sergachinskaya zolotorudnaya zona i perspektivy vyyavleniya novykh месторождений золота [Sergachinskaya gold zone and prospects for new gold deposit identification], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2019, No 1, 37–44. (In Russ.).
9. Mel'nikov A. V., Sorokin A. A., Ponomarchuk V. A., Travin A. V., Sorokin A. P. Zolotopolimetallichesкое месторождение Berезитовое: osnovnye mineralogicheskie osobennosti, vozrast i svyaz' s magmatizmom [The Berезitovoe gold-polymetallic deposit



- (East Siberia): mineralogy, age, and relation with magmatism], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2009, V. 50, No 3, pp. 258–265. (In Russ.).
10. Mestorozhdeniya rudnogo zolota [Deposits of ore gold], eds. V. A. Stepanov, Blagoveshchensk, AmGU Publ., 2017, 150 p.
 11. Moiseenko V. G., Stepanov V. A., Shergina Yu. P. Vozrast formirovaniya Kirovskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya [The age of formation of the Kirov gold deposit], *Doklady Akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*, 1999, V. 369, No 3, pp. 354–356. (In Russ.).
 12. Moiseenko V. G., Eirish L. V. Zolotorudnye mestorozhdeniya Vostoka Azii [Gold deposits of East Asia], Vladivostok, Dal'nauka Publ., 1996, 352 p.
 13. Okrugin V. M. Novye dannye o vozraste i genezise epitermal'nykh mestorozhdenii zony perekhoda kontinent – okean [New data on the age and genesis of epithermal deposits of the continent–ocean transition zone], *Geodinamika, magmatizm i minerageniya kontinental'nykh okrain Severa Patsifiki: Materialy Vserossiiskogo soveshchaniya, posvyashchennogo 90-letiyu akademika N. A. Shilo (XII godichnoe sobranie Severo-Vostochnogo otdeleniya VMO) [Geodynamics, magmatism and minerageny of the continental margins of the North of Pacifica : Proceedings of the All-Russian Meeting dedicated to the 90th anniversary of Academician N. A. Shilo (XII Annual Meeting of the North-eastern Branch of the WMO)]*, Magadan, SVKNII DVO RAN, 2003, V. 3, pp. 39–41.
 14. Petruk N. N., Shilova M. N., Kozlov S. A. [et al.]. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000. List N-51 – Skovorodino (M-51). Ob'yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1,000,000. Sheet N-51 – Skovorodino (M-51). An explanatory note], St. Petersburg, Kartfabrika VSEGEI Publ., 2009, 448 p.
 15. Sorokin A. A., Ponomarchuk V. A., Travin A. V., Rogulina L. I., Ponomarchuk A. V. Korrelyatsiya protsessov rudoobrazovaniya na zoloto-polimetallicheskom mestorozhdenii Berezitovoe zapadnoi chasti Selengino-Stanovogo superterreina i regional'nykh tektonomagmaticheskikh sobytii [Correlation between the ore formation processes in the Berezitovoe gold-complex-metal deposit (Western part of the Selenga-Stanovoy superterrane) and the regional tectonomagmatic events], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2014, V. 55, No 3, pp. 432–448. (In Russ.).
 16. Stepanov V. A. Etapy formirovaniya i genezis zolotorudnykh mestorozhdenii Priamur'ya [Stages of formation and genesis of gold deposits in the Amur region], *Doklady Akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*, 2005, V. 403, No 1, pp. 83–87. (In Russ.).
 17. Stepanov V. A. Odnoetapnost' formirovaniya zolotorudnykh mestorozhdenii Priamurskoi provintsii [One-stage formation of gold deposits in the Amur province], *Osnovnye problemy v uchenii ob endogennykh rudnykh mestorozhdeniyakh: novye gorizonty [Main problems in the study of endogenous ore deposits: new horizons]*, Moscow, IGEM RAN Publ., 2017, pp. 465–468. (In Russ.).
 18. Stepanov V. A., Shergina Yu. P., Shkorbatova G. S. [et al.]. Vozrast rud Kubakinskogo mestorozhdeniya [Age of the ores of the Kubakinskoye deposit], *Tikhookeanskaya geologiya [Russian Journal of Pacific Geology]*, 1998, V. 17, No 5, pp. 89–97. (In Russ.).
 19. Stepanov V. A., Mel'nikov A. V. Istoricheski slozhivshiesya tsentry rudnogo zolota v Priamurskoi provintsii [Historical centers of ore gold mining in the Amur province], *Razvedka i okhrana nedr [Prospect and protection of mineral resources]*, 2021, No 12, pp. 15–23. (In Russ.).
 20. Stepanov V. A., Mel'nikov A. V. Zolotorudnoe mestorozhdenie Snezhinka Urkinskogo rudno-rossypnogo uzla Priamurskoi provintsii [The Snezhinka gold ore deposit in the Urkinsky ore-placer cluster of the Amur province], *Otechestvennaya geologiya [National Geology]*, 2022, No 3, pp. 22–31. (In Russ.).
 21. Stepanov V. A., Mel'nikov A. V. Perspektivy Solov'evskogo zolotorudnogo tsentra Priamurskoi zolotonosnoi provintsii [Prospects of the Solovyev gold mining center of the Amur gold-bearing province], *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk [Vestnik of Far Eastern Branch of RAS]*, 2023, No 1, pp. 6–20. (In Russ.).

Степанов Виталий Алексеевич (vitstepanov@yandex.ru)

доктор геол.-минерал. наук, профессор, главный научный сотрудник¹

Мельников Антон Владимирович

кандидат геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник²

¹ Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

² Институт геологии и природопользования ДВО РАН, г. Благовещенск, Россия

СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.43 : 553.086 (571.52)

«Скрытая» минералого-геохимическая зональность месторождения Кызык-Чадр (Республика Тыва) по данным лазерного микроанализа сульфидов

Старостин И. А.

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

Аннотация. В рамках изучения вещественного состава медно-порфирового месторождения Кызык-Чадр определены состав и распределение элементов-микропримесей в рудообразующих сульфидных минералах в объёме рудовмещающего пространства. Исследования выполнены методом масс-спектрометрического анализа с лазерной абляцией анализируемого материала. Выявлены устойчиво повторяющиеся качественные и количественные элементы «скрытой» минералого-геохимической зональности, выражающиеся в вариациях концентрации элементов-микропримесей и их соотношений в пиритах и халькопиритах в объёме рудоносного штокверка месторождения.

Обнаруженные тенденции коррелируются с установленной направленностью и концентрическим характером минералогической рудно-метасоматической зональности месторождения.

Ключевые слова: Месторождение Кызык-Чадр, рудно-метасоматическая и «скрытая» минералого-геохимическая зональность, масс-спектрометрия с лазерной абляцией, пирит, халькопирит, элементы-микропримеси.

Для цитирования: Старостин И. А. «Скрытая» минералого-геохимическая зональность месторождения Кызык-Чадр (Республика Тыва) по данным лазерного микроанализа сульфидов. Руды и металлы. 2024. № 1. С. 78–102. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10005.

“Hidden” mineralogical-geochemical zonality revealed by the laser microanalysis of sulfides at the Kyzyk-Chadr deposit, Republic of Tyva

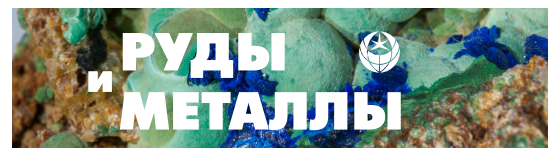
Starostin I. A.

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

Annotation. A comprehensive study of the Kyzyk-Chadr porphyry copper deposit included determination of the composition and spatial distribution of trace elements in ore-forming sulfide minerals over the ore-hosting rock volume. The study was carried out using the mass spectrometric analysis with laser ablation of the analyzed material. Steady qualitative and quantitative elements of a “hidden” mineralogical and geochemical zonality have been identified, that are expressed in variations in the concentration of trace elements and their ratios in pyrites and chalcopyrites over the volume of the ore-bearing porphyry copper stockwork. The identified regularities correlate with the established centrifugal vector and concentric pattern of the mineralogical ore-metasomatic zonality of the ore deposit.

Key words: Kyzyk-Chadr deposit, ore-metasomatic and “hidden” mineralogical-geochemical zonality, laser ablation mass spectrometry, pyrite, chalcopyrite, trace elements.

For citation: Starostin I. A. “Hidden” mineralogical-geochemical zonality revealed by the laser microanalysis of sulfides at the Kyzyk-Chadr deposit, Republic of Tyva. Ores and metals, 2024, № 1, pp. 78–102. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10005.



Введение. Минералого-геохимические методы, основанные на типоморфизме минералов-индикаторов, активно используются при прогнозировании и поисках золоторудных месторождений как в России, так и во всём мире [2–7, 9, 10, 14, 16]. Применительно к месторождениям медно-порфиrowого семейства эти методы развиваются преимущественно в работах зарубежных исследователей [11–13, 15–18, 21, 22]. Существенный прорыв в данном направлении связан с внедрением в практику работ метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерным отбором анализируемого вещества (LA-ICP-MS) [4, 5, 19, 20, 22]. Данный метод обеспечил возможность анализа индикаторных элементов-примесей в индивидуальных зёрнах индикаторных минералов (эпидот, хлорит, магнетит, циркон и др.). В результате возникло отдельное направление поисковой минералогии, включающее выявление типоморфных признаков минералов-индикаторов медно-порфиrowых систем (PIMS) и использование минералого-геохимической зональности в целях прогнозирования и поисков медно-порфиrowых месторождений в этих системах (PVFTS) [12].

Перспективность применяемого подхода, доказанная на практике, обусловила необходимость его развития и в нашей стране. В рамках данного подраздела Госзадания проводятся экспериментальные минералого-геохимические исследования, включающие апробацию методик микроанализа, их совершенствование и адаптацию к обстановкам локализации медно-порфиrowых объектов на территории Российской Федерации.

Большая часть опубликованных к настоящему времени исследований методом LA-ICP-MS содержит данные о составе сульфидов различных золоторудных, полиметаллических колчеданных и других типов месторождений, тогда как информация по медно-порфиrowым месторождениям весьма ограничена. В связи с этим необходимо проведение специализированных экспериментальных исследований сульфидной минерализации на эталонных месторождениях данного типа. Пирит и халькопирит – главные минералы медно-порфиrowых

месторождений. Особенности состава примесей в этих минералах могут служить ключевыми показателями принадлежности сульфидов к различным зонам медно-порфиrowых систем.

В качестве объекта для выполнения опытно-методических работ по применению метода LA-ICP-MS в целях выявления типоморфных особенностей продуктивных медно-порфиrowых систем и их «скрытой» минералого-геохимической зональности выбрано предварительно оценённое золото-молибден-медно-порфиrowое рудопроявление (потенциальное месторождение) Кызык-Чадр. Оно детально изучено в ходе поисковых работ, выполненных с участием ФГБУ «ЦНИГРИ», и может рассматриваться в качестве эталонного при поисках и оценке аналогичных объектов в данном регионе [1, 8].

Для проведения лабораторно-аналитических исследований была составлена коллекция из 100 образцов, отобранных из руд и окколорудных пород этого месторождения.

Краткая характеристика геологического строения и рудно-метасоматической зональности медно-порфиrowого месторождения Кызык-Чадр. Месторождение Кызык-Чадр располагается в наиболее интенсивно дислоцированной осевой части зоны субширотного глубинного разлома, сопровождаемого серией оперяющих тектонических нарушений различного порядка, выраженных зонами трещиноватости, катаклаза, милонитизации, расщепления, брекчирования [1]. Месторождение сложено преимущественно среднезернистыми гранитами кызыкчадрского комплекса, прорванными сложнопостроенным порфиrowым интрузивом, его апофизами и дайками. В краевой части порфиrowого интрузива присутствуют разрозненные тела приконтактовых взрывчатых брекчий, что предполагает относительно малый эрозионный срез рудно-магматической системы объекта. В экзо- и эндоконтактах порфиrowого интрузива развит конформный ему рудоносный штокверк с прожилково-вкрапленной рудной минерализацией, сопровождающейся зонально построенным ореолом гидротермально-метасоматических изменений [1].

Минерализованная зона месторождения Кызык-Чадр, включающая потенциально-промышленные рудные тела, представляет собой крутопадающую линейную штокверковую зону размером (1700×100) – $(300 \times (300–500))$ м, приуроченную к пластинообразному порфиоровому интрузиву (рис. 1). Её особенность – интенсивная тектоническая проработка оруденных пород (катаклаз, милонитизация). Лишь в отдельных блоках сохраняются структурно-текстурные признаки, позволяющие идентифицировать породы главных и порфировых фаз кызыкчадрского комплекса. Штокверковое медно-молибденное оруденение и сопровождающие его кварц-полевошпатовые и кварц-серцит-хлоритовые метасоматиты прослежены бурением на глубину до 500 м, в ряде случаев без признаков выклинивания. Характерны комплексные медно-молибденные с золотом руды со сравнительно невысоким средним содержанием меди (первые-десятые доли процента) и молибдена (тысячные-сотые доли процента).

Зональность метасоматических изменений в пределах участка месторождения заключается в смене от центра к периферии следующих генерализованных метасоматических зон: калиевой, филлизитовой и пропилитовой (с внутренней и внешней подзонами) (рис. 2) [1, 11, 21].

Метасоматиты месторождения интенсивно пиритизированы. Кварцевые, реже кварц-карбонатные ветвящиеся прожилки часто образуют зоны интенсивного окварцевания мощностью 2,5–20 м. Прожилково-вкрапленная сульфидная минерализация представлена пиритом, халькопиритом, молибденитом, в подчинённых количествах присутствуют блёклые руды, борнит, халькозин, галенит, сфалерит, магнетит, редко – субмикроскопические выделения самородного золота. По мере удаления от контакта порфирового тела интенсивность рудной минерализации резко снижается.

Основные тенденции строения рудно-магматической системы месторождения, включая морфологию порфирового интрузива, основные элементы генерализованной зональности ме-

тасоматических изменений и закономерного зонального распределения рудного вещества (рудно-минералого-геохимической зональности) отчётливо проявлены на продольном и поперечных разрезах (рис. 3, см. рис. 2). В продольном сечении, как и в поперечных, намечаются элементы концентрической метасоматической зональности с локализацией редуцированной калиевой зоны в центральной части комплексного рудно-метасоматического ореола рудопроявления. Калиевая зона облекается внутренней пропилитовой зоной, сменяющейся на флангах интенсивно проявленной филлизитовой зоной. Как видно из рисунка, общая морфология метасоматического ореола и его отдельных зон вполне конформны пластинообразным телам кулисно построенного порфирового интрузива и его апофиз.

Морфология зон рудной минерализации различного состава также вполне конформна морфологии порфирового интрузива и зон метасоматических изменений. Редуцированная халькопиритовая ассоциация с реликтами магнетита в её краевых частях сменяется с удалением от предполагаемого центра системы «базовой» пирит-халькопиритовой ассоциацией и затем пиритовой ассоциацией пиритового ореола. Полиметаллическая (галенит-сфалеритовая) ассоциация закономерно локализуется в узких крутопадающих линейных зонах, очевидно, контролируемых разрывными нарушениями. К ним же приурочены и локально проявленные участки развития блёклорудной минерализации.

Основные элементы строения месторождения Кызык-Чадр в целом отвечают типовой модели медно-порфировых месторождений, однако для него отмечается ряд особенностей морфологии рудных тел и вещественного состава: лентовидная в плане и поперечном сечении форма минерализованной зоны, редуцированное распространение калиевой зоны практически без реликтов вторичного биотита, резкое преобладание филлизитовых изменений. Эти особенности могут быть обусловлены формированием оруденения в пределах долгоживущей разломной зоны, экранирующим эффек-

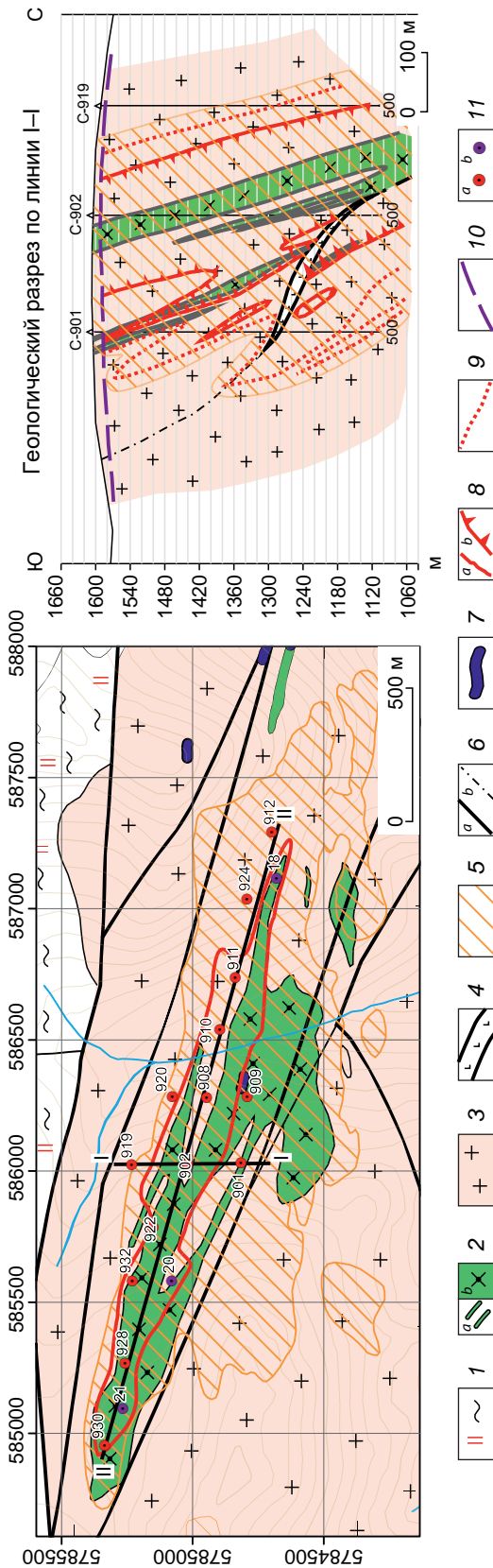


Рис. 1. Схема геологического строения месторождения Кызык-Чадр (по Р. Т. Уссар, 1978 г.; И. А. Бабкин и др., 2019 г.; А. В. Андреев и др., 2021 г. ([1]), с изменениями и дополнениями):

1 – туматгайинская свита ($C_{1,t}$): метаморфизованные вулканогенно-осадочные отложения, нерасчлѐнные, ороговикованные; кызык-чадрский габбро-диорит-гранодиорит-гранитный комплекс ($C_{2-3,kz}$): 2 – кварцевые диорит-порфиры, гранодиорит-порфиры, кварцевые порфиры, нерасчлѐнные (a – отдельные дайки, b – порфировый интрузив, образованный близженными телами порфировых пород различного состава); 3 – среднезернистые граниты, кварцевые диориты, мелко-среднезернистые гранодиориты, нерасчлѐнные; 4 – дайки среднего и основного состава, пострудные; 5 – зоны развития интенсивных гидротермально-метасоматических изменений и сульфидной минерализации; 6 – разрывные нарушения: a – на плане, b – на разрезе; 7 – (золото-сульфидно)-кварцевые жилы; 8 – контур штокверкового меднорудного тела по бортовому содержанию Cu 0,2 %: a – на плане, b – на разрезе; 9 – контур первичного ореола рассеяния меди по содержанию Cu 0,05 %; 10 – граница приповерхностной зоны выщелачивания; 11 – скважины, пройденные: a – в 2017–2019 гг., b – в 1976–1977 гг.

Fig. 1. Schematic geological map of the Kyzzyk-Chadr deposit (modified after R. T. Ussar, 1978; I. A. Babkin et al., 2019; A. V. Andreev et al., 2021 [1]):

1 – Tumattaiga Formation ($C_{1,t}$): metamorphosed volcanosedimentary deposits, undivided, hornified, Kyzykchadr Suite ($C_{2-3,kz}$) of the gabbro-diorite-granodiorite-granite association: 2 – quartz diorite porphyries, granodiorite porphyries, quartz porphyries, undivided (a – individual dikes, b – porphyry intrusion made up of contiguous bodies of porphyry rocks of various compositions); 3 – medium-grained granites, quartz diorites, fine-medium-grained granodiorites, undivided; 4 – dykes of intermediate and basic composition, post-ore; 5 – zones of intense hydrothermal metasomatic alterations and sulfide mineralization; 6 – faults: a – on the plan, b – on the section; 7 – (gold-sulfide)-quartz veins; 8 – outline of a copper stockwork ore body at a cut-off grade of Cu 0.2 %: a – on the plan, b – on the section; 9 – outlines of the primary Cu dispersion halo at the Cu concentration of 0.05 %; 10 – boundary of the near-surface leaching zone; 11 – boreholes drilled: a – in 2017–2019, b – in 1976–1977

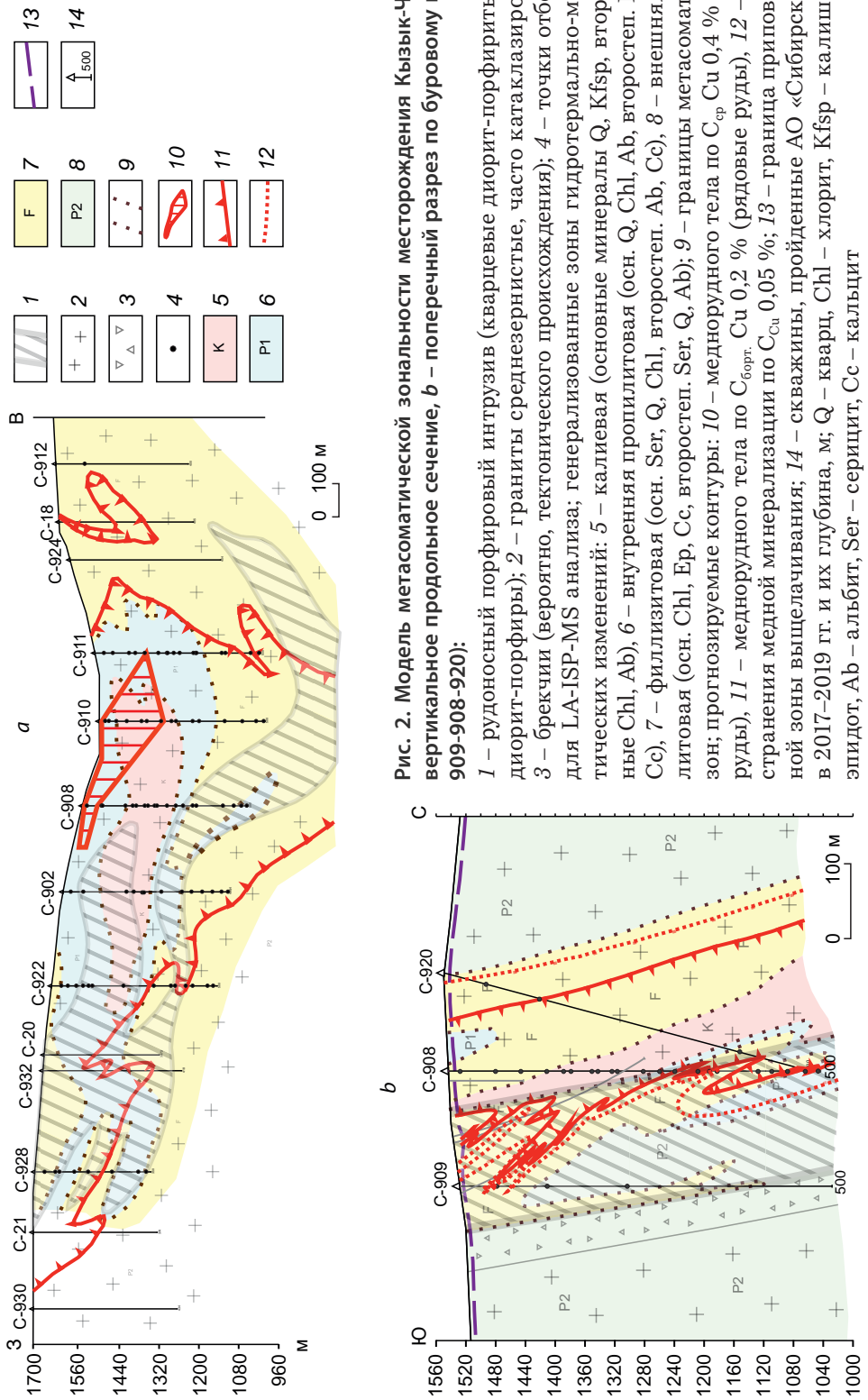


Рис. 2. Модель метасоматической зональности месторождения Кызык-Чадр: (а – вертикальное продольное сечение, б – поперечный разрез по буровому профилю 909-908-920):

1 – рудоносный порфировый интрузив (кварцевые диорит-порфириты, гранодиорит-порфириты); 2 – граниты среднезернистые, часто катаклазированные; 3 – брекчии (вероятно, тектонического происхождения); 4 – точки отбора проб для LA-ISP-MS анализа; генерализованные зоны гидротермально-метасоматических изменений: 5 – калиевая (основные минералы Q, Kfsp, второстепенные Chl, Ab), 6 – внутренняя пропилитовая (осн. Q, Chl, Ab, второстеп. Kfsp, Ser, Cc), 7 – филлизитовая (осн. Ser, Q, Chl, второстеп. Ab, Cc), 8 – внешняя пропилитовая (осн. Chl, Ep, Cc, второстеп. Ser, Q, Ab); 9 – границы метасоматических зон; прогнозируемые контуры: 10 – меднорудного тела по C_{Cu} 0,4 % (богатые руды), 11 – меднорудного тела по C_{Cu} 0,2 % (рядовые руды), 12 – распространения медной минерализации по C_{Cu} 0,05 %; 13 – граница приповерхностной зоны выщелачивания; 14 – скважины, пройденные АО «Сибирское ПГО» в 2017–2019 гг. и их глубина, м; Q – кварц, Chl – хлорит, Kfsp – калишпат, Ep – эпидот, Ab – альбит, Ser – серицит, Cc – кальцит

Fig. 2. Model of the metasomatic zonation of the Kyzzyk-Chadr deposit: (a – vertical longitudinal section, b – transverse section along the drilling profile 909-908-920):

1 – ore-bearing porphyry intrusion (quartz diorite porphyrites, granodiorite porphyrites); 2 – medium-grained granites, often cataclastic; 3 – breccias (probably of tectonic origin); 4 – location of samples subjected to the LA-ISP-MS analysis; generalized zones of hydrothermal-metasomatic alterations: 5 – potassic (main Ser, Q, Chl, Ab), 6 – inner propylitic (main Q, Chl, Ab; minor Kfsp, Ser, Cc), 7 – phyllic (main Ser, Q, Chl, Ep, Cc; minor Ser, Q, Ab); 9 – boundaries of the metasomatic zones; 10 – outlines of the forecasted copper ore body at a cutoff grade of 0.4 % Cu (rich ore), 11 – outlines of the forecasted copper ore body at a cutoff grade of 0.2 % Cu (ordinary ores), 12 – outlines of the forecasted copper mineralization zone at the Cu concentration of 0.05 %; 13 – boundary of the near-surface leaching zone; 14 – boreholes drilled by AO Sibirskoe PGO in 2017–2019 and their depth, m; Q – quartz, Chl – chlorite, Kfsp – potassium feldspar, Ep – epidote, Ab – albite, Ser – sericite, Cc – calcite

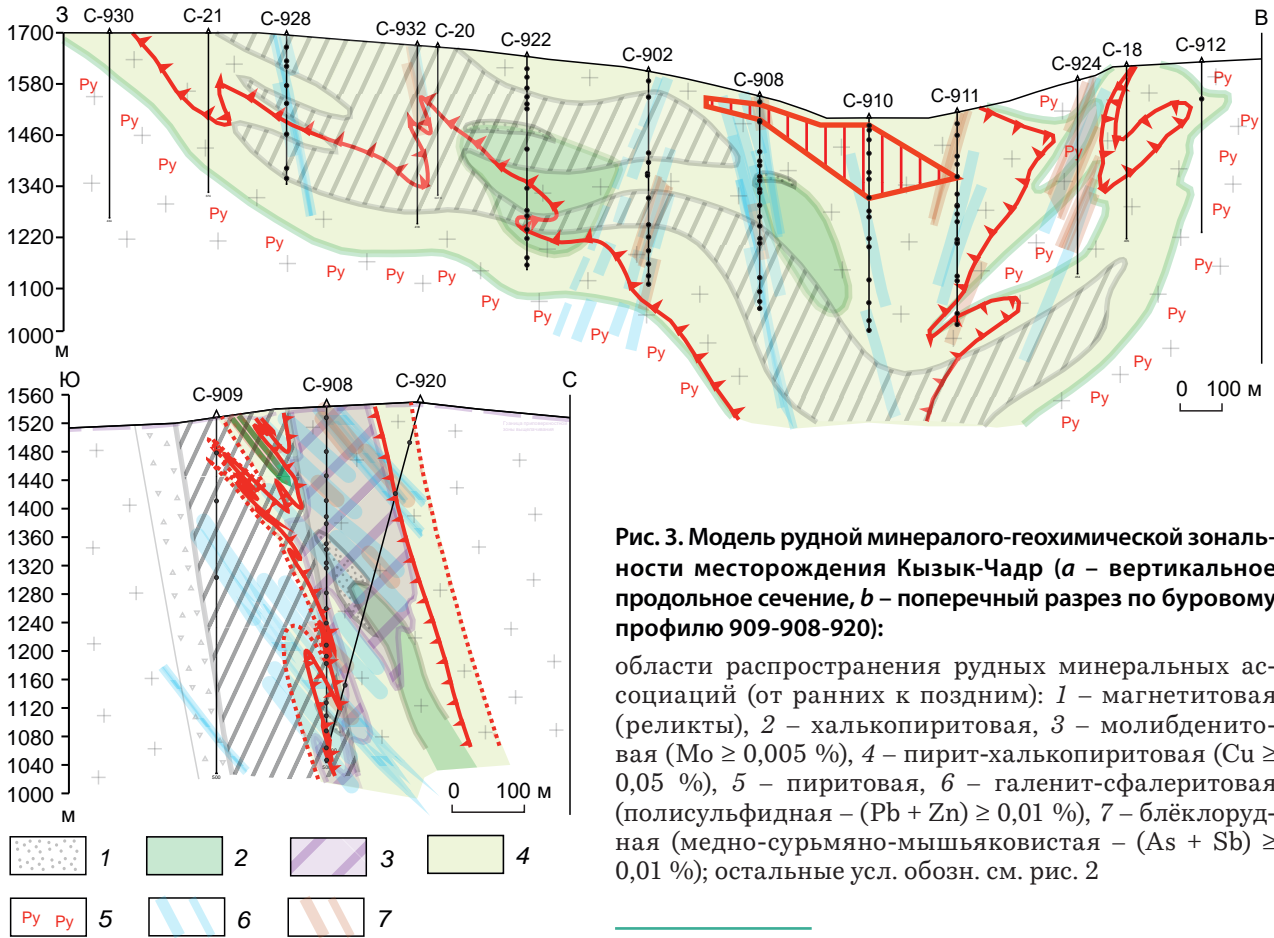


Рис. 3. Модель рудной минералого-геохимической зональности месторождения Кызык-Чадр (а – вертикальное продольное сечение, б – поперечный разрез по буровому профилю 909-908-920):

области распространения рудных минеральных ассоциаций (от ранних к поздним): 1 – магнетитовая (реликты), 2 – халькопиритовая, 3 – молибденитовая ($Mo \geq 0,005 \%$), 4 – пирит-халькопиритовая ($Cu \geq 0,05 \%$), 5 – пиритовая, 6 – галенит-сфалеритовая (полисульфидная – $(Pb + Zn) \geq 0,01 \%$), 7 – блёклорудная (медно-сурьмяно-мышьяковистая – $(As + Sb) \geq 0,01 \%$); остальные усл. обозн. см. рис. 2

Fig. 3. Model of the ore mineralogical-geochemical zonation of the Kyzyk-Chadr deposit: a – vertical longitudinal section, b – cross section along the drilling profile 909-908-920:

zones of ore mineral assemblages (from early to late): 1 – magnetite (relics), 2 – chalcopyrite, 3 – molybdenite ($Mo \geq 0.005 \%$), 4 – pyrite-chalcopyrite ($Cu \geq 0.05 \%$), 5 – pyrite, 6 – galena-sphalerite (polysulfide – $(Pb + Zn) \geq 0.01 \%$), 7 – gray ore (copper-antimony-arsenic – $(As + Sb) \geq 0.01 \%$); for other designations, see fig. 2

том вмещающей интрузив метаморфизованной толщи, преимущественно кислым составом вмещающих оруденение интрузивных пород.

Методы изучения вещественного состава сульфидных минералов медно-порфирового месторождения Кызык-Чадр. Изучение вещественного состава сульфидных минералов месторождения Кызык-Чадр проводилось в несколько этапов.

На первом этапе определялись минеральные ассоциации и при помощи оптического микроскопа в отражённом свете изучались аншлифы для описания текстур сульфидов и минеральных микровключений в них.

На втором этапе проводилось изучение образцов методами рентгеноспектрального микроанализа (EPMA) и сканирующей электронной микроскопии (SEM). На этой стадии был уточнён состав микровключений в сульфидных минералах и количественно оценены основные и второстепенные элементы сульфидов.

Результаты исследований первого и второго этапов представлены в предыдущих информационных геологических отчётах по опытно-методическим работам.

На третьем этапе выполнен анализ вещественного состава сульфидных минералов

(главным образом пирита и халькопирита как основных минералов данной группы в изучаемых образцах) методом LA-ICP-MS в целях количественной оценки содержаний микроэлементов.

Проанализирован следующий набор изотопов: ^{33}S , ^{57}Fe , ^{59}Co , ^{60}Ni , ^{65}Cu , ^{66}Zn , ^{75}As , ^{77}Se , ^{95}Mo , ^{101}Ru , ^{103}Rh , ^{105}Pd , ^{107}Ag , ^{108}Pd , ^{185}Re , ^{189}Os , ^{191}Ir , ^{197}Au , ^{208}Pb и ^{209}Bi . Для измерений был использован квадрупольный масс-спектрометр Thermo XSeries 2 и лазерная приставка New Wave Research UP-213.

Параметры лазера: Nd:YAG, длина волны излучения 213 нм, энергия пучка (fluence) 4,5–6,5 Дж/см², частота повторения импульсов 15Hz, диаметр пятна абляции – 40–60 мкм, несущий газ – He, скорость потока 0,65 л/мин, при абляции профилем скорость 7 мкм/с. Время анализа: 30 с (background, холостой ход) + время анализа (в случае точки 60 с, профиль – длина/скорость) + 30 с (промывка).

Параметры масс-спектрометра: RFPower 1250 Вт, рабочий газ Ar, скорость несущего потока 0,95 л/мин, плазмообразующий поток Ar 15 л/мин, охлаждающий поток Ar 0,9 л/мин. Калибровка масс-спектрометра осуществлялась на калибровочных мультиэлементных растворах.

Для градуировки и расчёта использовались международные стандарты: прессованный сульфид USGSMAS-1 [3] и UQAC-FeS1 (UQAC, Chicoutimi, Canada) прессованный порошок природного сульфида, легированный микроэлементами. Расчёт проводился в программе Iolite с использованием ^{57}Fe в качестве внутреннего стандарта [3].

Для анализа выбирался диаметр лазерного пучка, позволяющий максимально избежать загрязнения пробы вмещающей матрицей, но в то же время получить максимально возможное количество вещества.

Применённая в рамках опытно-методических работ методика изучения вещественного состава является классической для данного типа исследований [3, 19], однако для медно-порфировых месторождений Алтае-Саянской складчатой области такое детальное изучение

вещественного состава сульфидов проводилось впервые.

В ходе выполнения аналитических исследований отобранных образцов методом LA-ICP-MS получены данные по распределению микропримесей перечисленных выше элементов-примесей в зёрнах минерала-хозяина вдоль выбранных микропрофилей лазерного прожига (рис. 4). Для всех образцов рассчитаны также средние значения концентрации каждого элемента-примеси, выполнена статистическая обработка полученных результатов.

Результаты исследований. По итогам выполненных лабораторно-аналитических работ методом LA-ICP-MS получен массив аналитических данных, включающий концентрации элементов-микропримесей в сульфидах (пирит и халькопирит) основных распространённых на месторождении Кызык-Чадр рудных минеральных ассоциаций.

Предварительная обработка полученных результатов позволила выявить основные черты и особенности вариаций количественного состава (геохимического спектра) элементов-микропримесей в изученных рудообразующих сульфидах разных минеральных ассоциаций для месторождения в целом, а также наметить основные тенденции «скрытой» минералогическо-геохимической зональности распределения микропримесей в сульфидных минералах месторождения Кызык-Чадр, т. е. количественных вариаций микропримесного компонента в составе сульфидов в объёме рудного и окорудного пространства месторождения (рудно-магматической системы).

Первое направление соответствует по подходам и решаемым задачам методу PIMS с определением типоморфных особенностей наиболее продуктивных минеральных ассоциаций в целях разбраковки новых рудопроявлений. Второе направление в целом отвечает методу PVFITS с векторным подходом к локальному прогнозированию наиболее продуктивных зон рудно-магматических систем.

Вариации состава элементов-микропримесей в сульфидных минералах основных рудных минеральных ассоциаций месторождения

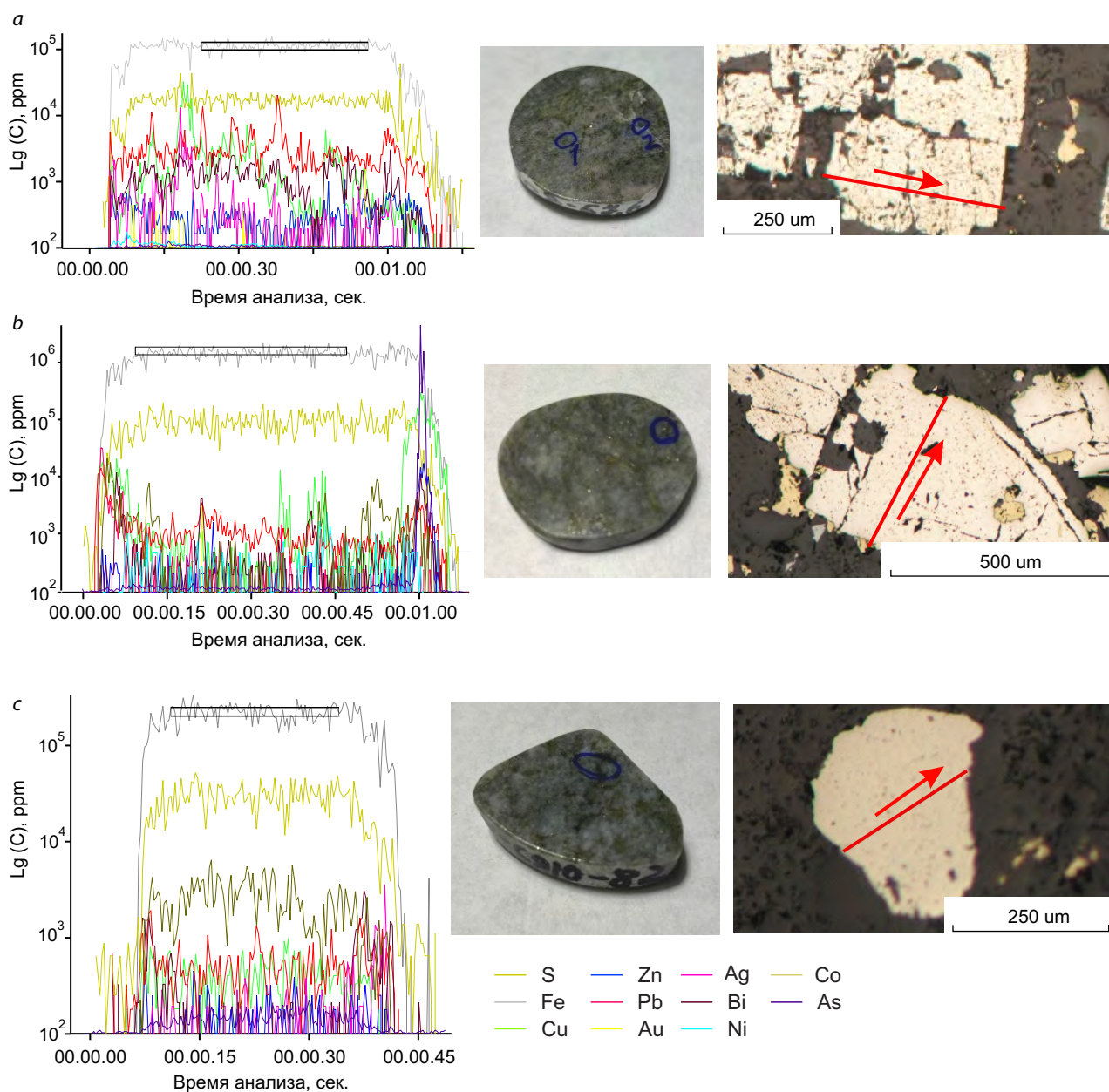


Рис. 4. Анализ микропримесей в пирите методом LA-ICP-MS [3] в образцах: *a* – КЧ-908-57,6, *b* – КЧ-902-369, *c* – КЧ-910-230:

слева – распределение микропримесей по профилю через кристаллически-зональный пирит (прямоугольник – участок для расчёта содержаний микропримесей), справа – изучаемый профиль через зерно пирита (стрелка показывает направление прожига)

Fig. 4. Analysis of trace elements impurities in pyrite using LA-ICP-MS technique: *a* – КЧ-908-57,6, *b* – КЧ-902-369, *c* – КЧ-910-230:

on the left, distribution of microimpurities along the profile through crystalline-zoned pyrite (rectangle is the area for calculating the content of microimpurities); on the right, the profile studied through a pyrite grain (the arrow shows the burning direction)

Кызык-Чадр по данным LA-ICP-MS. На основе выполненной предварительной статистической обработки первичных данных составлены диаграммы, отражающие вариации содержаний микроэлементов в пиритах и халькопиритах (диаграммы размаха) по данным LA-ICP-MS (рис. 5).

Дальнейшая статистическая обработка аналитических данных как по всему массиву, так и по отдельно выделенным рудным минеральным ассоциациям позволила выявить ряд типоморфных геохимических особенностей микропримесного состава этих минеральных ассоциаций месторождения Кызык-Чадр. Полученные результаты отражены в таблицах 1 и 2 и на составленных по ним круговых диаграммах (рис. 6, рис. 7).

В *пиритах* месторождения отмечается высокое содержание таких микроэлементов, как Co (до 4000 ppm) и Cu (> 2000 ppm). В исследуемых образцах присутствует Ni (до 2000 ppm). Практически во всех образцах были обнаружены Zn, As, Se, Ag, Pb и Bi, в отдельных случаях зафиксированы содержания Au и Mo, близкие к минимальному порогу обнаружения для применяемого метода.

Для некоторых рудных минеральных ассоциаций предварительно (с учётом ограниченной изученной выборки) намечены закономерности в распределении отдельных элементов. Так, для халькопиритовой ассоциации характерны пириты с повышенным содержанием (в ppm) Co (до 4000), Ni (до 1000) и Se (до 380). Для блёклорудно-галенит-сфалеритовой и пирит-халькопирит-молибденитовой ассоциаций наблюдается похожая картина в распределении микроэлементов.

Кроме того, среди пиритов данных минеральных ассоциаций фиксируются образцы с содержаниями Au (до 6 ppm в пирит-халькопирит-молибденитовой), а также достаточно высокие содержания Ag (100 ppm и более) и Pb (более 1000 ppm).

Для пирит-магнетитовой ассоциации характерны наиболее низкие значения содержаний микроэлементов в пиритах. Исключение составляет Bi (до 19 ppm). Однако данные зна-

чения не выделяются среди пиритов других минеральных ассоциаций.

Для ряда элементов (Zn, Bi и др.) изменения в распределении содержаний в зависимости от рудных минеральных ассоциаций не наблюдаются.

В *халькопиритах* месторождения в целом по сравнению с пиритами отмечаются намного более низкие содержания Co (не более 300 ppm), а Mo, наоборот, присутствует в значительно больших количествах (до 16 ppm).

Как и в случае с пиритами, для халькопиритов пирит-магнетитовой ассоциации характерны наименьшие значения содержаний элементов-примесей в целом, что позволяет сделать вывод о том, что сульфидные минералы, относящиеся к пирит-магнетитовой ассоциации, являются наиболее «чистыми» с точки зрения содержаний элементов-примесей (микроэлементов).

По сравнению с пиритами в халькопиритах отмечаются более высокие содержания серебра и цинка (до 8000 и 250 ppm соответственно). При этом для халькопиритов характерны повышенные значения содержания микроэлементов в целом именно для образцов, относящихся к блёклорудно-галенит-сфалеритовой, а не халькопиритовой, ассоциации, как в случае с пиритами. Халькопириты халькопиритовой ассоциации, наоборот, характеризуются относительно небольшими значениями содержаний микроэлементов, немного превышая по данному показателю халькопириты пирит-магнетитовой ассоциации.

Содержание золота в халькопиритах значительно ниже, чем в пиритах. Большинство исследуемых образцов характеризовалось околонулевыми значениями содержания данного элемента. Максимальное значение содержания золота составило 2 ppm (пирит-халькопирит-молибденитовая ассоциация).

Элементы «скрытой» минералого-геохимической зональности распределения микропримесей в сульфидных минералах месторождения Кызык-Чадр. Особое внимание при проведении исследований в отчётный период было уделено изучению закономерностей про-

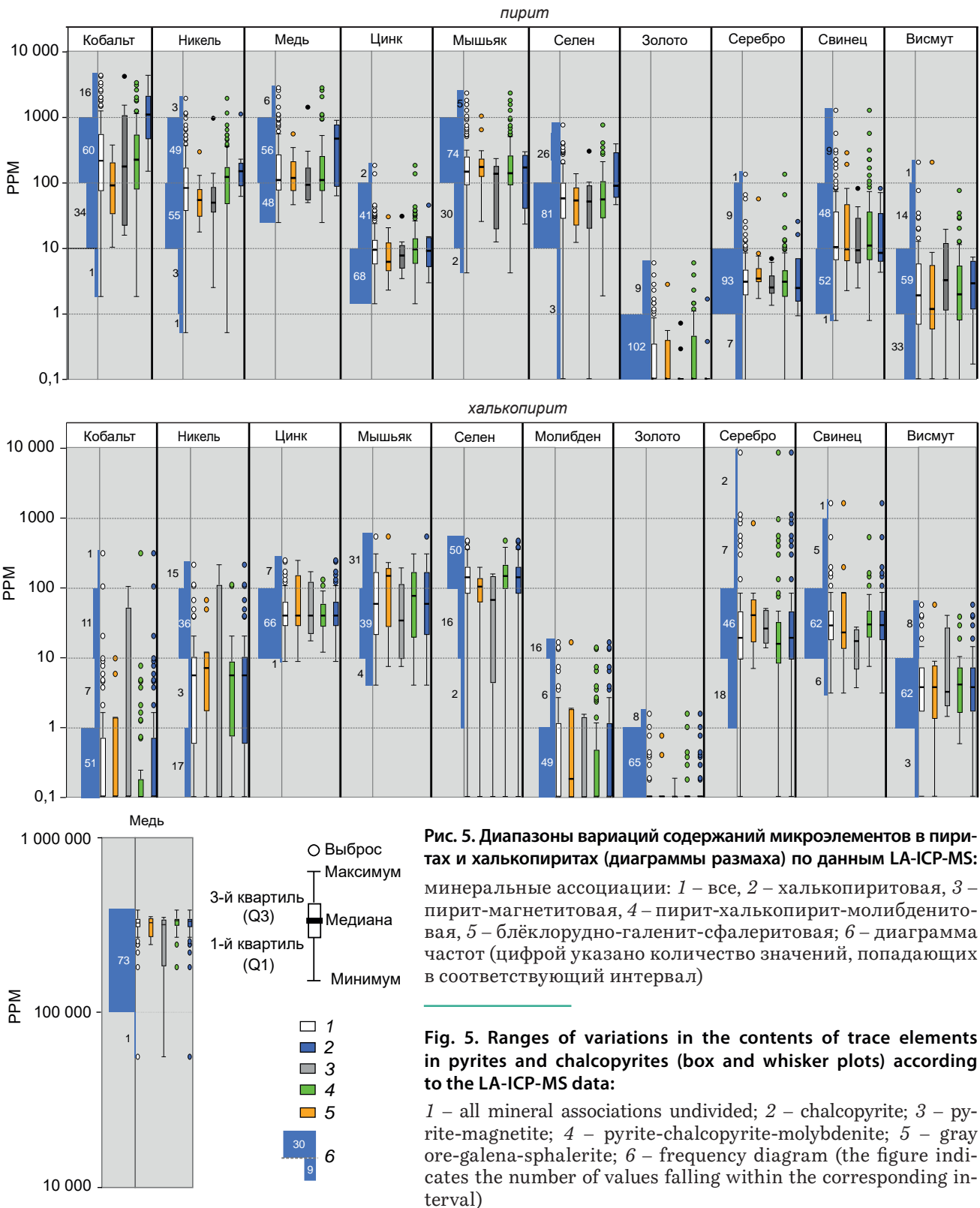
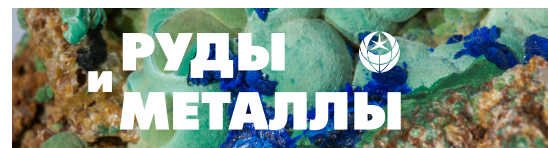


Табл. 1. Сводные статистические данные о распределении содержаний элементов-примесей (ppm) в пиритах основных рудных минеральных ассоциаций месторождения Кызык-Чадр по данным LA-ICP-MS

Table 1. Summary statistical data on the distribution of trace element contents (in ppm) in pyrites of the main ore mineral assemblages of the Kyzyk-Chadr deposit according to LA-ICP-MS data

Элемент	S	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Ag	Au	Pb	Bi
<i>Все ассоциации</i>												
Число замеров	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111
Число замеров с Q1 по Q3	56	55	56	55	47	56	55	55	57	55	50	48
Среднее арифметическое, ppm	549 626	529	171	1512	14	246	88	3	6	0	48	7
Медиана, ppm	543 720	213	82	108	9	144	56	0	3	0	10	2
Q1, ppm	510 270	73	40	76	6	91	28	0	2	0	7	1
Q3, ppm	582 360	543	167	262	13	245	98	0	5	0	34	6
min, ppm	396 000	2	1	24	1	4	0	0	0	0	1	0
max, ppm	819 260	4324	1922	137 700	181	2284	741	190	132	6	1242	200
<i>Блэклорудно-галенит-сфалеритовая</i>												
Число замеров	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
Число замеров с Q1 по Q3	8	8	8	8	8	8	8	8	9	8	7	4
Среднее арифметическое, ppm	522 389	128	70	166	9	240	55	4	7	0	45	15
Медиана, ppm	523 890	89	54	117	6	170	52	0	3	0	9	1
Q1, ppm	503 302	43	33	84	5	125	24	0	3	0	7	1
Q3, ppm	534 980	182	75	175	10	210	73	0	5	0	41	5
min, ppm	472 330	10	17	46	2	25	12	0	2	0	2	0
max, ppm	609 040	368	293	544	30	1012	135	69	55	3	280	200
<i>Пирит-магнетитовая</i>												
Число замеров	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Число замеров с Q1 по Q3	4	4	4	4	5	4	4	4	5	4	4	5
Среднее арифметическое, ppm	577 422	741	142	232	10	116	71	0	3	0	20	6
Медиана, ppm	547 530	174	49	90	8	135	50	0	2	0	9	3
Q1, ppm	517 465	35	36	55	6	39	22	0	2	0	7	1
Q3, ppm	609 809	783	67	120	11	158	82	0	3	0	21	11
min, ppm	451 720	16	2	49	3	12	0	0	1	0	2	0
max, ppm	819 260	4124	947	1394	30	228	297	0	7	1	80	19
<i>Пирит-халькопирит-молибденитовая</i>												
Число замеров	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
Число замеров с Q1 по Q3	38	37	37	37	35	38	37	37	34	37	34	27
Среднее арифметическое, ppm	547 005	471	189	2112	16	277	89	3	6	0	55	5
Медиана, ppm	548 020	221	121	108	9	136	54	0	3	0	11	2



Окончание таблицы 1

Элемент	S	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Ag	Au	Pb	Bi
Q1, ppm	507 840	80	47	76	6	91	28	0	2	0	7	1
Q3, ppm	582 360	522	171	246	14	257	100	0	5	0	34	5
min, ppm	396 000	2	1	24	1	4	2	0	0	0	1	0
max, ppm	670 220	3335	1922	137 700	181	2284	741	190	132	6	1242	74
<i>Халькопиритовая</i>												
Число замеров	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Число замеров с Q1 по Q3	4	4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	5
Среднее арифметическое, ppm	585 062	1395	228	448	12	159	148	0	6	0	22	3
Медиана, ppm	581 440	1082	146	464	9	166	88	0	2	0	8	3
Q1, ppm	543 277	577	98	115	6	58	66	0	2	0	7	1
Q3, ppm	633 728	1844	183	737	14	246	238	0	4	0	20	6
min, ppm	494 500	148	61	62	3	23	45	0	1	0	4	0
max, ppm	674 907	4324	1090	879	45	293	380	2	25	2	80	7

Табл. 2. Сводные статистические данные о распределении содержаний элементов-примесей (ppm) в халькопиритах основных рудных минеральных ассоциаций месторождения Кызык-Чадр по данным LA-ICP-MS

Table 2. Summary statistical data on the distribution of trace element contents (ppm) in chalcopyrites of the main ore mineral assemblages of the Kyzyk-Chadr deposit according to LA-ICP-MS data

Элемент	S	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Ag	Au	Pb	Bi
<i>Все ассоциации</i>												
Число замеров	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74
Число замеров с Q1 по Q3	36	10	40	36	36	37	36	6	36	36	37	32
Среднее арифметическое, ppm	497 164	7	13	319 484	53	100	146	1	195	0	65	6
Медиана, ppm	480 000	0	5	331 200	39	58	138	0	19	0	28	4
Q1, ppm	432 900	0	1	311 100	28	22	84	0	10	0	17	2
Q3, ppm	556 283	1	10	343 752	61	163	192	1	44	0	44	7
max, ppm	785 400	304	210	386 100	243	531	459	16	8370	2	1590	55
min, ppm	325 552	0	0	55 800	9	4	0	0	0	0	3	0
<i>Блёклорудно-галенит-сфалеритовая</i>												
Число замеров	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Число замеров с Q1 по Q3	5	5	5	5	5	2	5	5	5	5	5	6
Среднее арифметическое, ppm	435 714	2	14	311 784	83	141	96	2	107	0	189	8
Медиана, ppm	435 000	0	7	327 000	39	144	102	0	40	0	22	4
Q1, ppm	407 251	0	3	280 620	31	28	63	0	17	0	14	1
Q3, ppm	459 600	1	10	343 671	117	183	129	2	64	0	82	7

Окончание таблицы 2

Элемент	S	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Ag	Au	Pb	Bi
max, ppm	558 000	10	66	352 948	243	531	190	16	816	1	1590	55
min, ppm	325 552	0	0	243 900	9	7	0	0	7	0	3	0
<i>Пирит-магнетитовая</i>												
Число замеров	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Число замеров с Q1 по Q3	3	3	3	3	2	1	3	2	2	2	2	2
Среднее арифметическое, ppm	447 900	20	43	273 120	64	55	73	1	30	0	16	12
Медиана, ppm	390 000	0	0	318 900	39	33	66	0	25	0	17	3
Q1, ppm	388 500	0	0	309 000	26	12	8	0	17	0	10	3
Q3, ppm	519 000	0	7	332 400	71	36	138	1	46	0	23	14
max, ppm	600 000	102	210	349 500	165	186	153	2	49	0	27	39
min, ppm	342 000	0	0	55 800	17	7	0	0	14	0	4	1
<i>Пирит-халькопирит-молибденитовая</i>												
Число замеров	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49
Число замеров с Q1 по Q3	25	25	25	25	22	24	24	24	23	24	25	21
Среднее арифметическое, ppm	499 439	7	10	325 924	46	100	154	1	241	0	47	6
Медиана, ppm	480 000	0	5	336 000	39	74	144	0	15	0	29	4
Q1, ppm	434 700	0	1	312 300	28	20	96	0	8	0	19	2
Q3, ppm	555 000	0	8	343 936	57	163	204	0	29	0	42	7
max, ppm	687 000	304	108	386 100	128	300	459	14	8370	2	516	37
min, ppm	380 117	0	0	181 830	12	4	0	0	0	0	7	1
<i>Халькопиритовая</i>												
Число замеров	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Число замеров с Q1 по Q3	5	3	4	5	4	4	5	4	4	4	4	4
Среднее арифметическое, ppm	587 250	3	12	319 593	51	76	203	0	143	0	35	4
Медиана, ppm	585 000	0	5	327 030	38	37	210	0	27	0	42	3
Q1, ppm	534 600	0	1	319 800	34	31	90	0	8	0	24	2
Q3, ppm	620 400	1	11	339 240	66	96	281	1	36	0	44	5
max, ppm	785 400	20	39	363 000	117	270	446	2	1086	0	52	12
min, ppm	486 000	0	0	220 500	18	11	0	0	3	0	13	2

пространственного распределения примесей (микроэлементов) в пиритах и халькопиритах месторождения в целях выявления элементов «скрытой» минералого-геохимической зональности. Обработка пространственных данных, интерполяция значений и оформление про-

изводились с использованием программного обеспечения Surfer. С помощью этой программы отстраивалось распределение концентраций элементов-микропримесей в пиритах и халькопиритах, а также их соотношений в вертикальных сечениях вдоль продольного разре-

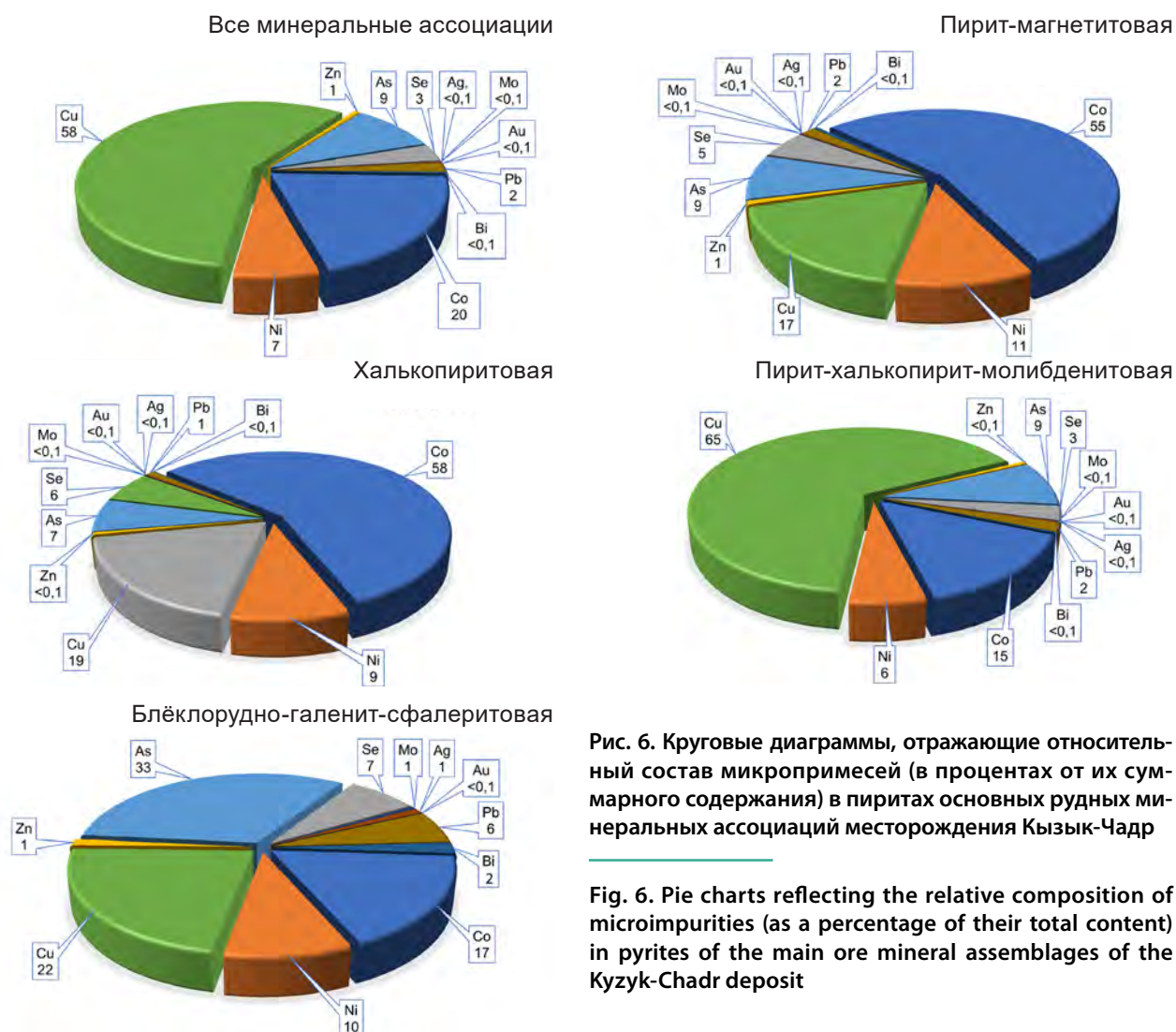
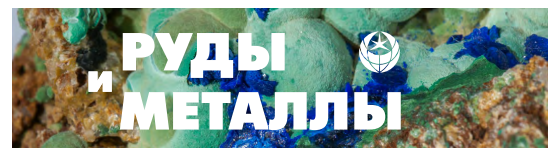


Рис. 6. Круговые диаграммы, отражающие относительный состав микропримесей (в процентах от их суммарного содержания) в пиритах основных рудных минеральных ассоциаций месторождения Кызык-Чадр

Fig. 6. Pie charts reflecting the relative composition of microimpurities (as a percentage of their total content) in pyrites of the main ore mineral assemblages of the Kyzyk-Chadr deposit

за через месторождение. Графическое отображение результатов проведённых аналитических работ представлено на разрезах (рис. 8–11).

Интерполяция данных на разрезах производилась в автоматическом режиме путём построения цифровых моделей (grid) геостатистическим методом кригинга (kriging). Размер ячеек создаваемых моделей определялся исходя из параметров исходной сети скважин (половина межскважинного расстояния). Для продольного разреза данная величина составила 100 м при среднем расстоянии между скважинами 200 м. Размер ячейки по вертикали – 20 м (усреднённое расстояние половины интервала между образцами). Таким образом, размеры ячеек цифровой модели, являющейся

основой для продольного разреза, составил 100×20 м, для поперечного – 50×20 м.

Также при выполнении интерполяции были использованы параметры анизотропии исходя из представлений об элементах залегания прогнозируемой минерализованной зоны и порфирирового интрузива. Так, угол анизотропии составил 100° для поперечного и 140° для продольного разрезов. Параметр соотношения (ratio) принимался равным пяти в обоих случаях. При выполнении интерполяции применялась процедура логарифмирования для корректного построения разрезов с большим разбросом значений переменных (содержаний микроэлементов в сульфидных минералах – пиритах и халькопиритах).

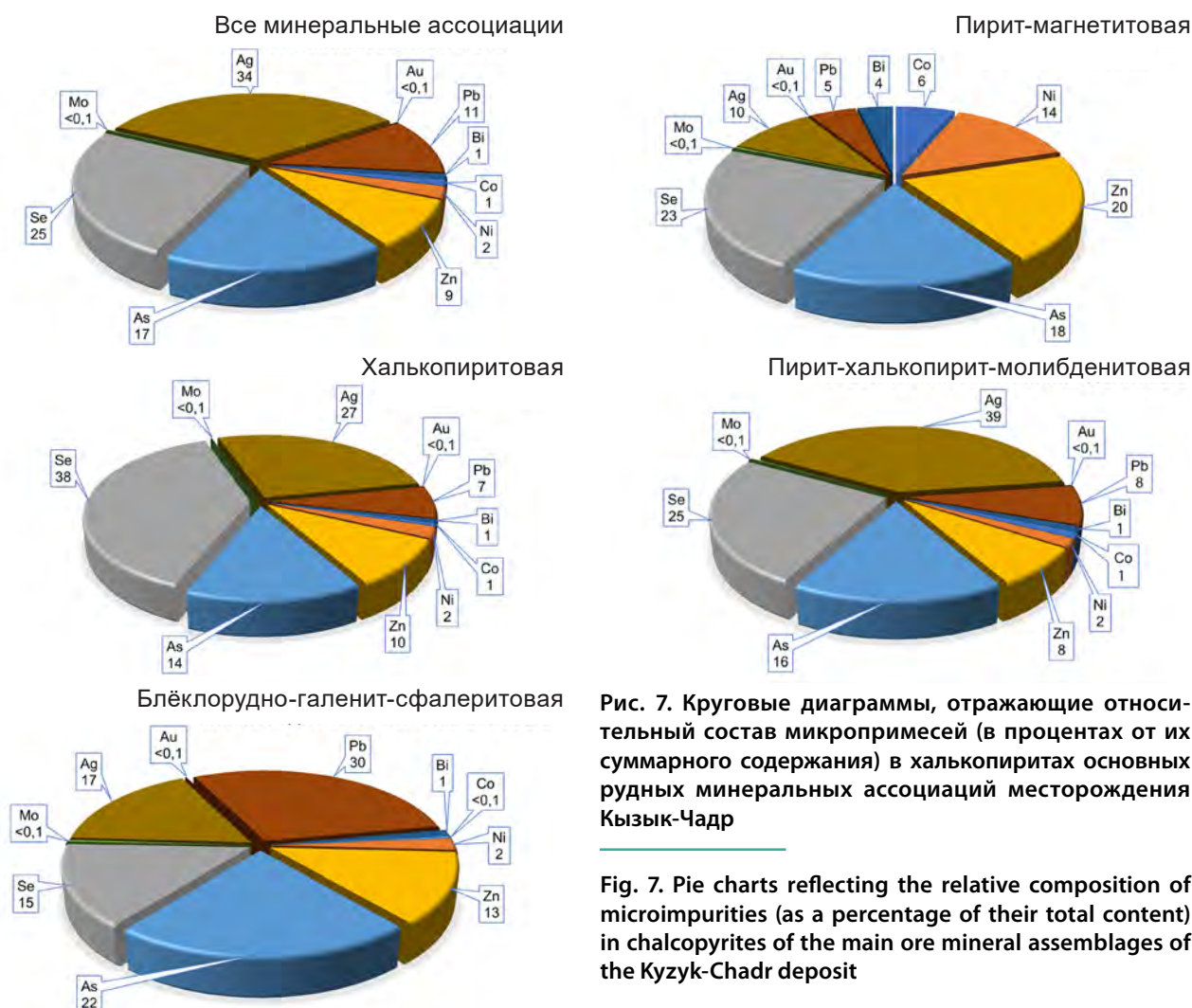


Рис. 7. Круговые диаграммы, отражающие относительный состав микропримесей (в процентах от их суммарного содержания) в халькопиритах основных рудных минеральных ассоциаций месторождения Кызык-Чадр

Fig. 7. Pie charts reflecting the relative composition of microimpurities (as a percentage of their total content) in chalcopyrites of the main ore mineral assemblages of the Kyzyk-Chadr deposit

Пространственное распределение элементов-примесей в пиритах месторождения Кызык-Чадр. Одним из наиболее распространённых и информативных микроэлементов в пирите рудных месторождений является кобальт [2, 19, 21]. В целом для пиритов месторождения Кызык-Чадр характерно увеличение содержания Co в пиритах (до 1000 и более ppm) на глубоких горизонтах и флангах рудных тел, преимущественно в эндоконтактных частях порфирового интрузива (см. рис. 8). Относительное увеличение Co (от 50 до 200 ppm), заметное на продольном разрезе в осевой части рудного тела, также связано с приконтактной зоной апофизы порфирового интрузива (за плоскостью разреза). Наименьшими зна-

чениями содержания Co характеризуются пириты, относящиеся к блёклорудно-галенит-сфалеритовой минеральной ассоциации (менее 100 ppm).

Максимальные значения содержания никеля в пиритах месторождения Кызык-Чадр (до 1000 ppm и более) тяготеют к флангам и подрудным частям рудных тел, преимущественно в экзоконтактах порфировых интрузивов (см. рис. 8). Фоновые значения содержания никеля в пирите составляют 100–300 ppm.

Картина распределения содержания меди в пиритах отличается высокой контрастностью. Максимумы (до 800–1000 ppm) фиксируются преимущественно в осевых частях рудного тела и локализируются в экзоконтактах апофиз

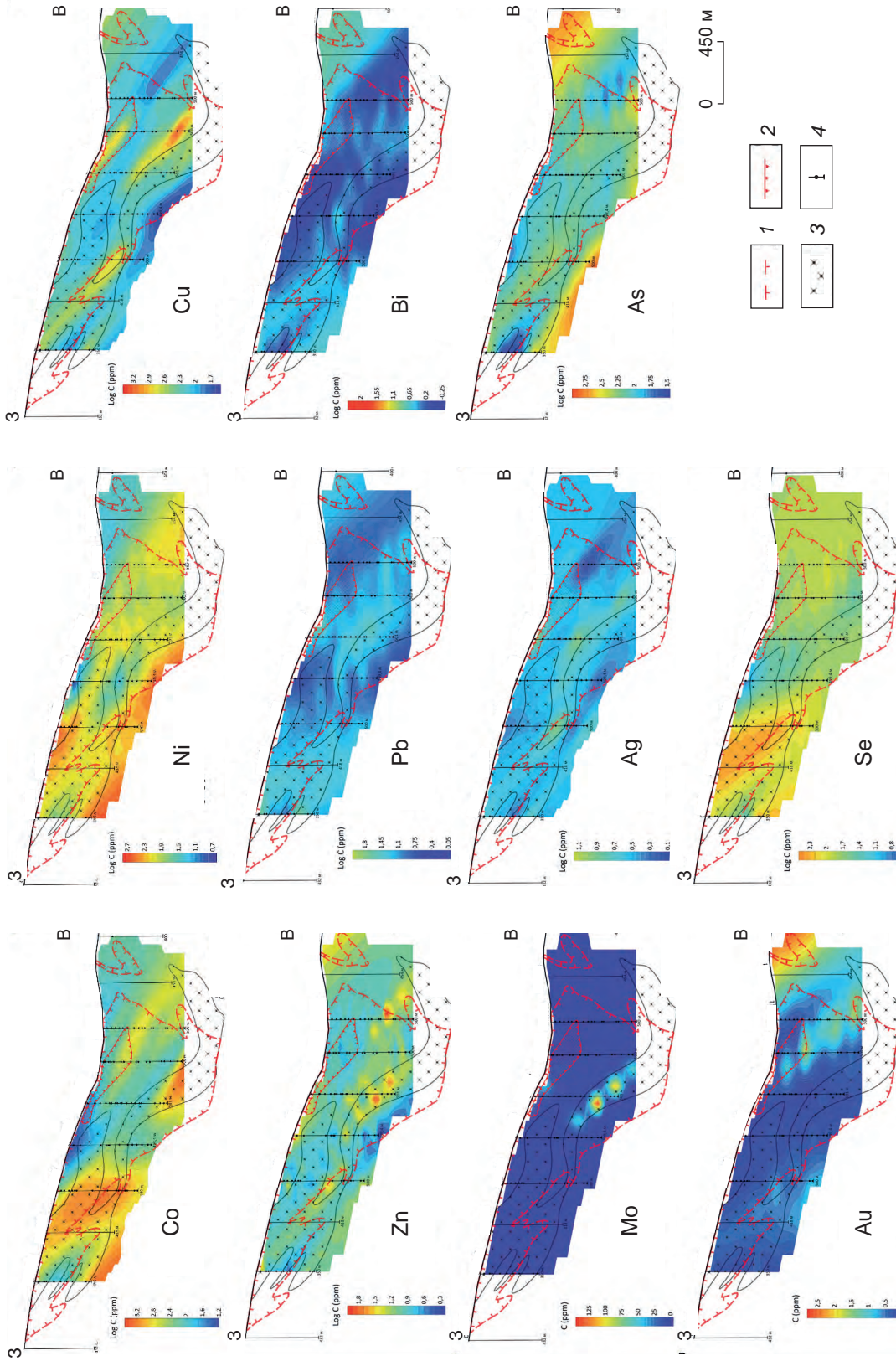


Рис. 8. Продольный разрез с элементами «скрытой» минералого-геохимической зональности в пиритах месторождения Кызык-Чадр: прогнозируемый по итогам ГР 2016–2018 гг. контур меднорудного тела: 1 – по $C_{\text{борг. Cu 0,2 \%}}$, 2 – по $C_{\text{борг. Cu 0,4 \%}}$; 3 – рудный порфировый интрузив; 4 – скважины и точки отбора проб

Fig. 8. Longitudinal section with elements of "hidden" mineralogical-geochemical zonality in pyrites of the Kyzzyk-Chadr deposit: forecasted copper ore body established by the 2016–2018 exploration project: 1 – at a cut-off grade of 0.2 % Cu, 2 – at a cutoff grade of 0.4 % Cu; 3 – ore-bearing porphyry intrusion; 4 – boreholes with sampling points

порфирированного интрузива. Максимумы обрамляются зонами минимумов (менее 100 ppm), что обуславливает полицентрический рисунок зональности этого параметра в продольном сечении месторождения (см. рис. 8). Максимальные содержания меди отмечаются в пиритах халькопиритовой и блёклорудно-галенит-сфалеритовой минеральных ассоциаций, в то время как для пиритов молибденит-пирит-халькопиритовой ассоциации часто характерны низкие и минимальные концентрации меди.

На месторождении Кызык-Чадр пириты с повышенными концентрациями *цинка* (до 130 ppm) тяготеют к флангам рудного тела и эндоконтактам порфирированного интрузива. Минимальные содержания *цинка* (менее 10 ppm) отмечаются в пиритах подрудной зоны (см. рис. 8).

Распределение *свинца* в пиритах характеризуется в целом низкими концентрациями и малой контрастностью, изредка превышая 100 ppm на фоне 10–50 ppm. Зональность по *свинцу* в пиритах близка зональности по *цинку*. Такие образцы, как правило, приурочены к эндоконтактовой зоне порфирированного интрузива и флангам рудного тела (см. рис. 8).

Для *висмута* картина распределения примесей в пирите практически повторяет картину распределения *свинца* при содержаниях до 10 ppm (см. рис. 8). Чёткая связь между содержаниями *висмута* и принадлежностью пиритов к определённым минеральным ассоциациям в пределах изучаемого месторождения не фиксируется.

Для *молибдена* характерно преобладание очень низких значений содержаний в пирите (менее 1 ppm). Максимумы содержаний фиксируются в единичных пробах, отобранных на глубоких горизонтах порфирированного интрузива, и составляют 1–5 ppm. Также отмечается увеличение содержания *молибдена* в пирите в пределах наиболее богатой части прогнозируемого рудного тела (до 0,5 ppm) (см. рис. 8).

Для *серебра* в пирите характерно увеличение содержаний (до 50 и более ppm, в отдельных пробах до 100 ppm при фоновых концентрациях 2–3 ppm) в осевой части рудного

тела, всячем экзоконтакте порфирированного интрузива (см. рис. 8). Повышение концентрации *серебра* в пирите в рудном теле говорит о возможном наличии положительной корреляционной связи между данным элементом и медью, что ранее было выявлено и описано для медно-порфирированного месторождения Рио-Бланко [13].

Содержание *золота* в пиритах весьма низкое (менее 2 ppm). Лишь в отдельных образцах пирита фиксируются значения более 2 ppm. Относительное повышение концентраций отмечается в пределах крутопадающих зон в западной и восточной частях продольного разреза, которые тяготеют к участкам увеличения мощности рудного тела (см. рис. 8). Возможно, эти зоны маркируют долгоживущие рудоподводящие зоны.

Для *мышьяка* типичны максимумы содержаний (500–1000 ppm) в подрудной зоне и периферических сателлитных рудных телах. Относительно повышенные концентрации *мышьяка* в пиритах (до 500 ppm на фоне 100–200 ppm) также характерны для флангов рудного тела (см. рис. 8).

Для *селена* характерны максимумы содержаний в пиритах (200–300 ppm, в отдельных пробах более 700 ppm при фоновых 20–50 ppm) в западной и восточной частях рудной зоны, в участках увеличения мощности рудного тела (см. рис. 8). Такое распределение напоминает тенденцию распределения примеси *золота* в пиритах месторождения.

При проведении опытно-методических работ помимо изучения пространственного распределения содержаний отдельных элементов-примесей в пирите было также проанализировано пространственное распределение *отношений содержаний* некоторых микроэлементов в пирите [12].

Пространственное распределение отношения *Co/Ni* в пиритах маркирует своими максимумами (значения более 10) порфирированный интрузив (см. рис. 9). Максимальные значения отношения *Ag/Co* приурочены к центральной, наиболее богатой части рудного тела, в том числе к обогащённой медью зоне окисления (см. рис. 9). Максимумы отношения *Co/Cu* в

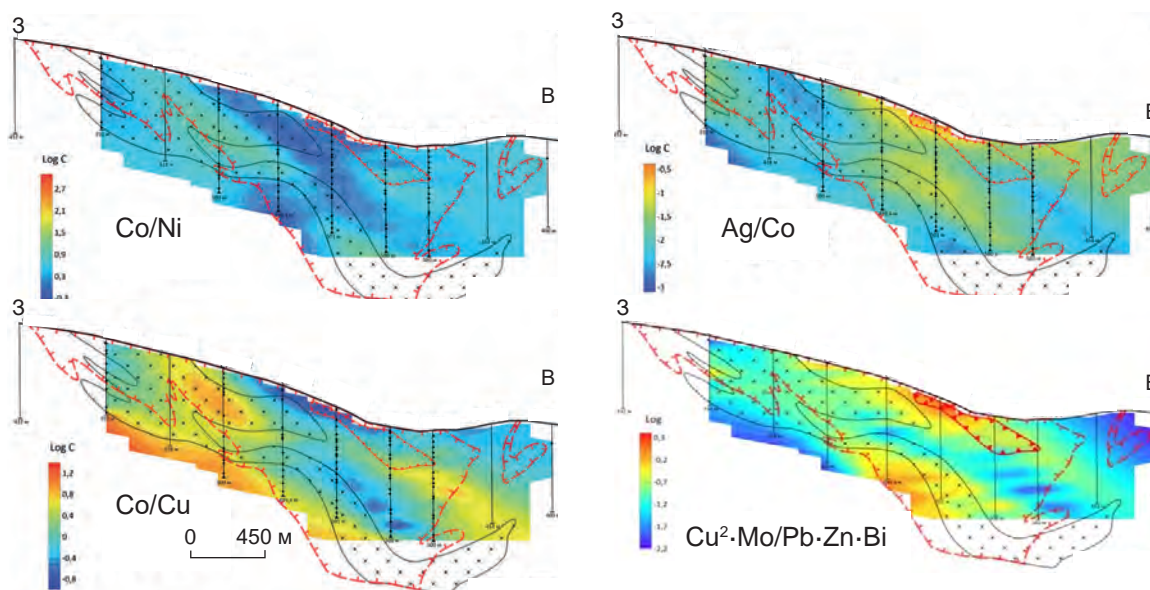


Рис. 9. Продольный разрез с элементами «скрытой» минералого-геохимической зональности пространственного распределения отношений содержаний некоторых микроэлементов в пиритах месторождения Кызык-Чадр: усл. обозн. см. рис. 8

Fig. 9. Longitudinal section along the Kyzыk-Chadr deposit with elements of the “hidden” mineralogical-geochemical zonality in spatial distribution of the ratios of some trace elements in pyrites:

For legend, see fig. 8

пиритах отчётливо тяготеют к фланговым и подрудным зонам месторождения (см. рис. 9). Максимумы соотношения $\text{Cu}^2\cdot\text{Mo}/\text{Pb}\cdot\text{Zn}\cdot\text{Bi}$ (составляющие порядка 1000, единичные до 10 000) в пиритах, так же, как и Ag/Co , приурочены к наиболее обогащённой медью зоне окисления и, вероятно, маркируют предполагаемое, не вскрытое скважинами оруденение на глубине.

Таким образом, можно заключить, что вариации содержаний микроэлементов в пиритах связаны с положением в пространстве главных элементов геологического строения месторождения – морфологией порфирового интрузива и его контактов и контурами рудных тел (определёнными по содержанию Cu 0,2 %) и их обогащённых участков (по содержанию Cu 0,5 %).

Порфировый интрузив маркируется максимумами концентраций в пирите Se , Bi , Zn , Mo , а также отношений Co/Ni . Для краевых частей порфирового интрузива характерны максимумы содержаний в пиритах Ag , Co , Cu ,

Zn . Для наиболее богатой части рудного тела типично увеличение содержания в пиритах Ag , Cu , Co , а также увеличение значений отношения Ag/Co . Для окисленных частей минерализованной зоны свойственны повышенные содержания в пиритах Bi и Zn . За пределами прогнозируемой минерализованной зоны максимальное содержание в пирите имеют As и Ni , отношение Co/Cu . Максимумы примесей Au в пиритах тяготеют к участкам увеличения мощности рудного тела и, возможно, маркируют долгоживущие рудоподводящие каналы.

Пространственное распределение элементов-примесей в халькопиритах месторождения Кызык-Чадр. Характер пространственного распределения концентраций элементов-примесей в халькопиритах месторождения Кызык-Чадр значительно отличается от установленного для пиритов.

Распределение концентраций кобальта в халькопиритах довольно контрастно, максимумы (10–20 ppm) тяготеют к эндо- и экзокон-

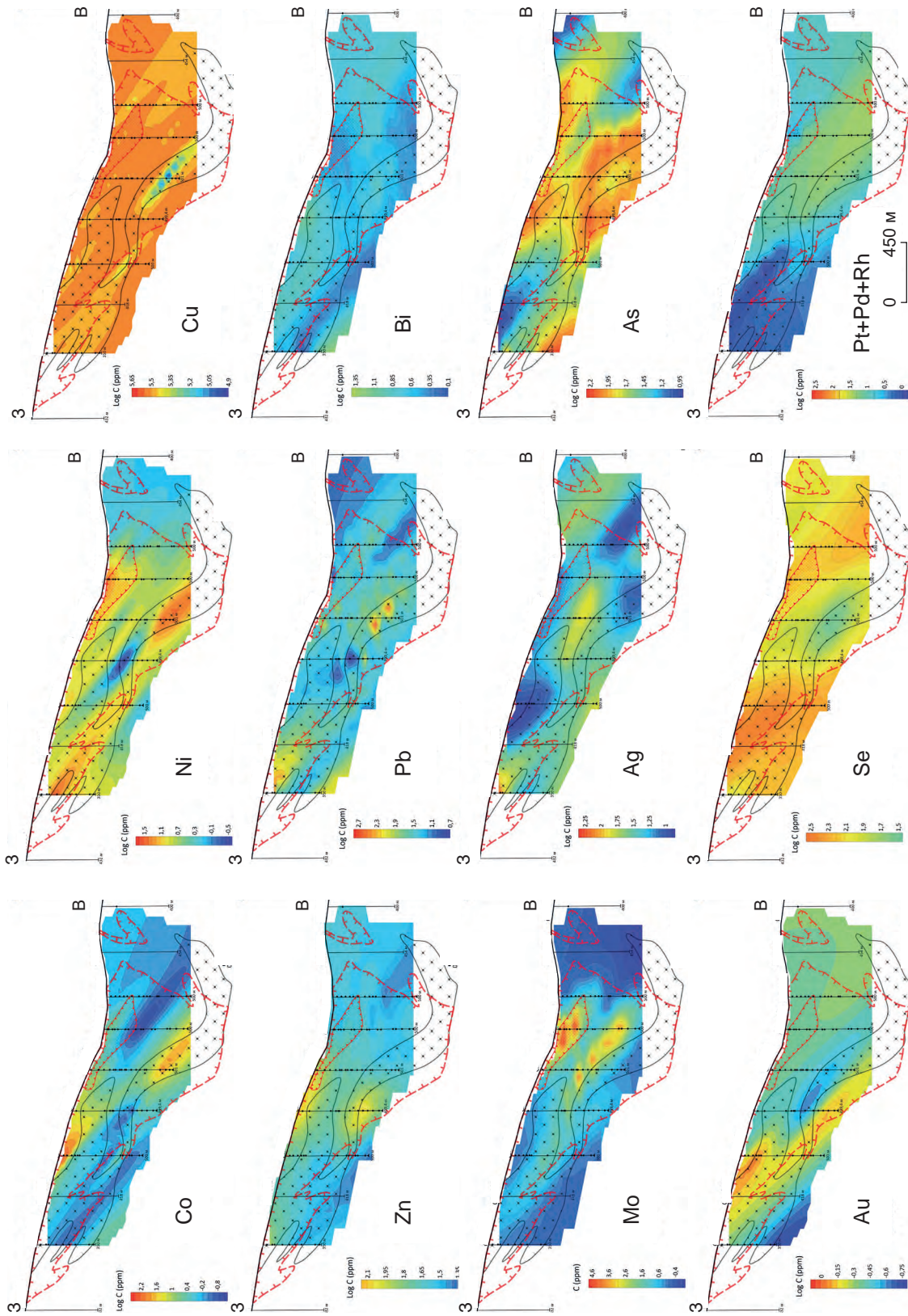
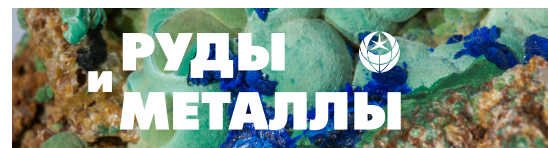


Рис. 10. Продольный разрез с элементами «скрытой» минералого-геохимической зональности в пиритах месторождения Кызык-Чадр: усл. обозн. см. рис. 8

Fig. 10. Longitudinal section along the Kuzyk-Chadr deposit with elements of the "hidden" mineralogical-geochemical zonality in pyrites: For legend, see fig. 8



тактам порфиروهого интрузива на среднем рудном уровне (см. рис. 10).

Высокие содержания *никеля* в халькопиритах (до 100 ppm) распространены весьма широко в пределах рудного тела и рудоносного порфиروهого интрузива (см. рис. 10). Низкие концентрации фиксируются на флангах, в подрудной и осевой зонах рудного тела.

Для концентрации *меди* в халькопиритах удалось выявить образцы с пониженными относительно фонового (350 000 ppm) значениями (до 300 000 ppm). Такие образцы отобраны из средних и глубоких частей порфиروهого интрузива (см. рис. 10), которые также характеризуются повышенными содержаниями Co, Ni, Pb и ряда других микроэлементов

Цинк в халькопиритах характеризуется приуроченностью максимумов (50–100 ppm) к центральным (окисленным?) и нижнерудным частям рудного тела (см. рис. 10).

Картина распределения содержаний *свинца* в халькопиритах в значительной степени отличается от распределения содержаний цинка. Так, практически все максимумы содержаний свинца в халькопиритах (100 и более ppm) приурочены к порфиروهому интрузиву. Отдельные ураганские содержания превышают 1000 ppm. Такие зоны с экстремально высокими содержаниями свинца в халькопирите соответствуют участкам порфиروهого интрузива со сниженными значениями содержаний меди в халькопиритах. Фоновые значения содержания свинца в пределах месторождения составляют 25–50 ppm (см. рис. 10).

Висмут в халькопиритах в пределах всего месторождения распределён относительно равномерно. Значения выше 10 ppm на фоне 3–5 ppm отмечаются преимущественно на флангах рудного тела (см. рис. 10).

Максимумы содержаний *молибдена* в халькопиритах отчётливо приурочены к двум зонам: верхнему контакту порфиروهого интрузива (до 13 ppm) и наиболее богатой части прогнозируемого рудного тела (до 16 ppm). В других частях месторождения молибден распределён в халькопирите весьма равномерно и отличается пониженными значениями (менее 1 ppm) (см. рис. 10).

Для *серебра* в халькопиритах характерна приуроченность максимумов (до 1000 ppm и более) к центральной, фланговым и подрудной частям рудного тела (см. рис. 10). Фоновые значения содержаний серебра в халькопиритах составляют, как правило, менее 20 ppm.

Золото в халькопиритах распределено весьма неравномерно. Максимумы содержаний (до 1 ppm) приурочены к крутопадающей зоне в западной части рудного тела, в участке градиентного увеличения его мощности (см. рис. 10). В пределах большей части месторождения значения содержаний золота в халькопиритах весьма малы, как правило, ниже предела обнаружения (0,1 ppm и менее). Стоит отметить, что для многих месторождений медно-порфиروهого семейства золото приурочено именно к халькопиритам [22].

Максимумы содержаний *мышьяка* в халькопиритах соответствуют эндо-экзоконтактовым частям порфиروهого интрузива (верхний и нижний контакты). Значения содержаний мышьяка здесь достигают 100–200, в единичных пробах до 500 ppm. Фоновые содержания мышьяка меньше 100 ppm (см. рис. 10).

Распределение *селена* в халькопиритах в пределах месторождения Кызык-Чадр напоминает распределение селена и золота в пиритах этого месторождения. Максимумы (200–300 ppm) тяготеют к западной и восточной частям месторождения (в продольном разрезе), к участкам увеличения мощности рудного тела. В центральной части месторождения, которая также маркировалась повышенными содержаниями свинца в халькопирите, значения содержаний селена в халькопиритах снижены и составляет менее 100, местами менее 10 ppm. Наиболее отчётливо зона сниженных значений содержаний селена в халькопиритах в пределах порфиروهого интрузива прослеживается на поперечном разрезе (см. рис. 10).

В ходе выполнения данного исследования были также зафиксированы *элементы платиновой группы* в халькопиритах: платина, палладий и родий (см. рис. 10). В большинстве изученных образцов содержания данных элементов в халькопиритах ниже предела обнаружения либо приближены к нему. Од-

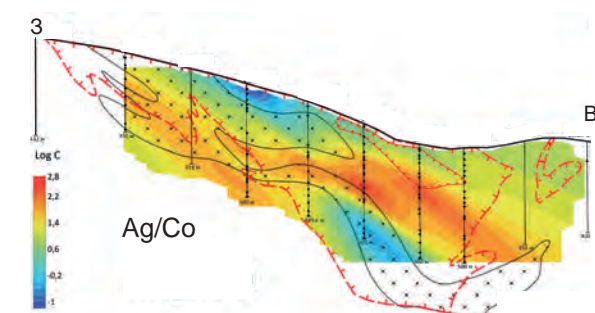
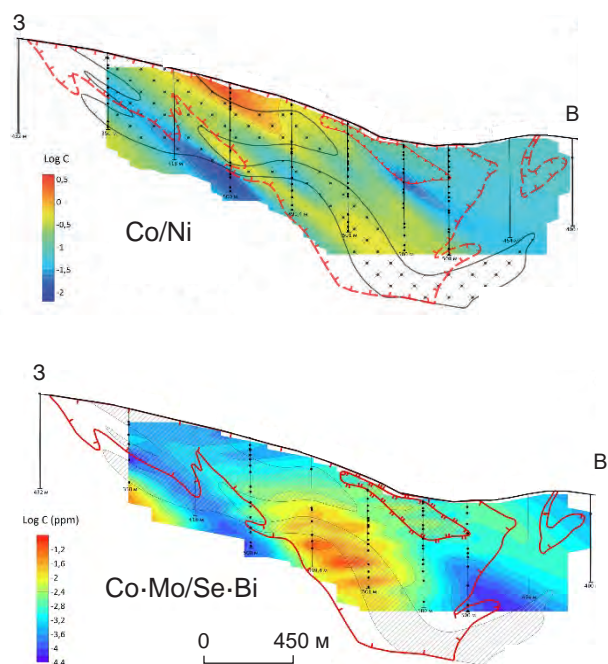


Рис. 11. Продольный разрез с элементами «скрытой» минералого-геохимической зональности пространственного распределения отношений содержаний некоторых микроэлементов в халькопиритах месторождения Кызык-Чадр:

усл. обозн. см. рис. 8

Fig. 11. Longitudinal section along the Kyzyk-Chadr deposit with elements of the “hidden” mineralogical-geochemical zonality in spatial distribution of the ratios of some trace elements in chalcopyrites:

For legend, see fig. 8

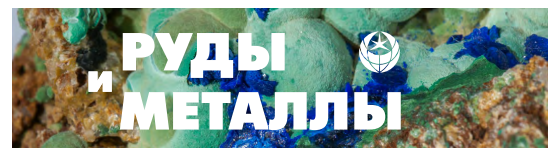
нако выделяется отдельная зона в центральной части прогнозируемого рудного тела, где значения суммы содержаний элементов платиновой группы в халькопиритах составляют до 10 ppm. Также в отдельных образцах халькопирита отмечены ураганные содержания родия (1230 ppm) и палладия (480 ppm). Среди трёх перечисленных элементов платиновой группы наиболее распространён в халькопиритах именно родий. Платина и палладий зафиксированы лишь в единичных образцах. Образцы халькопирита с элементами платиновой группы относятся к пирит-халькопирит-молибденитовой и халькопиритовой минеральной ассоциации. Стоит также отметить, что в пиритах месторождения Кызык-Чадр в ходе проведения опытно-методических работ металлы платиновой группы встречены не были, однако для многих молибден-медно-порфировых месторождений характерно наличие металлов платиновой группы именно в пиритах, при этом прослеживается корреляция между содержанием кобальта и данных элементов. Для халькопиритов наличие металлов платиновой группы не столь характерно, однако на некоторых месторождениях

(Рио-Бланко в Чили, Кальмакыр в Узбекистане [18]) они были ранее обнаружены именно в халькопиритах, при этом отмечалась приуроченность металлов платиновой группы к зоне калиевых изменений [13].

Так же, как и в случае с пиритами, для халькопиритов были проанализированы пространственные распределения *отношений содержаний* элементов-микропримесей. Изучались отношения Co/Ni, Ag/Co и Co-Mo/Se-Bi.

Максимумы значений отношения содержаний Co/Ni в халькопиритах (до 0,5) соответствуют верхнему контакту порфирового интрузива в зоне окисления. Также повышенными значениями данного отношения (до 0,3) характеризуется порфировый интрузив в целом. Фоновые значения отношения содержаний Co/Ni в халькопиритах, как правило, менее 0,1 (см. рис. 11).

Максимумы значений отношения содержаний Ag/Co в халькопиритах соответствуют центральной части прогнозируемого рудного тела и локализуются за пределами порфирового интрузива и зоны окисления (см. рис. 11). Значения отношения Ag/Co в халькопиритах здесь составляют 10 и более, в отдельных слу-



чаях более 100, фоновые значения Ag/Co в халькопиритах менее 10. Также на поперечном разрезе прослеживается некоторая приуроченность максимумов значений Ag/Co в халькопиритах к зоне контакта порфирового интрузива.

Значения отношения $Co/Mo/Se/Bi$ изменяются в диапазоне от 0 до 0,2, при этом максимумы (0,15 до 0,2) соответствуют центральной части прогнозируемого рудного тела за пределами зоны окисления в центральной части продольного разреза (см. рис. 10). Зоны минимальных значений данного отношения прослеживаются за пределами прогнозируемого рудного тела.

Таким образом, для халькопиритов, как и для пиритов, по содержанию микроэлементов устанавливается чередование зон с максимальными и минимальными значениями содержания микроэлементов-примесей и их отношений, связанное с положением в пространстве главных элементов строения месторождения – порфирового интрузива и его контактов и контурами рудных тел.

Так, для порфирового интрузива характерны максимальные значения содержаний в халькопиритах Au, Pb, Ni, Co, Bi , минимальные – Cu и Se . Для наиболее богатой части рудного тела максимальные значения содержаний в халькопиритах характерны для Mo, Cu, Zn, No . Для контактов порфирового интрузива типичны повышенные значения содержаний As, Mo, Ag, Ni и элементов платиновой группы, а также отношений Ag/Co и Co/Ni . В отдельных частях зоны окисления фиксируются повышенные значения содержаний Co, Ag, Zn и отношения Co/Ni . Элементом, повышенные содержания которого отмечены за пределами контура прогнозируемого рудного тела, является Ag .

Заключение. В рамках изучения вещественного состава медно-порфирового месторождения Кызык-Чандр определены состав и распределение элементов-микропримесей в рудообразующих сульфидных минералах в объёме рудовмещающего пространства.

Статистический и геологический анализ данных опытно-методических минералого-гео-

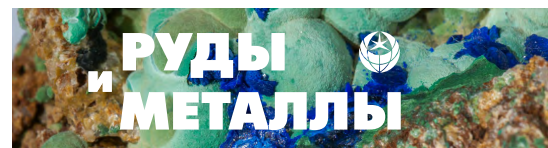
химических исследований позволил выявить ряд типоморфных геохимических особенностей различающихся по продуктивности рудных минеральных ассоциаций месторождения и наметить устойчиво повторяющиеся качественные и количественные элементы «скрытой» минералого-геохимической зональности, выражающиеся в вариациях концентрации элементов-микропримесей и их соотношений в пиритах и халькопиритах в объёме рудоносного штокверка месторождения. В пиритах центральной части штокверка фиксируются относительно высокие концентрации примесей Cu, Mo и Ag ; в центре и особенно на флангах отмечаются слабо повышенные концентрации Bi, Pb и Zn и более контрастные максимумы Co ; фланги и подрудные зоны маркируются высокими концентрациями примесей Ni, Se и As в пиритах. Соответственно, в пиритах месторождения от центра к периферии рудоносного штокверка отчётливо снижается величина отношения Ag/Co и увеличивается Co/Cu . В халькопиритах в центральных частях отмечаются повышенные примеси Mo, Co и Zn , в центре и на флангах – Ni, As, Pb и Ag , далее к флангам – Se и Bi . В центральной части зафиксировано повышение концентраций примеси по сумме платиноидов (Pt, Pd, Rh), а на флангах – Au в халькопиритах.

Выявленные тенденции коррелируются с установленной направленностью и концентрическим характером минералогической рудно-метасоматической зональности рудопроявления и могут объясняться вариациями PT -условий в объёме формирующейся медно-порфировой рудно-магматической системы.

Выявленная схема «скрытой» минералого-геохимической зональности может быть интегрирована в актуализированный вариант геолого-поисковой модели оруденения медно-порфирового типа Кызыкчадрского рудного поля и Тувино-Монгольского ВПП в целом. Установленные тенденции могут использоваться при предварительном оконтуривании рудоносных штокверков, оценке уровня эрозионного среза оруденения и прогнозировании позиции наиболее богатых частей рудных тел на стадии поисковых работ.

Список литературы

1. Андреев А. В., Гирфанов М. М., Старостин И. А., Авилова О. В., Кряжев С. Г., Юрмазов Д. Н., Бабкин И. А., Семёнов М. И. Геологическое строение, рудно-метасоматическая и минералого-геохимическая зональность золотосодержащего молибден-медно-порфирирового месторождения Кызык-Чадр, Республика Тыва // Руды и металлы. – 2021. – № 1. – С. 57–76.
2. Безмен Н. И., Еремин Н. И., Наразаули И. Г., Позднякова Н. В., Сергеева Н. Е. Пирит-халькопиритовый геотермометр: распределение кобальта // Геохимия. – 1978. – № 3. – С. 344–389.
3. Викентьев И. В., Абрамова В. Д., Иванова Ю. Н., Тюкова Е. Э., Ковальчук Е. В., Бортников Н. С. Микропримеси в пирите золото-порфирирового месторождения Петропавловское (Полярный Урал) по данным LA-ICP-MS // Доклады академии наук. – 2016. – Т. 470, № 3. – С. 326–330.
4. Дрогобужская С. В., Баянова Т. Б., Новиков А. И., Нерадовский Ю. Н., Субботин В. В., Савченко Е. Э. LA-ICP-MS анализ бадделита, циркона и сульфидов из пород комплексных месторождений Фенноскандинавского щита в пределах Арктического региона // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2019. – № 16. – С. 165–169.
5. Масленников В. В., Масленникова С. П., Целуйко А. С., Гладков А. Г. Метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и лазерной абляцией (LA-ICP-MS) для выявления типохимизма сульфидов колчеданных месторождений // Материалы V Всероссийской молодёжной научной конференции «Минералы, строение, свойства, методы исследования». – Екатеринбург, 2013. – С. 128–130.
6. Сазонов А. М., Пальянова Г. А., Журавкова Т. В., Сильянов С. А. Состав пирротина как индикатор условий минералообразования на золоторудном месторождении Советское (Енисейский край, Россия) // Геология и геофизика. – 2019. – № 7. – С. 934–954.
7. Сидорова Н. В., Викентьев И. В., Абрамова В. Д., Ковальчук Е. В. Золото и другие элементы-примеси в пирите Березовского месторождения (Средний Урал) // Литосфера. – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 327–336.
8. Старостин И. А., Авилова О. В., Андреев А. А., Гирфанов М. М. Рудно-метасоматическая зональность рудопроявления Кызык-Чадр (Республика Тыва) // Сборник тезисов докладов IX Международной научно-практической конференции «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов». – М.: ЦНИГРИ, 2019. – С. 200.
9. Ярцев Е. И. Колчеданно-полиметаллическое оруденение в метаморфизованных вулканогенных толщах Южного Урала (на примере Джусинского месторождения). – Казань: Бук, 2018. – 170 с.
10. Ярцев Е. И., Викентьев И. В., Еремин Н. И. Изотопный состав и особенности геохимии руд Джусинского колчеданно-полиметаллического месторождения (Южный Урал) // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2019. – № 4. – С. 78–83.
11. Berger B. R., Ayuso R. A., Wynn J. C., Seal R. R. Preliminary Model of Porphyry Copper Deposits. – U. S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2008.
12. Cook N. J., Ciobanu C. L., Danyushevsky L. V., Gilbert S. Minor and trace elements in bornite and associated Cu-(Fe)-sulfides: A LA-ICP-MS study Bornite mineral chemistry // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2011. – V. 75, I. 21, 1. – P. 6473–6496.
13. Crespo J., Reich M., Barra F., Verdugo J. J., Martínez C. Critical metal particles in ore sulfides from the Río Blanco porphyry Cu-Mo deposit, Chile // Minerals. – 2018. – № 8. – P. 519.
14. Danyushevsky L., Robinson P., Gilbert S., Norman M., Large R., McGoldrick P., Shelley M. Routine quantitative multi-element analysis of sulphide minerals by laser ablation ICP-MS: Standard development and consideration of matrix effects // Geochemistry Exploration Environment Analysis. – 2011. – V. 11. – P. 51–60.
15. Kusebauch C., Oelze M., Gleeson S. A. Partitioning of arsenic between hydrothermal fluid and pyrite during experimental siderite replacement // Chemical Geology. – 2018. – V. 500. – P. 136–147.
16. Maslennikov V., Maslennikova S., Aupova N., Tseluyko A., Large R., Danyushevsky L., Yatimov U. High-Tech Elements in Minerals of Massive Sulfide Deposits: LA-ICP-MS Data // 14th International Congress on Applied Mineralogy (ICAM-2019), SPEES, 2019. – P. 107–110.
17. Maslennikov V. V., Large R. R. Editorial for Special Issue «Pyrite Varieties and LA-ICP-MS Geochemistry in Ore Genesis and Exploration» // Minerals. – 2021. – № 11. – P. 131.
18. Pašava J., Vymazalova A., Kosler J., Koneev R., Jukov A. V., Khalmatov R. A. Platinum-group elements in ores from the Kalmakyr porphyry Cu-Au-Mo deposit, Uzbekistan: Bulk geochemical and laser ablation ICP-MS data // Mineralium Deposita. – 2010. – № 45. – P. 411–418.



19. Raič S., Molnár F., Cook N., O'Brien H., Lahaye Y. Application of lithochemical and pyrite trace element data for the determination of vectors to ore in the Raja Au-Co prospect, northern Finland // *Solid Earth*. – 2021. – V. 13, № 2. – P. 271–299.
20. Reich M., Deditius A., Chryssoulis S., Li J., Ma C., Parada M. A., Barra F., Mittermayr F. Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a porphyry copper system: A SIMS/EMPA trace element study // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2013. – № 104. – P. 42–62.
21. Rivas Romero C., Reich M., Barra F., Gregory D., Pichott S. The Relation between Trace Element Composition of Cu-(Fe) Sulfides and Hydrothermal Alteration in a Porphyry Copper Deposit: Insights from the Chuquicamata Underground Mine, Chile // *Minerals*. – 2021. – № 11 (7): 671. – P. 29.
22. Zwahlen C., Cioldi S., Wagner T., Rey R., Heinrich C. The porphyry Cu-(Mo-Au) deposit at Altar (Argentina): Tracing gold distribution by vein mapping and LA-ICP-MS mineral analysis // *Economic Geology*. – 2014. – № 109. – P. 1341–1358.

References

1. Andreev A. V., Girfanov M. M., Starostin I. A., Avilova O. V., Krjazhev S. G., Jurmazov D. N., Babkin I. A., Semjonov M. I. Geologicheskoe stroenie, rudno-metasomaticheskaja i mineralogo-geohimicheskaja zonal'nost' zolotosoderzhashhego molibden-mednoporfirovogo mestorozhdenija Kyz'yk-Chadr, Respublika Tyva [Geological structure, ore-metasomatic and mineralogical-geochemical zoning of Au-Mo-Cu porphyry Kyz'yk-Chadr deposit, Tyva Republic], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2021, No 1, pp. 57–76. (In Russ.).
2. Bezmen N. I., Eremin N. I., Narazauli I. G., Pozdnjakova N. V., Sergeeva N. E. Pirit-hal'kopiritovyy geotermometr: raspredelenie kobal'ta [Pyrite-chalcopyrite geothermometer: cobalt distribution], *Geohimija* [Geochemistry International], 1978, No 3, pp. 344–389. (In Russ.).
3. Vikent'ev I. V., Abramova V. D., Ivanova Ju. N., Tjukova E. Je., Koval'chuk E. V., Bortnikov N. S. Mikroprimesi v piritе zoloto-porfirovogo mestorozhdenija Petropavlovskoe (Poljarnyj Ural) po dannym LA-ICP-MS [Trace elements in pyrite from the Petropavlovsk gold-porphyry deposit (Polar Urals): results of LA-ICP-MS analysis], *Doklady akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], 2016, V. 470, No 3, pp. 326–330. (In Russ.).
4. Drogobuzhskaja S. V., Bajanova T. B., Novikov A. I., Neradovskij Ju. N., Subbotin V. V., Savchenko E. Je. LA-ICP-MS analiz baddeleyita, cirkona i sulfidov iz porod kompleksnyh mestorozhdenij Fennoskandinavskogo shhita v predelakh Arkticheskogo regiona [LA-ICP-MS analysis of baddeleyite, zircon and sulfides from rocks of complex deposits of the Fennoscandinavian Shield within the Arctic region], *Trudy Fersmanovskoj nauchnoj sessii GI KNC RAN* [Proceedings of the Fersman Scientific Session of the GI KNC RAS], 2019, No 16, pp. 165–169.
5. Maslennikov V. V., Maslennikova S. P., Celujko A. S., Gladkov A. G. Metod mass-spektrometrii s induktivno svjazannoj plazmoj i lazernoj abl'jaciej (LA-ICP-MS) dlja vyjavlenija tipohimizma sulfidov kolchedannyh mestorozhdenij [Method of mass spectrometry with inductively coupled plasma and laser ablation (LA-ICP-MS) to identify the typochemistry of sulfides of pyrite deposits], *Materialy V Vserossijskoj molodjozhnoj nauchnoj konferencii "Mineraly, stroenie, svojstva, metody issledovanija"* [Proceedings of the V All-Russian Youth Scientific Conference "Minerals, structure, properties, methods of research"], Ekaterinburg, 2013, pp. 128–130.
6. Sazonov A. M., Pal'janova G. A., Zhuravkova T. V., Sil'janov S. A. Sostav pirrotina kak indikator uslovij mineraloobrazovanija na zolotorudnom mestorozhdenii Sovetskoe (Enisejskij krjazh, Rossija) [Composition of pyrrotite as an indicator of gold ore formation conditions at the Sovetskoe deposit (Yenisei ridge, Russia)], *Geologija i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2019, No 7, pp. 934–954. (In Russ.).
7. Sidorova N. V., Vikent'ev I. V., Abramova V. D., Koval'chuk E. V. Zoloto i drugie jelementy-primesi v piritе Berezovskogo mestorozhdenija (Srednij Ural) [Gold and other impurity elements in pyrite from the Berezovskoe deposit in the Middle Urals], *Litosfera* [Lithosphere], 2019, V. 19, No 2, pp. 327–336. (In Russ.).
8. Starostin I. A., Avilova O. V., Andreev A. A., Girfanov M. M. Rudno-metasomaticheskaja zonal'nost' rudoprojavenija Kyz'yk-Chadr (Respublika Tyva) [Ore-metasomatic zonality of the Kyz'yk-Chadr ore occurrence (Tyva Republic)], *Sbornik tezisov dokladov IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii "Nauchno-metodicheskie osnovy prognoza, poiskov, ocenki mestorozhdenij almazov, blagorodnyh i cvetnyh metallov"* [Collection of abstracts of the IX International Scientific and Practical Conference "Scientific and Methodological Basis of Forecasting, Prospecting, Evaluation of Diamond,

- Noble and Nonferrous Metals Deposits*"], Moscow, TsNIGRI, 2019, pp. 200.
9. Jarcev E. I. Kolchedanno-polimetallichesкое orudnenie v metamorfizovannykh vulkanogennykh tolshhah Juzhnogo Urala (na primere Dzhusinskogo mestorozhdenija) [Pyrite-polymetallic mineralization in metamorphosed volcanogenic strata of the Southern Urals (on the example of the Dzhusinsky deposit)], Kazan', Buk Publ., 2018, 170 p.
 10. Jarcev E. I., Vikent'ev I. V., Eremin N. I. Izotopnyj sostav i osobennosti geohimii rud Dzhusinskogo kolchedanno-polimetallichesкого mestorozhdenija (Juzhnyj Ural) [Isotopic composition and geochemistry features of the ores of the Dzhusinsky pyrite-polymetallic deposit (South Urals)], *Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 4. Geologija* [Moscow University Bulletin. Series 4. Geology], 2019, No 4, pp. 78–83. (In Russ.).
 11. Berger B. R., Ayuso R. A., Wynn J. C., Seal R. R. Preliminary Model of Porphyry Copper Deposits, U. S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2008.
 12. Cook N. J., Ciobanu C. L., Danyushevsky L. V., Gilbert S. Minor and trace elements in bornite and associated Cu-(Fe)-sulfides: A LA-ICP-MS study Bornite mineral chemistry, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, V. 75, I. 21, 1, pp. 6473–6496.
 13. Crespo J., Reich M., Barra F., Verdugo J. J., Martínez C. Critical metal particles in ore sulfides from the Río Blanco porphyry Cu-Mo deposit, Chile, *Minerals*, 2018, No 8, pp. 519.
 14. Danyushevsky L., Robinson P., Gilbert S., Norman M., Large R., McGoldrick P., Shelley M. Routine quantitative multi-element analysis of sulphide minerals by laser ablation ICP-MS: Standard development and consideration of matrix effects, *Geochemistry Exploration Environment Analysis*, 2011, V. 11, pp. 51–60.
 15. Kusebauch C., Oelze M., Gleeson S. A. Partitioning of arsenic between hydrothermal fluid and pyrite during experimental siderite replacement, *Chemical Geology*, 2018, V. 500, pp. 136–147.
 16. Maslennikov V., Maslennikova S., Aupova N., Tseluyko A., Large R., Danyushevsky L., Yatimov U. High-Tech Elements in Minerals of Massive Sulfide Deposits: LA-ICP-MS Data, *14th International Congress on Applied Mineralogy (ICAM-2019), SPEES*, 2019. pp. 107–110.
 17. Maslennikov V. V., Large R. R. Editorial for Special Issue “Pyrite Varieties and LA-ICP-MS Geochemistry in Ore Genesis and Exploration”, *Minerals*, 2021, No 11, pp. 131.
 18. Pašava J., Vymazalova A., Kosler J., Koneev R., Jukov A. V., Khalmatov R. A. Platinum-group elements in ores from the Kalmakyr porphyry Cu-Au-Mo deposit, Uzbekistan: Bulk geochemical and laser ablation ICP-MS data, *Mineralium Deposita*, 2010, No 45, pp. 411–418.
 19. Raič S., Molnár F., Cook N., O'Brien H., Lahaye Y. Application of litho-geochemical and pyrite trace element data for the determination of vectors to ore in the Raja Au-Co prospect, northern Finland, *Solid Earth*, 2021, V. 13, No 2, pp. 271–299.
 20. Reich M., Deditius A., Chryssoulis S., Li J., Ma C., Parada M. A., Barra F., Mittermayr F. Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a porphyry copper system: A SIMS/EMPA trace element study, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, No 104, pp. 42–62.
 21. Rivas Romero C., Reich M., Barra F., Gregory D., Pichott S. The Relation between Trace Element Composition of Cu-(Fe) Sulfides and Hydrothermal Alteration in a Porphyry Copper Deposit: Insights from the Chuquicamata Underground Mine, Chile, *Minerals*, 2021, No 11 (7): 671, p. 29.
 22. Zwahlen C., Cioldi S., Wagner T., Rey R., Heinrich C. The porphyry Cu-(Mo-Au) deposit at Altar (Argentina): Tracing gold distribution by vein mapping and LA-ICP-MS mineral analysis, *Economic Geology*, 2014, No 109, pp. 1341–1358.

Старостин Иван Александрович (starostin@tsnigri.ru)

ведущий инженер

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