

ISSN 0869-5997

И РУДЫ 
МЕТАЛЛЫ
ORES AND METALS

1/2026

РУДЫ И МЕТАЛЛЫ 1/2026

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 науки и высшего образования 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, 2026



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Наумов Евгений Анатольевич

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

Иванов Анатолий Иннокентьевич

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

Дамдинов Булат Батуевич

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

Пирайно Франко

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

Жаркова Вера Сергеевна

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

Аракчеев Дмитрий Борисович

генеральный директор ФГБУ «Росгеолфонд»
кандидат технических наук

Бозкая Гульчан

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

Волчков Алексей Гордеевич

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

Вымазалова Анна

Чешская геологическая служба,
г. Прага, Чешская Республика

Голубев Юрий Конкордьевич

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

Горячев Николай Анатольевич

главный научный сотрудник СВКНИИ ДВО РАН
доктор геолого-минералогических наук,
академик РАН

Звездов Вадим Станиславович

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

Зедгенизов Дмитрий Александрович

директор ИГГ УрО РАН
доктор геолого-минералогических наук

Калинин Юрий Александрович

главный научный сотрудник ИГМ СО РАН
доктор геолого-минералогических наук

Кременецкий Александр Александрович

научный руководитель ФГБУ «ИМГРЭ»
доктор геолого-минералогических наук

Кряжев Сергей Гаврилович

начальник отдела минералогии
и изотопной геохимии 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

Селтмэн 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,
член-корреспондент РАН

Черных Александр Иванович

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

RUDY I METALLY (ORES AND METALS)

1/2026

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, 2026



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
DSc

Bulat B. Damdinov

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

Franco Pirajno

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

Vera S. Zharkova

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

Dmitry B. Arakcheev

General Director, FSBI Rosgeolfond
PhD

Gülcan Bozkaya

DSc, Professor, Department of Geological Engineering
Pamukkale University, Turkey

Alexey G. Volchkov

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

Anna Vymazalova

DSc, Czech Geological Survey, Czech Republic

Yuri K. Golubev

Head of diamond department, FSBI TsNIGRI
PhD

Nikolay A. Goryachev

Chief researcher, NEISRI FEB RAS
DSc, Academician of RAS

Vadim S. Zvezdov

Head of metallogeny department, FSBI TsNIGRI
DSc

Dmitry A. Zedgenizov

Director, IGG UB RAS
DSc

Yuri A. Kalinin

Chief researcher, IGM SB RAS
DSc

Alexander A. Kremenetsky

Scientific Director, FSBI IMGRE
DSc

Sergey G. Kryazhev

Head of mineralogy and isotope geochemistry
department, FSBI TsNIGRI
DSc

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
DSc, Academician of RAS

Vasiliy F. Proskurin

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

Reimar Seltmann

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

Alexander V. Tolstov

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

Valery Yu. Fridovsky

Director, IGABM SB RAS
DSc, Corresponding member of RAS

Alexander I. Chernykh

Advisor to Managing Director, Polyus PJSC
PhD



СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ПРИКЛАДНАЯ МЕТАЛЛОГЕНИЯ

Болонин А. В.

Перспективы промышленного освоения Карасугского карбонатитового редкоземельного месторождения (Республика Тыва, РФ)

МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА, ПОИСКОВ, ОЦЕНКИ И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Хачатрян Г. К., Кряжев С. Г.

Опыт применения ИК-микроскопии для исследования типоморфизма циркона при прогнозе и поисках месторождений цветных и благородных металлов

СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Литвиненко И. С.

Геохимические особенности самородного золота Шаманихо-Столбовского рудного района (Магаданская область)

Писарев П. А., Куприянова Т. Н., Козлов Д. С., Власов Е. А., Колова Е. Е.

Особенности геологического строения, минерального состава руд и условий их формирования золоторудного месторождения Чульбаткан (Хабаровский край)

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА ПОРОД И РУД

Петроченков Д. А., Фомина М. И., Чижова И. А.

Микровключения и элементы-примеси в деревянистом олове месторождения Хета, Магаданская область

ПОЗДРАВЛЯЕМ С ЮБИЛЕЕМ

**Анатолий Иннокентьевич Иванов
Борис Игоревич Беневольский**

5

25

35

51

71

86

APPLIED METALLOGENY

Bolonin A. V.

Prospects for the industrial development of the Karasug carbonatite rare earth deposit (Republic of Tyva, Russian Federation)

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

Khachatryan G. K., Kryazhev S. G.

The practice of the zircon typomorphism studies using IR microscopy as applied to forecasting and prospecting for base and precious metals deposits

GEOLOGY OF ORE DEPOSITS

Litvinenko I. S.

Geochemical features of native gold from the Shamanikha-Stolbovaya ore region, Magadan Oblast

Pisarev P. A., Kupriyanova T. N., Kozlov D. S., Vlasov E. A., Kolova E. E.

Peculiarities of the geological structure, mineral composition of the ores, and formation conditions of the Chulbatkan gold deposit, Khabarovsk Krai

PETROGRAPHY AND MINERALOGY OF MINERAL DEPOSITS

Petrochenkov D. A., Fomina M. I., Chizhova I. A.

Microinclusions and impurity elements in woody tin from the Kheta deposit, Magadan Oblast

OUR CONGRATULATIONS

**Anatoly Innokentyevich Ivanov
Boris Igorevich Benevolsky**

Перспективы промышленного освоения Карасугского карбонатитового редкоземельного месторождения (Республика Тыва, РФ)

Болонин А. В.

ЦНИГРИ, г. Москва, Россия

Аннотация. Карасугское карбонатитовое месторождение содержит крупные запасы комплексных железо-флюорит-барит-стронций-редкоземельных руд, сложных более чем на 80 % полезными минералами. Месторождение разведывалось в 1947–1954, 1979–1984 и 2004–2006 гг. Первичными рудами являются интрузивные сидеритовые карбонатиты, содержащие в среднем (мас. %): сидерит – 61; барит и баритоцелестин – 20; флюорит – 12; пирит – 3; бастнезит – 1–1,5; кварц – 1–2; апатит – 0,5; молибденит – 0,03; уранинит – 0,02. Карбонатиты на стадии аутометасоматоза местами были обогащены гематитом до 5–30 % и бастнезитом (второй генерации) до 1,5–2,5 %. На рудных залежах от дневной поверхности до глубины 100–300 м развита «железная шляпа», представленная окисленными комплексными рудами. Среди окисленных руд для первоочередного освоения оконтурен «богатый» блок с содержанием суммы редкоземельных оксидов от 1,5 до 3,1 %, в среднем 2,13 %. Разработана технологическая схема переработки первичной и окисленной руды с получением ассортимента продуктов: железного, баритового, флюоритового и бастнезитового концентратов, полирита, химических соединений бария, стронция, фтора, молибдена, урана. Месторождение находится в простых для открытой разработки горно-геологических условиях, связано шоссеиной дорогой и линией электропередач с городом Кызыл. Карасугское месторождение, в случае вовлечения его в эксплуатацию, будет иметь много конкурентных преимуществ перед другими редкоземельными объектами РФ.

Ключевые слова: Карасуг, редкие земли, бастнезит, разведка, запасы.

Для цитирования: Болонин А. В. Перспективы промышленного освоения Карасугского карбонатитового редкоземельного месторождения (Республика Тыва, РФ). Руды и металлы. 2026. № 1. С. 5–24. DOI: 10.47765/0869-5997-2026-10001.

Prospects for the industrial development of the Karasug carbonatite rare earth deposit (Republic of Tyva, Russian Federation)

Bolonin A. V.

Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals (FSBU TsNIGRI), Moscow, Russia

Annotation. The Karasug carbonatite deposit contains large reserves of complex iron-fluorite-baryte-strontium-rare earth ores composed of useful minerals for more than 80%. Geological exploration of the deposit was conducted in 1947–1954, 1979–1984, and 2004–2006. Primary ores of the deposit are represented by intrusive siderite carbonatites containing on average (wt.%): siderite – 61; baryte and barytocelestine – 20; fluorite – 12; pyrite – 3; bastnaesite (bastnäsite) – 1–1.5; quartz – 1–2; apatite – 0.5; molybdenite – 0.03; uraninite – 0.02. During the autometasomatism stage, the carbonatites were locally enriched in hematite (up to 5–30%) and bastnaesite (second generation) (up to 1.5–2.5%). The upper sections of the ore lodes, from the surface to a depth of 100–300 m, are represented by an "iron cap" composed of oxidized complex ores. Among the oxidized ores, a "rich" block with a total rare-earth oxide grade of 1.5 to 3.1%, averaging 2.13%, was outlined for the priority development. A technological process flow was developed for processing primary and oxidized ores to produce an assortment of products including the iron, baryte, fluorite, and bastnaesite concentrates; polyrite; and chemical compounds of barium, strontium, fluorine, molybdenum, and uranium. The mineral deposit is situated in favorable geological conditions for the open-pit mining and is connected to the city of Kyzyl by a highway and power line. If developed, the Karasug deposit will have many competitive advantages over other rare earth deposits in the Russian Federation.

Keywords: Karasug, rare earths, bastnaesite, exploration, mineral reserves.

For citation: Bolonin A. V. Prospects for the industrial development of the Karasug carbonatite rare earth deposit (Republic of Tyva, Russian Federation). Rudy i metally (Ores and metals). 2026. No. 1. pp. 5–24. DOI: 10.47765/0869-5997-2026-10001.



Введение

Карасугское месторождение, расположенное в Республике Тыва, включает в себе крупные запасы и прогнозные ресурсы комплексных железо-флюорит-барит-стронций-редкоземельных руд. В геологическом и минерагеническом отношении оно охарактеризовано в многочисленных публикациях, включая диссертации А. С. Митропольского (1958, 1962), Д. О. Онтоева (1963, 1984), А. П. Хомякова (1964, 1971), А. В. Болонина (1984–2018), А. В. Никифорова (2004–2020), И. Р. Прокопьева (2014). В диссертациях последних трёх авторов обоснован первичный карбонатитовый магматический генезис месторождения.

В этой статье представляются данные, влияющие на оценку промышленной значимости месторождения. Постановка вопроса о возможности вовлечения Карасугского месторождения в разработку актуальна в свете активного обсуждения в последнее время в средствах массовой информации значения редкоземельных металлов в технологическом суверенитете РФ. В научной литературе последних лет в качестве будущего источника РЗМ* в стране на длительную историческую перспективу почти безальтернативно выбирается Томторское месторождение, расположенное на крайнем северо-западе Якутии [9]. Такой выбор представляется не столь безусловным в свете приводимых в настоящей статье данных. Карасугское месторождение вполне может стать альтернативным Томтору вариантом, особенно в случае прокладки в Туву запроектированной железной дороги.

История геологоразведочных работ

Карасугское месторождение имеет длительную историю геологического изучения.

* Используемые сокращения: РЗМ (или РЗЭ) – редкоземельные металлы (или элементы), включающие 14 химических элементов лантаноидного семейства (лантан, церий, празеодим, неодим, самарий, европий, гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий, лютеций); сумма РЗМ (или TR) – сумма редкоземельных металлов; сумма РЗО (или TR₂O₃) – сумма редкоземельных оксидов.

Обнажения лимонитовых охр хорошо заметны на открытой холмистой местности и издавна были известны местному населению, употреблявшему эти минералы как краску. Впервые в литературе рудное проявление под названием Хожей упоминается в «Вестнике Общества сибирских инженеров» (1917 г.) в публикации посетившего проявление горного инженера Б. М. Порватова. После вступления в 1944 г. Тувы в состав СССР месторождение осенью 1946 г. осмотрели руководители Тувинской экспедиции ВСЕГЕИ Ю. А. Билибин и Д. В. Вознесенский, геологи Ф. А. Головачев и И. П. Резников. Были установлены комплексный состав (железо, флюорит, барит) и повышенная радиоактивность руд. Обширные размеры рудных выходов позволили принять решение о начале геологоразведочных работ. Месторождение именовали по названию близ протекающего ручья Кара-Суг.

Масштабные поисковые и разведочные работы на месторождении выполнялись трижды: в 1947–1954 гг. – Горной экспедицией [6], в 1979–1984 гг. – ПГО «Берёзовгеология», в 2004–2006 гг. – ОАО «Тувинская ГРЭ». Начиная с 1980 г., автору этой статьи удалось принять участие в работах Берёзовского ПГО [1], Тувинской ГРЭ, а также в научных исследованиях группы сотрудников ИГЕМ РАН [2, 7, 8].

В 1947–1954 гг. Карасугское месторождение разведывалось Горной экспедицией Первого Главного геологического управления (А. С. Митропольский, Н. С. Анастасиев, М. В. Любимов и др.). Был пройден большой объём горных выработок: 17 485 м³ канав, 5006 м³ шурфов, 1065 м шахт, 15 597 м штолен. Отобрано 23 455 м бороздовых проб, пробурено 41 153 м скважин колонкового бурения. Рудные залежи с поверхности разведаны канавами и шурфами по сети 10 × 25...20 × 50 м, крупные залежи на глубине 50–150 м вскрыты штольневые горизонты и до 300–550 м разбурены скважинами. В результате в рудном поле разведано восемь рудоносных карбонатитовых тел с крутопадающими залежами комплексных руд. Залежам в порядке обнаружения присвоены номера с 1 по 9 (залежи № 1 и 8 принадлежат

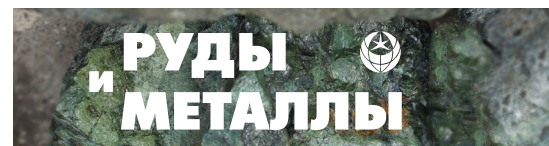


Табл. 1. Химический состав (мас. %) и запасы окисленных и первичных (неокисленных) руд Карасугского рудного поля (по данным Горной экспедиции, 1955 г. [6])

Table 1. Chemical composition (wt.%) and reserves of oxidized and primary (non-oxidized) ores of the Karasug ore field (according to data by the Gornaya Expedition, 1955 [6])

Тип руд Рудные залежи №	Окисленные									Первичные 1 + 2 + 3 + 6
	1	2	3	4	5	6	7	8	Всего 1–8	
Запасы руды, млн т	25,18	31,88	12,6	10,2	1,68	39,18	2,19	4	127	148
Компоненты, мас. %:									среднее:	среднее:
Fe валовое	28,36	30,03	32,36	30,57	28,51	30,40	31,33	33,72	29,89 (1610)	27,98
FeO										23,52
BaSO ₄	12,31	17,66	20,70	23,27		22,90	23,35	14,05	19,48 (1210)	14,99
CaF ₂	6,62	11,39	11,50	13,69	9,33	13,96	15,51	11,08	11,71 (1332)	9,01
S валовая	3,24	2,73	3,10	3,46	3,61	3,87	3,85	2,91	3,46 (1442)	3,45
S сульфидная										1,48
P	0,151	0,112	0,100	0,070		0,050	0,030	0,050	0,090 (785)	0,09
MnO	0,295	0,675	0,255	0,56		0,66			0,45	
TiO ₂	0,18		0,195	0,39					0,26	
SiO ₂	15,44	11,82	8,44	9,04	12,52	9,63	8,65	9,94	11,28 (872)	9,89
Al ₂ O ₃	3,46	5,92	3,06			4,12			4,33 (192)	
Mo	0,045	0,025	0,020	0,025		0,020			0,030	
U									0,019	0,018
По данным М. В. Любимова, 1958 г.										
SrO	2,46 (20)	2,01 (10)	4,15			1,00 (8)			2,1 (39)	4,03 (36)
TR ₂ O ₃ (сумма PЗО)	1,15	1,19	1,32			0,69			1,07 (39)	1,15 (36)
Объёмный вес, т/м ³ :									2,70	3,44

Примечание. В скобках число анализов.

одному карбонатитовому телу). Крупные рудные залежи № 1, 2 и 6 по своим размерам допускают создание на их базе самостоятельных горнодобывающих предприятий (карьеров), что выводит их в ранг месторождений, а всю совокупность залежей – в ранг рудного поля.

В рудных залежах установлено распространение двух главных технологических типов руд: первичных (неокисленных) флюорит-барит-гематит-сидеритовых и окисленных флюорит-барит-гематит-железогидроксидных (названы по главным минералам в порядке увели-

чения количества). Раздельно для первичных и окисленных руд произведён подсчёт запасов железа, барита, флюорита и урана по состоянию на 1 января 1955 года. С запозданием были подсчитаны запасы редкоземельных металлов и стронция (М. В. Любимов, 1958), содержания которых в комплексных рудах были оценены по групповым пробам, составленным из дубликатов рядовых бороздовых и керновых проб. Химический состав и запасы руд сведены в таблице 1. Всего подсчитано 127 млн т окисленной руды по категориям А + В + С₁

и 148 млн т первичной руды по категориям $C_1 + C_2$. Оба подсчёта были утверждены ГКЗ СССР, но впоследствии запасы были списаны с баланса.

В период 1979–1983 гг. на Карасугском рудном поле геологоразведочные работы проводились партией № 819 ПГО «Берёзовгеология» (Г. М. Комарницкий, В. К. Максимов и др.). Была проведена доразведка рудных залежей с проходкой канав, восстановлением штольневого горизонта на залежи № 2, бурением скважин глубиной до 350–400 м. Общие по рудному полю запасы комплексных руд (окисленных + первичных) были увеличены с 275 млн т, по предшествующим данным (табл. 1), до 320 млн т, произведён пересчёт запасов основных и попутных компонентов. Среднее содержание TR_2O_3 по всем рудам составило 1,03 % при бортовом содержании 0,3 %.

Многочисленные выходы комплексных руд «карасугского» типа были обнаружены в районе Карасугского рудного поля Тувинской и Горной экспедициями в 1948–1958 гг., Берёзовским ПГО в 1979–1983 гг. Эти выходы оценены горными работами, они группируются в рудоносных карбонатитовых полях: Чаахольском, Улатайском, Тээли-Оргудыдском, Северо-Чозском, Южно-Чозском, Чайлюхемском (рис. 1). Изученные в этих полях флюорит-барит-железогидроксидные руды уступают по качеству и количеству рудам Карасугского месторождения, но тем не менее могут стать его отдалённым резервом. Наиболее крупным разведанным объектом является Улатайское железорудное месторождение (91 млн т руды), содержащее флюорит в среднем 5,7 %, барит 3,9 %, редкоземельные минералы – бастнезит и паризит (П. В. Коростин и др., 1957).

В 2004–2006 гг. ОАО «Тувинская ГРЭ» (Д. Н. Шаповалов, В. В. Михайлов и др.) на Карасугском месторождении провело ревизионные и оценочные работы на двух крупных рудных залежах (Первой и Второй) с повышенным содержанием редкоземельных металлов. Ставилась задача оконтурить локальный блок богатых легкообогатимых бастнезитовых руд в коре выветривания и оценить прогнозные ресурсы цериевых редкоземель-

ных металлов по категории P_1 до глубины 100 м. Было пройдено 7 бульдозерных траншей глубиной 2,2–4,8 м и общей длиной 1013 м, пробурено 12 скважин колонкового бурения (всего 1441 м). Рядовое опробование по полотну траншей проводилось сплошными бороздами длиной 3 м и сечением 3×5 см. Всего отобрана 251 бороздовая проба. Для оценки технологических свойств руды на Первой залежи отобраны две лабораторные пробы – из траншей (536 кг) и из половинок керна (361 кг). Рядовые бороздовые и керновые пробы анализировались в ЦЛ ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург) количественным методом ИСП МС (ICP MS) на 14 редкоземельных элементов (лантаноидов), а также Y, Ba, Sr, U, Th, Mo.

Геология и минералогия месторождения

В районе Центральной Тувы поля рудоносных карбонатитов выстраиваются субмеридиональной цепью на протяжении 120 км, обозначая собой рудоконцентрирующую зону, поперечную основным складчатым и разрывным палеозойским структурам (рис. 1). Радиологический возраст карбонатитов 118 млн лет маркирует этап позднемезозойской тектоно-магматической (внутриплитной рифтогенной) активизации складчатой области [8]. В пределах Карасугского рудного поля на площади около 20 км² разведаны восемь рудоносных карбонатитовых тел первично магматического происхождения (рис. 2) [1, 7]. Тела локализованы преимущественно в зонах субширотных разломов среди сильно трещиноватых, местами брекчированных и осветлённых песчаников и алевролитов ордовик-силурийского возраста. Выделяются два крупных трубообразных тела конически-кольцевого центробежного строения размером в поперечнике 670×750 м (Первое) и 400×550 м (Второе). Остальные тела дайкообразные протяженностью от 300 до 1300 м и мощностью до 100–160 м. Бурением скважин тела прослежены без выклинивания до глубины 300–550 м. Крупные тела многофазовые, сложены анкерит-кальцитовыми карбонатитами первой фазы и флюорит-барит-сидеритовыми второй.

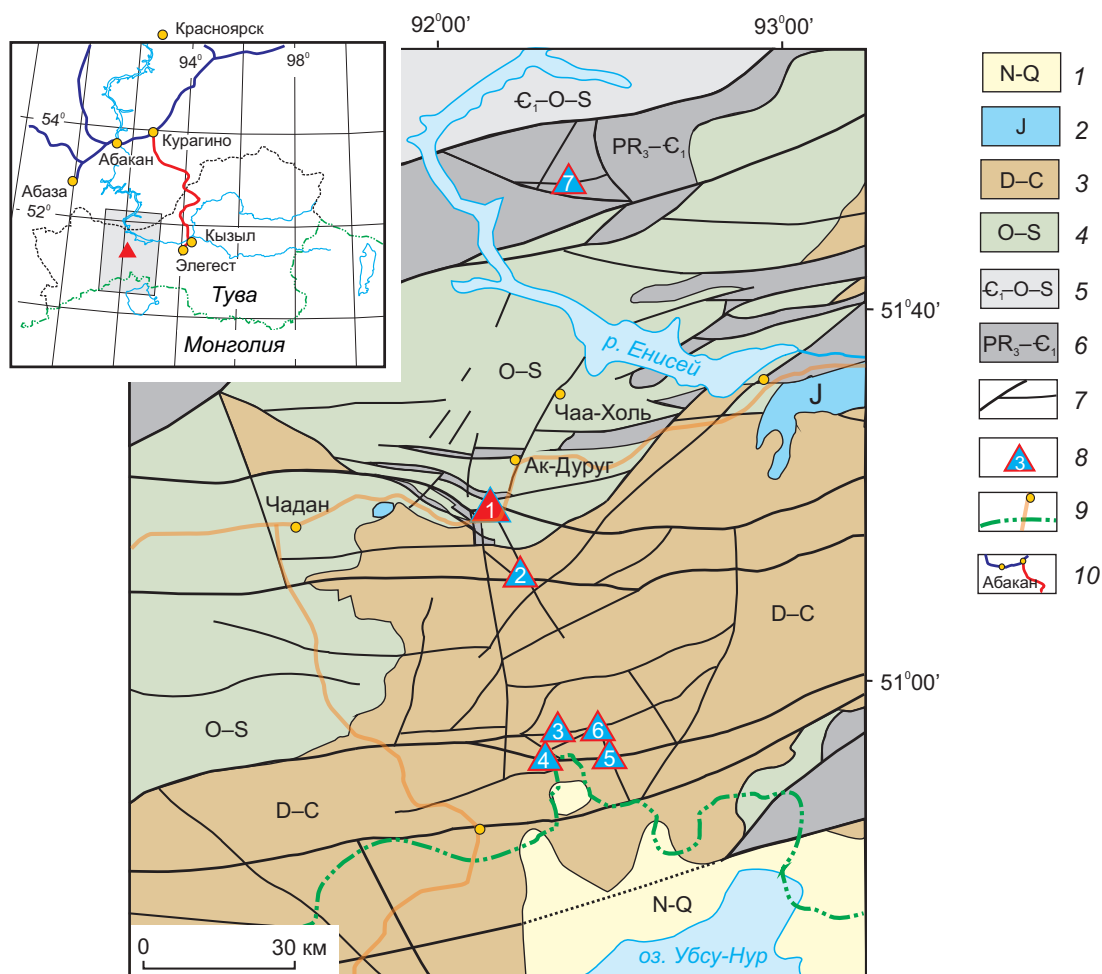


Рис. 1. Геологическая схема района рудоносных карбонатитовых полей в Центральной Туве (составлена с использованием [3]):

1 – неоген-четвертичные рыхлые отложения; 2 – юра: сероцветные песчаники, алевролиты, аргиллиты, угли; 3 – девон–карбон (Тувинский прогиб): вулканогенные и карбонатно-терригенные отложения; 4, 5 – ордовик–силур, карбонатно-терригенные флишоидные отложения: 4 – Хемчикско-Систигхемский прогиб, 5 – Центрально-Западно-Саянский блок; 6 – венд–нижний кембрий: метаморфические сланцы, кварциты, мраморы, метабазиты, офиолиты; 7 – разломы; 8 – рудоносные карбонатитовые поля: Карасугское (1), Чаахольское (2), Тээли-Оргудыдское (3), Улатайское (4), Южно-Чозское (5), Северо-Чозское (6), Чайлюхемское (7); 9 – государственная граница РФ с Монголией (зелёная линия), шоссейная дорога (оранжевая линия) и населённый пункт (кружок); 10 (на вкладке) – железная дорога: действующая (фиолетовая линия) и проектируемая Курагино – Кызыл – Элегест (красная линия)

Fig. 1. Schematic geological map of the ore-bearing carbonatite fields in Central Tuva (compiled using [3]):

1 – Neogene-Quaternary loose deposits; 2 – Jurassic: gray-colored sandstones, siltstones, claystones, and coals; 3 – Devonian–Carboniferous (Tuvinian trough): volcanogenic and carbonate-terrigenous deposits; 4, 5 – Ordovician–Silurian, carbonate-terrigenous flyschoid deposits: 4 – Khemchik-Sistighem trough, 5 – Central West Sayan block; 6 – Vend–Lower Cambrian: metamorphic schists, quartzites, marbles, metabasites, ophiolites; 7 – faults; 8 – ore-bearing carbonatite fields: (1) Karasug, (2) Chaakhol, (3) Teeli-Orgudyd, (4) Ulaatai, (5) Southern Choza, (6) Northern Choza, (7) Chailag-Khem; 9 – State border of the Russian Federation with Mongolia (green line), highway (orange line), and a settlement (circle); 10 (insert) – railways: operating (purple line) and planned Kuragino–Kyzyl–Eleggest (red line)

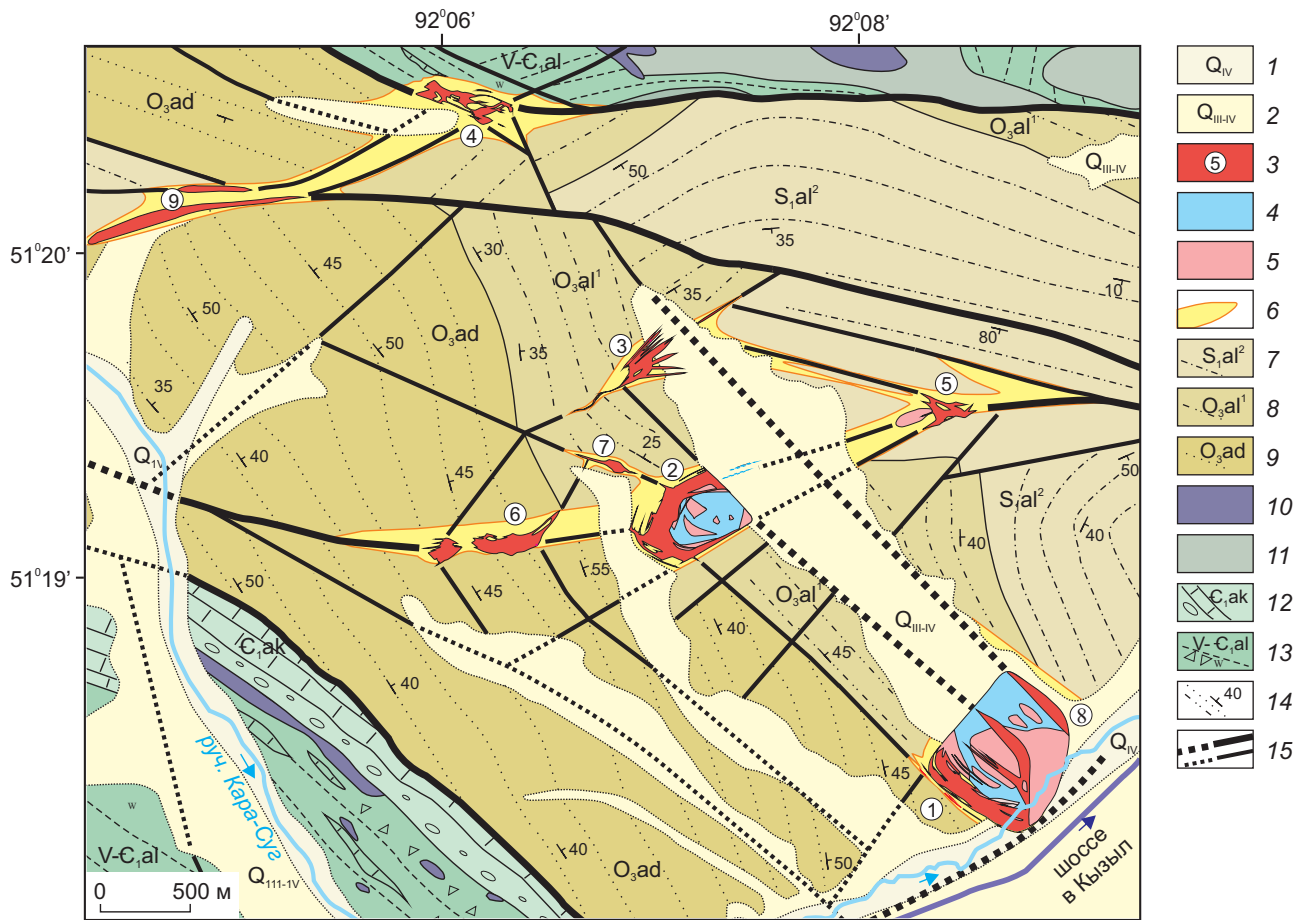
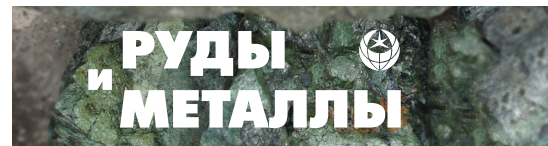


Рис. 2. Геологическая карта Карасугского рудного поля:

1 – современные аллювиальные отложения; 2 – четвертичные делювиально-пролювиальные отложения (сняты на рудных залежах); 3 – рудоносные карбонатитовые тела и их номера (первично флюорит-барит-сидеритовые карбонатиты); 4 – анкерит-кальцитовые карбонатиты; 5 – биотитовые граниты и граносиениты; 6 – зоны подроблённых, осветлённых, лимонитизированных вмещающих терригенных пород; 7 – нижний силур, верхнеалавелькская подсвита: сероцветные песчаники, алевролиты, линзы известняков с фауной брахиопод; 8 – верхний ордовик, нижнеалавелькская подсвита: пестроцветные песчаники и алевролиты; 9 – верхний ордовик, адырташская свита: песчаники и алевролиты; 10 – серпентиниты кембрия (актовракский комплекс); 11 – базиты кембрия; 12 – нижний кембрий, акдуругская свита: известняки с фауной археоциат, конгломераты, песчаники; 13 – венд-нижний кембрий, алтынбулакская свита: кварциты, сланцы, олистострома, линзы известняков; 14 – слоистость пород и элементы её залегания; 15 – разломы

Fig. 2. Geological map of the Karasug ore field:

1 – recent alluvial deposits; 2 – Quaternary deluvial-proluvial deposits (not shown over ore lodes); 3 – ore-bearing carbonatite bodies (primarily fluorite-baryte-siderite carbonatites) and their numbers; 4 – ankerite-calcite carbonatites; 5 – biotite granites, granosyenites; 6 – zones of crushed, bleached, and limonitized terrigenous host rocks; 7 – Lower Silurian, Upper Alaveylyk Subformation: gray-colored sandstones, siltstones, limestone lenses with brachiopods fauna; 8 – Upper Ordovician, Lower Alaveylyk Subformation: variegated sandstones and siltstones; 9 – Upper Ordovician, Adyrtyash Formation: sandstones and siltstones; 10 – Cambrian serpentinites (Aktovrak Suite); 11 – Cambrian basites; 12 – Lower Cambrian, Akdurug Formation: limestones with fauna of archeocyanate, conglomerates, sandstones; 13 – Vendian–Lower Cambrian, Altynbulak Formation: quartzites, schists, olistostroma, limestone lenses; 14 – rock bedding and its attitudes; 15 – faults



Последние имеют наибольшее распространение и практически во всём своём объёме представляют собой комплексные многокомпонентные руды. В строении карбонатитовых тел участвуют крупные останцы подробленных, грейзенизированных и аргиллизированных гранитов. С вмещающими терригенными породами и гранитами карбонатиты имеют резкие субвертикальные (90–70°) контакты. В цементе карбонатитов рассеяны относительно мелкие (1–20 см) угловатые обломки вмещающих алюмосиликатных пород в количестве 5–25 об. %. Встречаются многометровые глыбы и блоки-останцы. На всех карбонатитовых телах проявлена мощная зона гипергенного окисления, формирующая окисленный тип комплексных руд.

Анкерит-кальцитовые карбонатиты представлены белыми среднезернистыми породами, в составе которых (мас. %): кальцит 60–45; анкерит 35–50; апатит 1–2; пирит 0,5–1,5; кварц 1–2; монацит и паризит в сумме 0,5. Спорадически диагностируются мусковит, рутил, магнетит, сидерит, доломит, халькопирит, молибденит, торит. В зоне окисления карбонатиты обращены в гидрогётит-кальцитовые породы буро-жёлтого цвета с прожилками гипергенного стронцианита и кальцита. Низкое содержание железа (7–8 % Fe) и редких земель (0,3 % TR_2O_3), отсутствие барита и флюорита переводят эти карбонатиты в категорию нерудоносных вмещающих пород.

Первично интрузивные флюорит-барит-сидеритовые карбонатиты характеризуются выдержанностью минерального состава, текстуры и структуры в крупных объёмах слагаемых ими залежей. В их средний минеральный состав, в пересчёте из химического, входят (мас. %): сидерит 61; барит (баритоцелестин) 20; флюорит 12; пирит 3; бастнезит 1–1,5; кварц 1–2; апатит 0,5; молибденит 0,03; уранинит 0,02. В сумме до 1 % встречаются мусковит, калиевый полевой шпат, анкерит, магнетит, рутил, монацит. Карбонатиты имеют неравномерно-зернистую порфиридовидную структуру: в тонкозернистой (< 0,2 мм) флюорит-сидеритовой основной массе рассеяны более крупные округло-идiomорфные вкрапленники ромбоэдр-

рического сидерита, кубического флюорита, призматического барита или баритоцелестина, дипирамидального кварца, сложной формы пирита (рис. 3, а). Вкрапленники занимают более половины объёма порфиридовидных агрегатов. Размер кристаллов-вкрапленников 0,3–3 мм, местами до 10 мм. Бастнезит (первой генерации) включён во флюорит-сидеритовый агрегат в форме мелких зёрен и пластинок светло-коричневого цвета размером от 0,04 × 0,1 до 0,5 × 1 мм. Под электронным микроскопом в основной массе диагностируются аксессуарные минералы – монацит размером 0,01–0,03 мм, молибденит и уранинит размером в тысячные доли миллиметра. Уранинит выявляется по радиационным трекам на f -радиографиях (рис. 3, б).

В процессе гипогенного аутометасоматического преобразования флюорит-барит-сидеритовые карбонатиты в значительной части своего объёма в линейных зонах были обогащены гематитом, бастнезитом второй генерации, целестином. Гематит (спекулярит) в форме таблитчатых метакристаллов размером от 0,05 × 0,2 × 0,2 до 1 × 5 × 5 мм рассеян преимущественно в сидерите (рис. 4, а). Бастнезит второй генерации в форме пластинчатых метакристаллов размером до 1 × 5 мм и их сноповидных сростков включён в сидерит и часто во вкрапленники флюорита (рис. 4, б). Целестин развивается по баритоцелестину. Неравномерное распределение в пространстве рудных залежей гематита и стронциевых минералов заставляет подразделять неокисленные комплексные руды на природные типы (разновидности): флюорит-барит-сидеритовый (гематита до 5 %); флюорит-барит-гематит-сидеритовый (гематита 5–30 %); стронциеносный флюорит-баритоцелестин-гематит-сидеритовый – вместо барита содержит баритоцелестин и местами стронцианит. Типы руд названы по главным минералам (более 5 %) в порядке возрастания их количества. Руды всех типов содержат бастнезит, аксессуарные монацит, молибденит, уранинит.

Минералы рудоносных карбонатитов, по данным микрозондовых определений, имеют некоторые особенности в своём химическом

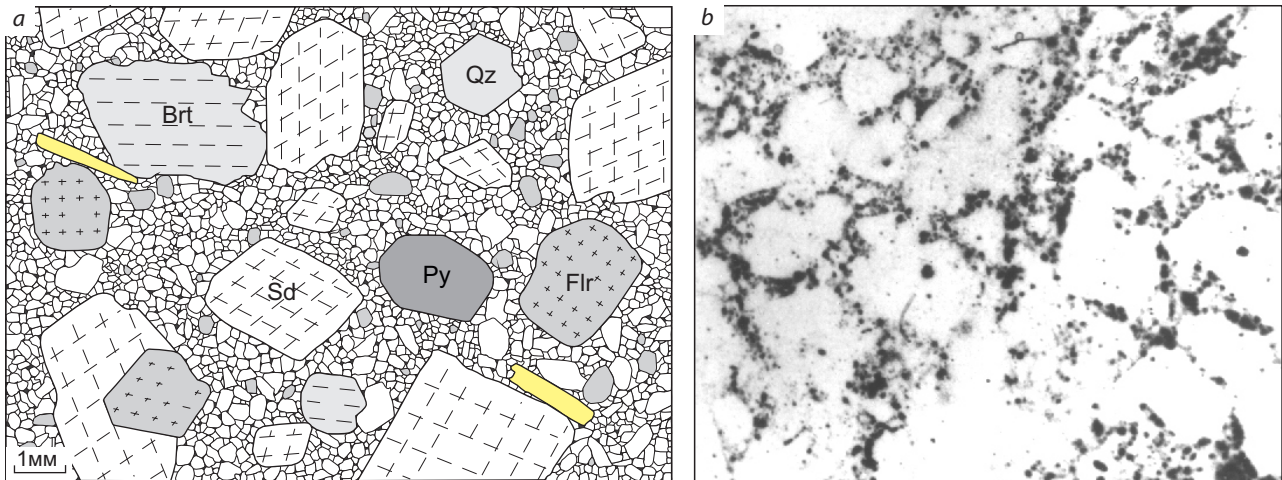


Рис. 3. Порфировидная структура флюорит-барит-сидеритовых карбонатитов (а); *f*-радиография (b) (поле зрения не совпадает с рис. 3, а):

a – во вкрапленниках: Sd – сидерит, Flr – флюорит, Brt – барит, Py – пирит, Qz – кварц, бастнезит (жёлтое); в основной массе аллотриоморфнозернистый флюорит-сидеритовый агрегат; *b* – треки от уранинита (чёрное) тяготеют к основной массе вокруг призматических вкрапленников сидерита и барита (белое)

Fig. 3. (a) Porphyritic structure of fluorite-baryte-siderite carbonatites; (b) F-radiography of the section (the field of view not coincide with Fig. 3 a):

a – phenocrysts: siderite (Sd), fluorite (Flr), baryte (Brt), pyrite (Py), quartz (Qz), bastnaesite (yellow); matrix: allotriomorphic granular fluorite-siderite aggregate; *b* – tracks from uraninite (black) are confined to the matrix around prismatic phenocrysts of siderite and baryte (white)

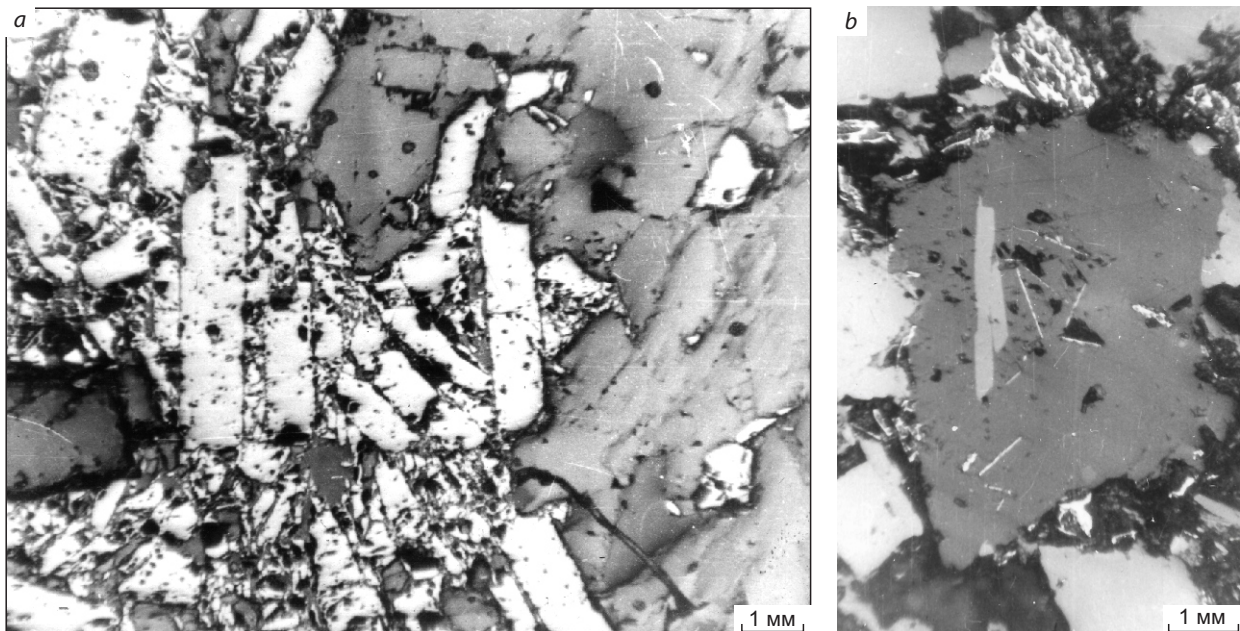
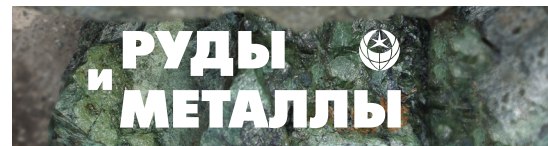


Рис. 4. Скопление таблитчатых метакристаллов гематита (белое) в сидерите (серое) (а); удлинённый метакристалл бастнезита-2 (серое) в порфировом вкрапленнике флюорита (тёмно-серое) (b). Полированные шлифы

Fig. 4. (a) A cluster of tabular hematite metacrysts (white) in siderite (gray); (b) an elongated bastnaesite-2 metacryst (gray) in a fluorite porphyroblast (dark gray). Polished sections



составе [2]. В сидерите FeCO_3 сравнительно невысокое количество примесей (здесь и далее – мас. %): MnO 0,9–1,3; MgO 1,0; CaO 0,7. Во флюорите CaF_2 повышено содержание: TR_2O_3 0,2–0,5; Y_2O_3 0,1; SrO 0,1–0,5. Барит BaSO_4 содержит: SrO 1,0; CaO 0,5. Баритоцелестин (промежуточный минерал в изоморфном ряду барит – целестин) содержит: SrSO_4 46–62; BaSO_4 52–35; CaSO_4 1–4. В бастнезите TRCO_3F сравнительно немного радиоактивных элементов: ThO_2 0,3–0,6; UO_2 0,07. Судя по f -радиографиям, торий и уран распределены в бастнезите равномерно, что указывает на изоморфный характер их примеси.

Окисленные руды

Первичные комплексные руды имеют легко окисляемую сидеритовую основу. В разных залежах на глубину от 100 до 300 м от дневной поверхности в доолигоценое время они были окислены с формированием структуры «железной шляпы» (рис. 5, 6). Переход от «шляпы» к первичным рудам происходит через маломощную (2–5 м) подзону полуокисленных руд. В зоне окисления сидерит и пирит практически полностью замещены гидроксидами железа (агрегатом гётита и гидрогётита). По сидериту образуются псевдоморфозы ячеистопористого сложения (рис. 7). Это приводит к резкому увеличению пористости окисленных руд до 20–25 об. % (пористость первичных руд 5–8 об. %). Естественная влажность окисленных руд 2,3 %, средний объёмный вес 2,70 т/м³. Лёгкая окисляемость сидерита с одновременным появлением крупной пористости способствовали глубокому проникновению зоны окисления в рудные залежи. Зона окисления при этом не сопровождалась корой выветривания в форме существенного глинистого изменения вмещающих алюмосиликатных пород.

По форме и цвету гидроксидов железа выделяются псевдоморфные буровато-чёрные гётитовые руды и жёлто-бурые лимонитовые. Последние являются продуктом более интенсивной гидратации гётитовых руд во вторую стадию гипергенеза. Весьма характерно появление в лимонитовых рудах вторичной пористости с чередованием рыхлых и плотных

агрегатов гидрогётита (по механизму колец Лизеганга). В окисленных рудах почти без изменений сохраняются флюорит, барит, бастнезит, гематит, кварц, апатит, монацит, ксенолиты вмещающих пород. Бастнезит чаще всего включён в агрегаты гидроксидов железа, его вростки также наблюдаются по периферии и внутри зёрен флюорита. В лимонитовых рудах на месте зёрен бастнезита местами наблюдается порошкообразный агрегат гипергенного бастнезита или рабдофанита. Баритоцелестин нередко подвержен выщелачиванию вплоть до образования остаточных псевдоморфоз тонкопористого барита. Молибденит замещается молибдитом. Уранинит исчезает, а уран рассеивается в массе гидроксидов железа.

Вариации в минеральном составе первичных руд наследуются в окисленных рудах и обуславливают выделение разных природных типов. Выделяются: 1) флюорит-барит-гётитовый тип – руды буровато-чёрного цвета с рядовым содержанием (мас. %) барита 12–22, флюорита 6–15, гематита 3–7, TR_2O_3 0,5–1,5 и SrO 0,2–2,0; 2) флюорит-барит-гематит-гётитовый тип – руды буровато-чёрного цвета с гематитом 10–30 %, повышенным содержанием TR_2O_3 1,5–2,5 % и рядовым содержанием барита, флюорита, SrO ; 3) флюорит-барит-лимонитовый тип – руды жёлто-бурого цвета с порошковатыми и плотными натёчными агрегатами гидрогётита, с рядовым содержанием флюорита, барита, TR_2O_3 , SrO ; 4) флюорит-баритоцелестин-гематит-гётитовый тип – руды буровато-чёрного цвета с гематитом 10–30 %, TR_2O_3 1,5–2,5 %, отличаются наличием баритоцелестина и целестина (вместо барита), поэтому содержат SrO от 2 до 35 %. Во всех типах руд 15–25 % их массы составляют кварц и минералы в обломках алюмосиликатных пород (полевые шпаты, слюды, кварц, каолинит, рутил). В окисленных рудах в агрегате гидроксидов железа от первичных руд наследуется рассеянный характер и относительно крупный размер (0,3–10 мм) вкрапленников барита, баритоцелестина, флюорита, бастнезита, гематита. Это благоприятствует применению механических методов для раскрытия и получения минеральных концентратов при обогащении руд.

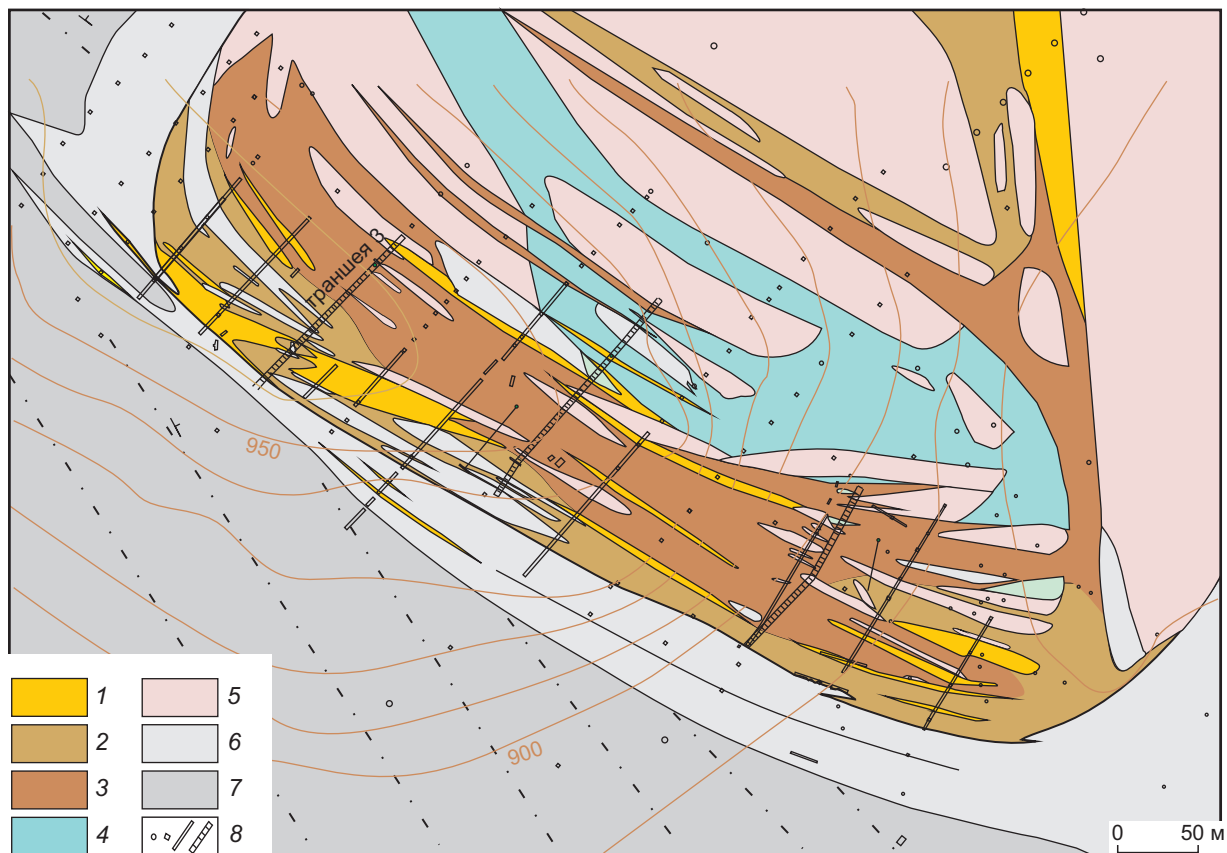


Рис. 5. Геологический план Первой рудной залежи (составлен с использованием материалов Горной экспедиции 1954, Берёзовского ПГО 1983, Тувинской ГРЭ 2005 гг.):

1–3 – окисленные руды: 1 – флюорит-барит-лимонитовая, 2 – флюорит-барит-гётитовая, 3 – флюорит-баритоцелестин-гематит-гётитовая; 4 – гидрогётит-кальцитовая порода (окисленный анкерит-кальцитовый карбонатит); 5 – гранитоиды брекчированные и грейзенизированные; 6 – песчаники и алевролиты интенсивно трещиноватые и брекчированные, осветлённые (серицитизированные); 7 – песчаники и алевролиты первично зелёно-серые и красно-серые; 8 – разведочные выработки (скважина, шурф, канава, траншея ТГРЭ 2005 г. с интервалами бороздовых проб)

Fig. 5. Geological plan of the Pervaya ore lode (compiled using data from the Gornaya Expedition (1954), Beryozovsky PGO (1983), and Tuvinian GRE (2005)):

1–3 – oxidized ores: 1 – fluorite-baryte-limonite, 2 – fluorite-baryte-goethite, 3 – fluorite-barytocelestine-hematite-goethite; 4 – hydrogoethite-calcite rock (oxidized ankerite-calcite carbonatite); 5 – brecciated and greisenized granitoids; 6 – sandstones and siltstones intensely fractured and brecciated, bleached (sericitized); 7 – sandstones and siltstones primarily green-gray and red-gray; 8 – exploration workings (borehole, pit, ditch, and trench, made by the TGRE in 2005, with the channel sampling intervals)

«Богатый» блок первой очереди

В результате ревизионных и оценочных работ 2004–2006 гг. Тувинской ГРЭ с использованием фондовых материалов предшественников на Первой рудной залежи выделен в качестве первоочередного объекта в случае разработки месторождения «богатый» по содержанию РЗМ блок окисленной комплексной

руды. Он оконтурен по бортовому содержанию TR_2O_3 1,5 % с максимальным содержанием в рядовых пробах до 3,1 %. Размер блока 415 × 50 м, глубина 100 м. В нём подсчитаны прогнозные ресурсы цериевых редких земель категории P_1 в количестве 115 тыс. т со средним содержанием TR_2O_3 2,13 % и объёмным весом руды 2,6 т/м³ (протокол апробации ИМГРЭ

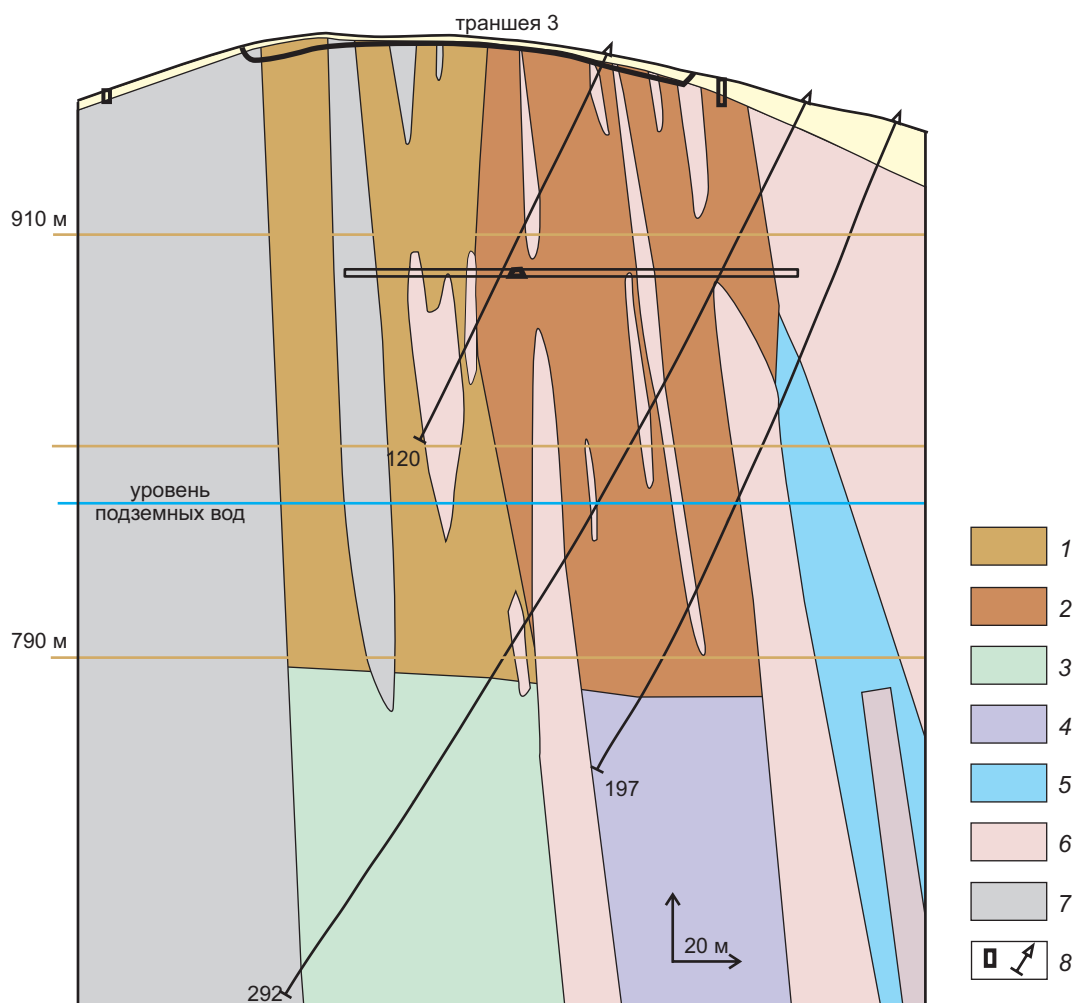


Рис. 6. Разрез по линии траншеи 3 на Первой рудной залежи:

1, 2 – окисленные руды («железная шляпа»): 1 – флюорит-барит-гётитовая, 2 – флюорит-баритоцелестин-гематит-гётитовая; 3, 4 – первичные руды: 3 – флюорит-барит-сидеритовая, 4 – флюорит-баритоцелестин-гематит-сидеритовая; 5 – анкерит-кальцитовый карбонатит; 6 – граниты, 7 – песчаники и алевролиты; 8 – горные выработки и скважины

Fig. 6. Section along the Trench 3 at the Pervaya ore lode:

1, 2 – oxidized ores ("iron hat"): 1 – fluorite-baryte-goethite, 2 – fluorite-barytocelestine-hematite-goethite; 3, 4 – primary ores: 3 – fluorite-baryte-siderite, 4 – fluorite-barytocelestine-hematite-siderite; 5 – ankerite-calcite carbonatite; 6 – granites, 7 – sandstones and siltstones; 8 – mining workings and boreholes

№ 10 от 20.12.2006). Комплексная руда в «богатом» блоке представлена преимущественно флюорит-баритоцелестин-гематит-гётитовым типом (рис. 8).

В средний химический состав руды в блоке входят (мас. %): SrSO_4 25,5; BaSO_4 14,0; Y 0,020; Th 0,010; U 0,003; Mo 0,028. На уровне кларковых фоновых концентраций в рудах

определяются Cu, Pb, Zn, Co, Ni, Cr, Sc, V, Nb, Ta, Zr, Hf, Be, Li, Cs. Средний минеральный состав блока (мас. %): гётит 13; гидрогётит 11; гематит 11; баритоцелестин 27; Ва-целестин 11; барит 2; флюорит 6; бастнезит 2,3; монацит 0,2; апатит 0,5; кварц 7; полевые шпаты 4; слюды 3. В отдельных находках диагностировались реликтовые минералы – молибденит, уранинит,

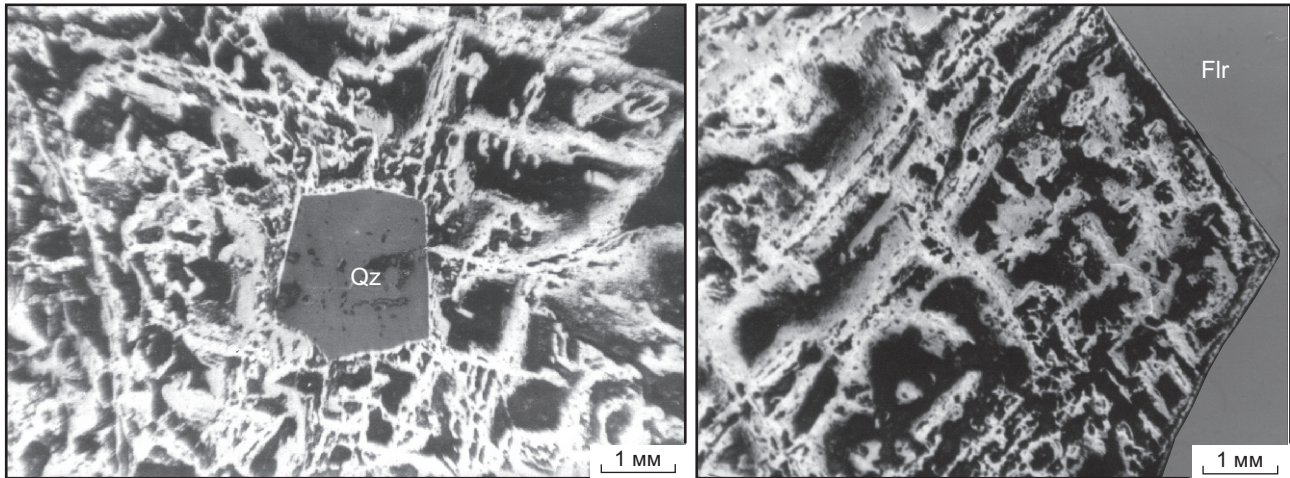


Рис. 7. Гётит-гидрогётитовые ячейисто-пористые псевдоморфозы по сидериту: гидроксиды железа (светло-серое), кварц (Qz), флюорит (Flr), пустоты (чёрное). Полированные шлифы

Fig. 7. Goethite-hydrogoethite cellular-porous pseudomorphs after siderite:

iron hydroxides (goethite-hydrogoethite) (light gray), quartz (Qz), and fluorite (Flr); voids (black). Polished thin sections

торианит, торит, ксенотим. Среди новообразованных гипергенных минералов, кроме гётита, гидрогётита, гидрогематита, определяются малораспространённые: лепидокрокит, ферригидрит, ярозит, гидроксиды марганца, рабдофанит, молибдит, урановые слюдки, малахит, стронцианит, кальцит, галлуазит, каолинит. Отличительной чертой «богатого» блока, помимо повышенного содержания РЗО, является высокое содержание баритоцелестина и целестина (в сумме 38 %), пониженное содержание флюорита (6 %). В целом для окисленных руд месторождения содержание урана оценивается в 0,019 % (табл. 1), что обуславливает естественную радиоактивность на обнажённой поверхности рудных залежей на уровне до 40–50 мкР/час. Экологически благоприятным качеством «богатого» блока является минимальное по месторождению содержание урана (0,003 %) и тория (0,01 %).

Рассчитанный поминеральный баланс РЗО в рудах (отн. %): бастнезит – 90; монацит – 5,5; флюорит и гидроксиды железа – 4,5. Средний химический состав бастнезита (мас. %): La_2O_3 21,2; Ce_2O_3 35,2; Nd_2O_3 9,7; остальные РЗО 6,0; Y_2O_3 0,5; ThO_2 0,5; UO_2 0,07; CaO 0,4; SrO 0,5; BaO 0,6; SO_3 0,4. По соотношению индивидуальных редкоземельных элементов руды Карасугского месторождения характеризуются

резким преобладанием элементов цериевой группы (лёгких лантаноидов от лантана до неодима). Это типично для бастнезитовых месторождений мира, таких как Маунтин-Пасс в США, Баюнь-Обо (Баян-Обо) в Китае (табл. 2). Следует обратить внимание на флюорит Карасугского месторождения: он содержит в среднем TR_2O_3 0,4 %, Y_2O_3 0,15 % и отличается аномальной обогащённостью средними и тяжёлыми лантаноидами (от самария до лютеция), суммарная доля которых 35 отн. %. Технологическая возможность извлечения из карасугского флюорита особо ценных иттриевых РЗМ требует изучения.

Технологические исследования руд

Технологические исследования обогатимости руд Карасугского месторождения проводились в каждом из трёх периодов геолого-разведочных работ. В первом периоде в институтах ВИМС (г. Москва; Г. А. Смелянская, О. И. Хонина, Л. В. Зверев, 1950) и «Механообр» (г. Ленинград; В. И. Выменец, Ф. С. Исаева, 1959; Б. М. Лакота, 1961) была разработана магнитно-флотационная схема получения железного, флюоритового и баритового концентратов, стронциевого продукта, из металлургического шлака извлекались уран и редкие земли.

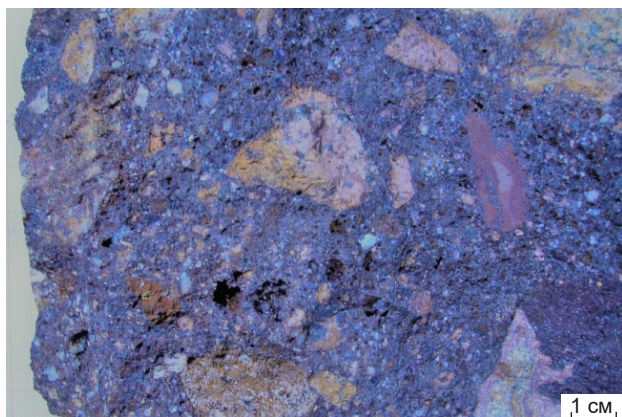


Рис. 8. Флюорит-баритоцелестин-гематит-гётитовая руда с угловатыми обломками гранитов: образец половинки керна (скважина № 3 – 119 м)

Fig. 8. Fluorite-barytocelestine-hematite-goethite ore with angular fragments of granites. Half-core sample (Borehole No. 3 – 119 m)

В 1979–1983 гг. в ВИМС (В. Е. Лифиренко, Н. В. Петрова, Э. П. Николаева и др., 1983) были изучены лабораторные технологические пробы – пять проб окисленных и две пробы неокисленных руд со Второй рудной залежи. Была также отобрана опытно-промышленная проба окисленных руд, которая осталась неисследованной. В результате изучения лабораторных проб разработаны схемы переработки первичных и окисленных комплексных руд на основе магнитно-флотационного механического обогащения с последующей химико-металлургической переработкой продуктов [4]. Из окисленных руд получены кондиционные концентраты – железный для металлургического передела, баритовый (утяжелитель буровых растворов и для химической промышленности), флюоритовый марки ФФ-90, бастнезитовый и кварц-полевошпатовый со слюдой. Получены также химические продукты – полирит (порошкообразный полирующий материал с содержанием 98 % TR_2O_3), азотнокислый барий, азотнокислый стронций, плавиковая кислота, парамолибдат аммония, урановый продукт. Извлечение урана в отдельный продукт одновременно очищает от его вредной примеси остальные продукты и концентраты. Проведённые технико-экономические расчёты (Ю. А. Соколовский, Л. В. Пи-

рогова, Л. П. Каташова, 1983) на то время показали рентабельность возможного предприятия при условии реализации всего комплекса извлекаемых полезных компонентов.

В 2004–2006 гг. в ВИМС на двух лабораторных пробах из «богатого» блока Первой залежи проведено дальнейшее исследование обогатимости окисленных руд. Уточнена комбинированная технологическая схема, состоящая из операций рудоподготовки (дробление, измельчение, классификация, обесшламливание), магнитной сепарации и флотации. Определена оптимальная крупность дробления исходной руды для максимального раскрытия рудных минералов – 0,3 мм. Подтверждено, что в качестве товарных продуктов возможно получение железного концентрата различных сортов, флюоритового и баритового (баритоцелестинового) концентратов, кварц-полевошпатового продукта. Достигнуто извлечение редких земель в количестве 56,6 % в бастнезитовый концентрат. Благоприятным качеством исследованных руд является достаточно низкое содержание урана в технологических пробах – 0,0039 % – и в целом в «богатом» блоке – 0,003 %. Невысоко и содержание тория – соответственно 0,011 % и 0,010 %. Показана неэффективность применения методов гравитационного обогащения и перспективность магнитных методов для выделения железных концентратов различного сорта.

Запасы и прогнозные ресурсы

Запасы и ресурсы комплексных руд и отдельных компонентов на Карасугском месторождении оценивались неоднократно с разной степенью достоверности. По последней оценке, прогнозные ресурсы РЗО в целом по окисленным и первичным рудам по всему рудному полю приняты по категории P_2 в количестве: руды – 370 млн т; суммы РЗО (TR_2O_3) – 3,7 млн т со средним содержанием 1,0 % (протокол ИМГРЭ № 10 от 20.12.2006). При предполагаемой производительности рудника до 300 тыс. т руды в год (до 3–6 тыс. т суммы РЗО) указанных прогнозных ресурсов хватит на тысячу лет. Этот временной фактор отодвигает практическое внимание к первичным рудам на далёкое будущее. На исторически

Табл. 2. Состав редких земель в мировых месторождениях (лантаноиды, отн. %)

Table 2. Composition of rare earths in world mineral deposits (lanthanides, rel. %)

Месторождения	TR ₂ O ₃ , мас. %	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Сумма
Карасуг, «богатый» блок, РЗМ	2,13	30,9	48,8	4,3	12,8	1,35	0,37	0,97	0,08	0,27	0,03	0,08	0,01	0,06	0,006	100
Карасуг, флюорит, РЗМ	0,4	9,5	26,2	6,8	22,4	5,4	3	7	1,5	10,5	1,6	2,5	0,5	2,5	0,6	100
Томтор, уч. Буранный, РЗО	10,6	20,8	50,4	4,48	17,36	2	0,64	2	0,16	1,2	0,16	0,32	0,08	0,32	0,08	100
Баюнь-Обо, РЗО	3–5,4	27	50	5	15	1,1	0,2	0,4	0,1	0,1						98,9
Маунтин-Пасс, РЗМ	8,8	30	53	4	12	0,6	0,12	0,22	0,01		0,004		0,001	0,005		99,96

обозримый период для перспективной оценки редкоземельности Карасугского месторождения можно ограничиться подсчитанными запасами окисленной комплексной руды, причём только залежей № 1, 2 и 3, в которых повышено среднее валовое содержание суммы РЗО: 1,15; 1,19 и 1,32 % (табл. 1 и 3).

Запасы руды в трёх залежах составляют 70 млн т, средневзвешенное содержание суммы РЗО – 1,20 %, количество РЗО – 0,84 млн т. Из этого количества можно выбрать блоки со средним содержанием РЗО около 2,0 %. Один такой «богатый» блок с содержанием РЗО 2,13 % и ресурсами 115 тыс. т выделен на Первой рудной залежи. На Второй залежи в 1980 г. Берёзовским ПГО отбирались технологические пробы с содержанием РЗО 1,84 % (проба 1К), 1,79 % (6К) и 1,92 % (8К). На участках отбора этих проб возможно локализовать блоки с более высоким содержанием РЗО. Запасы других компонентов окисленных руд стоит рассматривать в объёме тех же 70 млн т руды (табл. 3). Рассчитанные запасы BaSO₄ 11,4 млн т, CaF₂ 6,8 млн т и SrO 1,8 млн т относятся к категории весьма крупных. Для сравнения отметим, что крупнейшее в РФ месторождение барита Кварцитовая Сопка имеет запасы 5,3 млн т, крупнейшее флюоритовое месторождение Вознесенское – 4,9 млн т, крупное целестиновое Мазуевское месторождение – 1,77 млн т SrO.

Приблизительная стоимостная оценка извлекаемых из руд Карасугского месторождения полезных продуктов показывает, что около половины стоимости приходится на неразделённый редкоземельный продукт (полирит, мишметалл или бастнезитовый концентрат). Другая половина приходится на железный, баритовый, флюоритовый концентраты, ценные химические соединения F, Ba, Sr, Mo, U. Это означает, что с учётом пересчёта попутных компонентов на основной компонент условное содержание в руде суммы РЗО достигает не менее 4 %.

Горнотехнические и гидрогеологические условия

Горнотехнические условия Карасугского месторождения для открытой разработки окисленных руд простые. Большинство рудных залежей (№ 1, 2, 4, 5, 6) слагают холмы обнажённых на дневной поверхности руд. Делювиальный слой мощностью до 3 м представлен в основном рудными обломками в лимонит-глинистом цементе. В начальный период разработки можно практически избежать попадания в контур карьера пустых боковых пород. Внутри рудных залежей крупные блоки алюмосиликатных пород легко опознаются визуально по внешним признакам, поэтому пустые блоки размером более 1 м могут быть селективно извлечены и помещены в отвал.

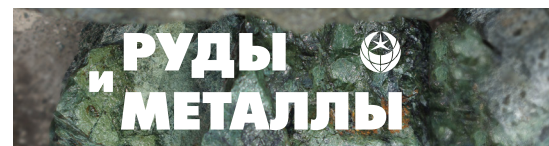


Табл. 3. Химический состав и запасы окисленных руд в залежах 1, 2 и 3 (из данных Горной экспедиции, см. табл. 1)

Table 3. Chemical composition and reserves of oxidized ores in the lodes 1, 2, and 3 (based on data by the Gornaya Expedition, see Table 1)

Рудные залежи №	1	2	3	Среднее, %	Запасы, млн т
Руда, млн т	25,18	31,88	12,59		70
Компоненты, мас. %:					
Fe валовое	28,36	30,03	32,36	29,8	20,9
BaSO ₄	12,31	17,66	20,70	16,3	11,4
CaF ₂	6,62	11,39	11,50	9,7	6,8
SrO	2,46	2,01	4,15	2,6	1,8
TR ₂ O ₃ (сумма PЗO)	1,15	1,19	1,32	1,2	0,84
S валовая	3,24	2,73	3,10	3,0	
MnO	0,295	0,675	0,255	0,46	
P	0,151	0,112	0,100	0,12	
TiO ₂	0,18		0,195	0,10	
SiO ₂	15,44	11,82	8,44	12,5	
Al ₂ O ₃	3,46	5,92	3,06	4,5	
Mo	0,045	0,025	0,020	0,03	

Разграничение рудных типов по содержанию гематита, флюорита, сульфатов также возможно по визуальному наблюдению, что сведёт к минимуму опробование при эксплуатационной разведке. Окисленные руды всех разновидностей в бортах траншей и керне скважин сохраняют крепость и устойчивость (рис. 8), вместе с тем они сравнительно легко поддаются экскавации бульдозером. В этой связи не ожидается применение буровзрывных работ при добыче.

Гидрогеологические условия на Первой и Второй залежах весьма простые (Д. Н. Шаповалов и др., 2006). По наблюдениям в скважинах, уровень безнапорных трещинных вод залегает ниже 100 м – дна предполагаемого карьера на стадии полной отработки окисленных руд. Водоприток, включая метеорные воды, ожидается слабый, воды будут уходить свободной фильтрацией через дно карьера в нижележащий водоносный горизонт. Подземные воды в контуре рудных залежей сульфатно-гидрокарбонатного состава, неагрессивные. Из нормируемых для питьевых вод показателей повышенным содержанием относительно предельно допустимой концентрации (ПДК) отличаются: железо общее (до 0,7 мг/л; до 2,3 ПДК), фтор (от 0,2 до 1,8 мг/л; до 1,2 ПДК) и марганец

(до 0,3 мг/л; до 3 ПДК). На несколько порядков ниже ПДК в водах определялись U, Sr, Ba, Mo, Cr, Co, Zn, Cu, Pb, Cd, Ni. Для технических целей можно использовать любые подземные воды на участке разработки. Для хозяйственно-питьевого водоснабжения в летний период подходят также поверхностные воды ручья Кара-Суг (зимой промерзают до дна). Разработка карьера не внесёт существенных изменений в гидрохимическую обстановку на участке по сравнению с существующим состоянием естественного выхода руд на дневной поверхности.

Месторождение расположено в холмистой степной зоне. В 1,5 км от месторождения на залесённом склоне хребта Западного Танну-Ола возможна лесозаготовка лиственницы для ограниченных технических целей. Для отопления вахтового посёлка может быть использован добываемый в 27 км бурый уголь из Чаданского разреза. Климат в районе (село Ак-Дуруг) отличается тёплым летом (среднесуточная температура 14...17 °С) и не слишком суровой зимой (-21...-23 °С). Среднегодовая температура -1,4 °С. Среднегодовые осадки 53 мм, выпадают в летний период. Климат позволяет проводить работы на месторождении круглогодично.

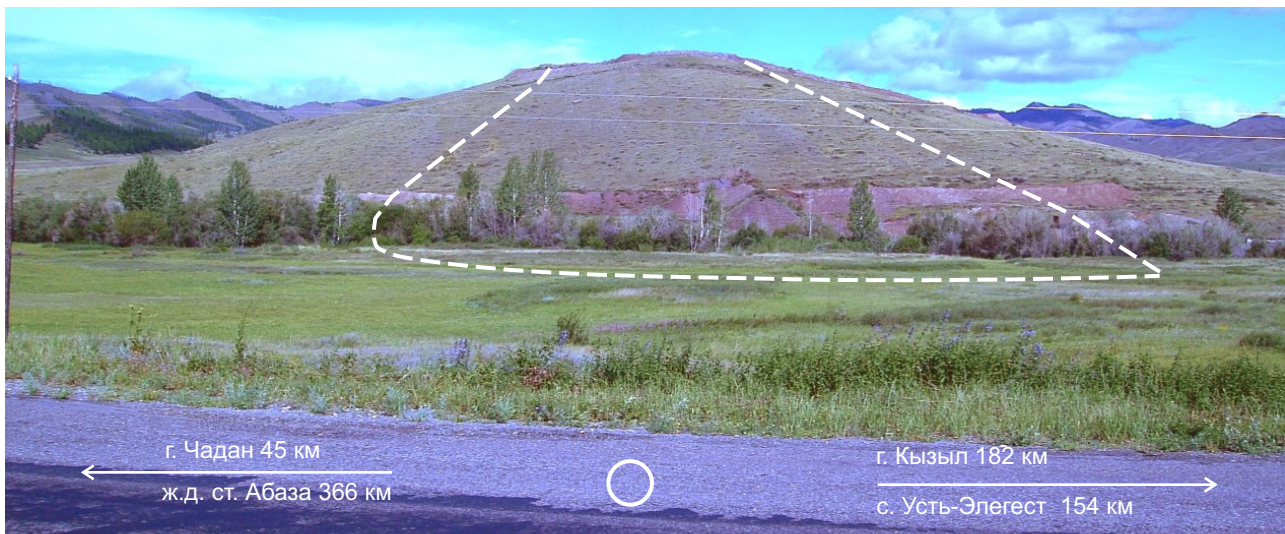


Рис. 9. Вид на Первую рудную залежь (пунктирная линия) с шоссе Кызыл – Абаза (фото автора, 2005 год)

Fig. 9. View of the Pervaya ore lode (dotted line) from the Kyzyl-Abaza highway (photo by the author, taken in 2005)

В верховье ручья Кара-Суг находится известный местному населению источник лечебных питьевых вод (аржаан). От будущего карьера источник удалён на 3,5 км и может быть использован в прежнем режиме. Благоприятным экологическим фактором для жителей района является удалённость мест их постоянного проживания на 12–29 км от карьера.

Географо-инфраструктурные условия

Сведения о развитии инфраструктурной обстановки в регионе взяты из различных интернет-источников. Перспективы промышленного освоения многих минеральных объектов Тувы зависят от прокладки в республику железной дороги. Строительство такой дороги уже начиналось в 2011 г., когда был уложен первый километр пути около города Кызыл. Затем проект был отложен, но в последнее время в средствах массовой информации возобновилась дискуссия о необходимости дороги. Проектом предусмотрено строительство ответвления от станции Курагино Красноярской железной дороги до города Кызыл (411 км) и далее до посёлка Элегест, где расположены угольные месторождения (см. вставку на рис. 1). Крупнейшее из них – Элегестское – со-

держит около 900 млн т балансовых запасов качественного коксующегося угля марки «Ж». Планируемый объём грузоперевозок – 15 млн т в год. Прорабатывается вопрос о продолжении дороги в Монголию и Китай.

Грядущая прокладка железной дороги в Туву актуализирует вопрос о геолого-экономической переоценке объектов минерально-сырьевой базы республики. Карасугское месторождение расположено в центральной части республики в Чаа-Хольском муниципальном районе (кожууне). Строительство железной дороги облегчит связь месторождения с основными металлургическими центрами юга Сибири – городами Абакан (697 км по линии Карасуг – Кызыл – Курагино – Абакан) и далее Красноярск (от Карасуга 828 км), Новокузнецк (961 км), Кемерово (1275 км), Новосибирск (1480 км). Если, как планируется, железная дорога будет доведена до посёлка Элегест, то от него до Карасугского месторождения остаётся 154 км по асфальтовой дороге Р-257 (рис. 9). На той же дороге находятся ближайшие населённые пункты: село Ак-Дуруг (12 км; население 1,3 тыс. человек), село Чаа-Холь (29 км; 3,3 тыс. чел.), город Чадан (45 км; 9,7 тыс. чел.). Следовательно, недостатка в местной рабочей силе не предвидится. К тому же



многие жители имеют опыт долголетней разработки Чаданского бурогоугольного разреза.

Решается в республике и проблема энергодефицита. Тува получает электроэнергию по двум магистральным линиям электропередачи напряжением 220 кВ из Хакасии (Абаза – Ак-Довурак – Чадан) и Красноярского края (Ергаки – Туран – Кызыл). В 2015 г. «Россети ФСК ЕЭС» построила новую магистраль Кызыл – Чадан, соединив обе линии в энергокольцо, что увеличило максимально допустимый переток мощности в энергосистему Тувы до 240 МВт. ЛЭП-220 вместе с автомобильным шоссе проходят в трёхстах метрах от Первой рудной залежи Карасугского месторождения (рис. 9).

Комплексный состав карасугских руд делает некорректной оценку их качества по содержанию отдельных компонентов. Важно, что в сумме промышленно ценные минералы (гидроксиды железа, гематит, Ва-Sr-сульфаты, флюорит, бастнезит) составляют не менее 80 мас. %. Более того, получаемый при переработке руд флотационный кварц-слюдистополевошпатовый продукт предложено использовать как керамическое сырьё [4]. Цифра 80 % классифицирует комплексные руды как весьма богатые. Такие руды допускают транспортировку на переработку в южносибирские промышленные центры без существенного увеличения транспортных расходов по сравнению с обогащением руды на месте добычи в Туве и последующей транспортировкой продуктов в сибирские центры, тем более что там находятся и потенциальные потребители продуктов переработки комплексных руд. На базе карасугского рудника возможна организация крупнокускового дробления руды и её погрузка в транспортируемые герметичные контейнеры.

Томтор или Карасуг

Томторское месторождение многими рассматривается как главный в нашей стране источник редкоземельных металлов на исторически долгий срок. Выдающимся качеством этого месторождения является высокое среднее содержание на разведанном Буранном участке редких земель – 12,5 % TR_2O_3 – и ни-

обия – 6,7 % Nb_2O_5 . Запасы РЗО крупные – 3233 тыс. т. Их хватит на несколько сотен лет разработки. Но этот фактор может стать значимым только через много десятков лет по исчерпанию рентабельных запасов Карасугского месторождения в случае его освоения. В этом свете не имеют значения и «колоссальные» общие прогнозные ресурсы Томторского района – TR_2O_3 153,7 млн т и Nb_2O_5 73,6 млн т [9]: дело до них дойдёт нескоро.

Содержание (относительная доля) индивидуальных металлов в неразделённой сумме редкоземельных металлов на сравниваемых объектах приведено в таблице 2. На Карасуге спектр РЗМ примерно такой же, как и на бастнезитовых месторождениях Баюнь-Обо и Маунтин-Пасс. Карасуг уступает Томтору по доле наиболее дорогостоящих «тяжёлых» (иттриевой группы) индивидуальных РЗМ. Впрочем, раздельное получение индивидуальных РЗМ – это самостоятельная технологическая проблема, которая решается на специализированном предприятии. Редкоземельные продукты обогащения любого из месторождений для последующего разделения подлежат поставке на такое стороннее предприятие.

По остальным важным показателям Томтор значительно уступает Карасугу. На текущий момент нет окончательной ясности с технологией переработки томторской руды. Редкие земли находятся в форме фосфатных минералов – крандаллита и монацита. Руды исключительно трудны в обогащении из-за полиминерального состава и тонкодисперсного сложения, исключающего получение мономинеральных концентратов. Очень сложно и раздельное гидрOMETаллургическое извлечение компонентов. Высокое содержание в фосфатных рудах радиоактивных элементов, урана (0,01 % U) и особенно тория (0,15 % ThO_2) создаёт экологическую проблему на всех стадиях добычи, транспортировки, переработки руды и захоронения отходов [5]. На Карасуге содержание радиоактивных элементов в «богатом» блоке на порядок ниже – 0,003 % U и 0,010 % ThO_2 , и в концентратах других компонентов содержание этих «вредных» элементов находится в допустимых нормах пределах.

На Томторе на Буранном участке пластовая рудная залежь мощностью от 0,2 до 42 м перекрыта чехлом пустых и сильно увлажнённых осадочных пород мощностью от 7,5 до 160 м. Участок находится в условиях сплошной многолетней мерзлоты глубиной более 165 м [5]. В таких условиях потребуются большой объём вскрышных работ в мёрзлых породах. Работы в карьере предполагается вести с октября по апрель в холодное и тёмное время года, а в остальные месяцы придётся поддерживать функционирование предприятия без добычи руды.

В районе Томторского месторождения почти полностью отсутствует транспортная и энергетическая инфраструктура. В 630 км находится посёлок и замерзающий морской порт Хатанга. Материально-техническое и любое другое обеспечение работ возможно лишь завозом по Северному морскому пути (СМП) до Хатанги и затем по зимнику до месторождения. Обратным путём вывоз необогащённой руды предполагается по СМП до порта на Дальнем Востоке и далее железной дорогой до города Краснокаменска в Забайкальском крае. Там предполагается строительство гидрометаллургического завода с мощностью по переработке руды до 160 тыс. т в год [5]. В гораздо более простых логистических условиях находится Карасугское месторождение.

Различны и социально-экономические последствия освоения месторождений. На Томторе это ожидаемые трудности с поиском и обустройством рабочих кадров для полугодовой работы вахтовым методом в условиях заполярного климата. На Карасуге же это высокооплачиваемая работа для многих местных жителей в полчасе езды от дома служебным транспортом. Что касается расширения налоговой базы, то Республике Тыва, одному из наиболее дотационных регионов России, оно необходимо даже более, чем Республике Саха (Якутия).

Заключение

Карасугское месторождение заключает в себе многокомпонентные U-Mo-Fe-F-Ba-Sr-TR руды, которые более чем на 80 % сложены про-

мышленными минералами. Запасы редких земель, стронция, барита, флюорита относятся к категории крупных. Разработана принципиальная технологическая схема переработки руд с получением широкого ассортимента продуктов: бастнезитовый концентрат, полирит или мишметалл, железный, баритовый и флюоритовый концентраты, химические соединения фтора, бария, стронция, молибдена, урана. Все компоненты востребованы в нашей стране. Из них частично импортируются из-за рубежа: барит и уран – из Казахстана, флюорит – из Монголии, редкоземельные металлы и стронций – из Китая. Избыток стронция в некоторых типах руд Карасугского месторождения в форме баритоцелестина может быть утилизирован в составе баритового концентрата в качестве бурового утяжелителя.

Карасугское месторождение находится в простых для открытой отработки горнотехнических и гидрогеологических условиях. Месторождение связано шоссейной дорогой и линией электропередач с городом Кызыл. Прокладка в Туву запроектированной железной дороги значительно облегчит транспортную связь с южно-сибирскими металлургическими центрами. В таких условиях Карасугское месторождение, в случае его вовлечения в эксплуатацию, будет иметь много конкурентных преимуществ перед другими редкоземельными объектами РФ. Это надо учитывать при разработке планов промышленного освоения таких месторождений, как Томтор, Чуктукон, Белая Зима, Катугино, Ловозеро.

Труднообогащаемые фосфатные руды Томторского месторождения залегают в сложных горно-геологических условиях, затраты на их добычу и переработку велики по сравнению с легкообогащаемыми бастнезитовыми рудами китайского месторождения Баюнь-Обо (запасы TR_2O_3 40 млн т, содержание 3–5,4 %). Следовательно, добываемые на Томторе редкоземельные металлы по рентабельности не смогут быть конкурентоспособными на мировом рынке. Их задача будет ограничена удовлетворением внутренних потребностей РФ, а с этим вполне справится и Карасугское месторождение.



Для более аргументированного суждения о промышленных перспективах Карасугского месторождения необходима углублённая многовариантная геолого-экономическая оценка всего комплекса условий, в которых находится

объект. Оценка должна включать вариант с постройкой железной дороги в Республику Тыва. Оба проекта – Карасуг и железная дорога – могут поддерживать друг друга в своём экономическом и социальном обосновании.

Список литературы

1. Болонин А. В., Кайкова Т. М., Комарницкий Г. М. О карбонатитовой природе комплексного железо-флюорит-барит-редкоземельного месторождения // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 1984. – № 3. – С. 59–64.
2. Болонин А. В., Никифоров А. В. Химический состав минералов карбонатитов Карасугского месторождения в Туве // Геология рудных месторождений. – 2004. – Т. 46, № 5. – С. 427–443.
3. Геологическая карта Тувинской АССР, масштаб 1 : 500 000 / гл. ред. Подкаменный А. А., Шерман М. Л. – Министерство геологии СССР, 1983.
4. Лифиренко В. Е., Башлыкова Т. В., Николаева Э. П., Спирина И. С. Флотационное обогащение окисленных редкоземельных фтор-стронций-барий-железных руд / Флотационные реагенты. – М. : Наука, 1986. – С. 116–120.
5. Матвеев А. И., Толстов А. В., Петров И. М. Схема создания редкометалльного кластера в Республике Саха (Якутия). – DOI : 10.31242/2618-9712-2025-30-1-7-27 // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2025. – № 30 (1). – С. 7–27.
6. Митропольский А. С. Гидротермальные комплексные железорудные месторождения / Железорудные месторождения Алтае-Саянской складчатой области. – М. : Изд-во АН СССР, 1959. – Т. 1, кн. 2. – С. 498–511.
7. Никифоров А. В., Болонин А. В., Покровский Б. Г., Сугоракова А. М., Чугаев А. В., Лыхин Д. А. Геохимия изотопов (O, C, S, Sr) и Rb-Sr возраст карбонатитов Центральной Тувы // Геология рудных месторождений. – 2006. – Т. 48, № 4. – С. 296–319.
8. Никифоров А. В., Болонин А. В., Сугоракова А. М. и др. Карбонатиты Центральной Тувы: геологическое строение, минеральный и химический состав // Геология рудных месторождений. – 2005. – Т. 47, № 4. – С. 360–382.
9. Похиленко Н. П., Афанасьев В. П., Толстов А. В., Крук Н. Н., Похиленко Л. Н., Иванова О. А. Перспективы развития и проблемы освоения сырьевой базы дефицитных стратегических видов твердых полезных ископаемых Сибири. – DOI : 10.31857/S0016777023050088, EDN: YONCHO // Геология рудных месторождений. – 2023. – Т. 65, № 5. – С. 476–492.

References

1. Bolonin A. V., Kaikova T. M., Komarnitskii G. M. O karbonatitovoi prirode kompleksnogo zhelezoflyuorit-barit-redkozemel'nogo mestorozhdeniya [On the carbonatite nature of a complex iron-fluorite-barite-rare earth deposit], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka* [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration], 1984, No 3, pp. 59–64. (In Russ.)
2. Bolonin A. V., Nikiforov A. V. Khimicheskii sostav mineralov karbonatitov Karasugskogo mestorozhdeniya v Tuve [Chemical composition of minerals of carbonatites of the Karasug deposit in Tuva], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 2004, V. 46, No 5, pp. 427–443. (In Russ.)
3. Geologicheskaya karta Tuvinskoi ASSR, masshtab 1 : 500 000, gl. red. Podkamennyi A. A., Sherman M. L. [Geological map of the Tuva ASSR, scale 1 : 500,000, eds. Podkamennyi A. A., Sherman M. L.], Ministerstvo geologii SSSR [USSR Ministry of Geology Publ.], 1983.
4. Lifirenko V. E., Bashlykova T. V., Nikolaeva E. P., Spirina I. S. Flotatsionnoe obogashchenie oksislenykh redkozemelnykh fluor-strontsiy-barij-zheleznykh rud [Flotation enrichment of oxidized rare earth fluorine-strontium-barium-iron ores]. In : Flotatsionnye reagenty [Flotation reagents], Moscow, Nauka Publ., 1986, pp. 116–120.
5. Matveev A. I., Tolstov A. V., Petrov I. M. Skhema sozdaniya redkometall'nogo klastera v Respublike Sakha (Yakutiya) [Scheme of creation of rare metal cluster in the Sakha Republic (Yakutia)], *Prirodnye resursy Arktiki i Subarkтики* [Natural

- resources of the Arctic and Subarctic*], 2025, No 30 (1), pp. 7–27. (In Russ.) DOI: 10.31242/2618-9712-2025-30-1-7-27.
6. Mitropol'skii A. S. Gidrotermal'nye kompleksnye zhelezorudnye mestorozhdeniya [Hydrothermal complex iron ore deposits]. In: Zhelezorudnye mestorozhdeniya Altae-Sayanskoi skladchatoi oblasti [Iron ore deposits of the Altai-Sayan folded region], Moscow, Izdatel'stvo AN SSSR [USSR Academy of Sciences Publ], 1959, V. 1, book 2, pp. 498–511.
 7. Nikiforov A. V., Bolonin A. V., Pokrovskii B. G., Sugorakova A. M., Chugaev A. V., Lykhin D. A. Geokhimiya izotopov (O, C, S, Sr) i Rb-Sr vozrast karbonatitov Tsentral'noi Tuvy [Geochemistry of isotopes (O, C, S, Sr) and Rb-Sr age of carbonates of Central Tuva], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 2006, V. 48, No 4, pp. 296–319. (In Russ.)
 8. Nikiforov A. V., Bolonin A. V., Sugorakova A. M. et al. Karbonatity Tsentral'noi Tuvy: geologicheskoe stroenie, mineral'nyi i khimicheskii sostav [Carbonates of Central Tuva: geological structure, mineral and chemical composition], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 2005, V. 47, No 4, pp. 360–382. (In Russ.)
 9. Pokhilenko N. P., Afanas'ev V. P., Tolstov A. V., Kruk N. N., Pokhilenko L. N., Ivanova O. A. Perspektivy razvitiya i problemy osvoeniya syr'evoi bazy defitsitnykh strategicheskikh vidov tverdykh poleznykh iskopaemykh Sibiri [Development prospects and problems of developing the raw material base of scarce strategic types of solid minerals in Siberia], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 2023, V. 65, No 5, pp. 476–492. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0016777023050088, EDN: YOHCCHO.

Болонин Александр Васильевич (bolonin@tsnigri.ru)

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

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

Alexandr Vasilievich Bolonin

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher

Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals (FSBU TsNIGRI), Moscow, Russia

МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА, ПОИСКОВ, ОЦЕНКИ
И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 550.80:543.421/.424

Опыт применения ИК-микроскопии для исследования типоморфизма циркона при прогнозе и поисках месторождений цветных и благородных металлов

Хачатрян Г. К., Кряжев С. Г.
ЦНИГРИ, г. Москва, Россия

Аннотация. На примерах изучения кристаллов циркона, отобранных на Мечивеевской площади (Охотско-Чукотский вулканоплутонический пояс), в Сухоложском рудном поле и на месторождении Наталка, показана перспективность применения ИК-микроскопии при прогнозе и поисках месторождений цветных и благородных металлов. Важной типоморфной характеристикой циркона по данным ИК-микроскопии является степень структурного совершенства кристаллов. Этот диагностический признак зависит от состава, возраста, условий кристаллизации минерала и служит одним из критериев для выделения его генераций на поисковых площадях с множественными источниками циркона. Например, в ареалах развития потенциально золотоносных углеродисто-терригенных комплексов, прогнозно-поисковое значение имеет метасоматический новообразованный циркон, возраст которого совпадает со временем проявления основных этапов рудообразования.

Одним из показателей интенсивности гидротермальных преобразований циркона, определяемых по его ИК-спектрам, является относительное содержание адсорбированной воды в кристалле. Данный признак наиболее эффективен при поисках в районах развития относительно молодых вулканогенных и интрузивных формаций.

Ключевые слова: циркон, кристалл, U-Pb возраст, структурное совершенство, гидроксильные группы, адсорбированная вода, типоморфизм, ИК-микроскопия, ИК-спектр, рудные месторождения. Для цитирования: Хачатрян Г. К., Кряжев С. Г. Опыт применения ИК-микроскопии для исследования типоморфизма циркона при прогнозе и поисках месторождений цветных и благородных металлов. Руды и металлы. 2026. № 1. С. 25–34. DOI: 10.47765/0869-5997-2026-10002.

The practice of the zircon typomorphism studies using IR microscopy as applied to forecasting and prospecting for base and precious metals deposits

Khachatryan G. K., Kryazhev S. G.

Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals (FSBU TsNIGRI), Moscow, Russia

Annotation. A potential effectiveness of IR microscopy in application to forecasting and prospecting for base and precious metals deposits is demonstrated on examples of studying zircon crystals collected at the Mechiveem area (Okhotsk-Chukotka volcanoplutonic belt), Sukhoi Log ore field, and Natalka gold deposit.

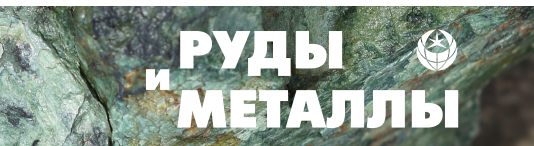
An important typomorphic characteristics of zircon, that is determined by IR microscopy, is the degree of structural perfection of the crystals. This diagnostic feature depends on the composition, age, and crystallization conditions of the mineral and serves as one of criteria for distinguishing its generations in exploration areas with multiple zircon sources. For example, in areas of distribution of potentially gold-bearing carbonaceous-terrigenous complexes, newly formed metasomatic zircon whose age coincides with the main ore formation stages is of forecasting and prospecting significance.

One indicator of the zircon hydrothermal transformations intensity, determined by its IR spectra, is the relative content of adsorbed water in the crystal. This feature is most effective for prospecting in areas of relatively young volcanic and intrusive formations.

Keywords: zircon, crystal, U-Pb age, structural perfection, hydroxyl groups, adsorbed water, typomorphism, IR microscopy, IR spectrum, ore deposits.

For citation: Khachatryan G. K., Kryazhev S. G. The practice of the zircon typomorphism studies using IR microscopy as applied to forecasting and prospecting for base and precious metals deposits. Rudy i metally (Ores and metals). 2026. No 1. pp. 25–34. DOI: 10.47765/0869-5997-2026-10002.





Введение

Циркон является распространённым акцессорным минералом разнообразных по составу магматических, метаморфических и метасоматических пород. Под действием флюидов первично магматические цирконы преобразуются за счёт диффузионно-реакционных процессов внутри кристаллов или за счёт их растворения-пересадки [4]. Условия кристаллизации и последующей эволюции этого минерала отражены в его типоморфных свойствах, которые могут быть использованы при разработке минералогических критериев прогноза и поисков коренных месторождений алмазов, цветных и благородных металлов. Подобные исследования особенно актуальны в связи с высокой устойчивостью циркона в поверхностных условиях и его способностью накапливаться в россыпях.

С учётом полигенеза и сложной истории кристаллизации циркона важной задачей шлихо-минералогических исследований является выявление в пробах тех его генераций, которые генетически связаны с оруденением. Эта задача может быть решена как с помощью установления возрастных соотношений ценного минерала и циркона, так и эмпирически, когда разные его генерации выделяются по комплексу типоморфных признаков.

Одним из экспрессных и информативных, но мало разработанных методов исследования минералов шлиховых проб является ИК-микроскопия. Она позволяет диагностировать подавляющее большинство прозрачных минералов и определять их типоморфные характеристики, такие как особенности кристаллической структуры, химического состава, наличие и содержание фазовых примесей [7]. Это было наглядно показано на примере минералов-спутников алмаза – пироба, хромдиоксида, форстерита, а также энстатита, циркона, апатита, кианита и рутила [6].

Цель настоящей работы – оценить возможности использования типоморфных свойств циркона, выявленных с помощью метода ИК-микроскопии, при прогнозировании и поисках месторождений цветных и благородных металлов.

Образцы и методы исследования

Объектами изучения послужили кристаллы циркона, отобранные из руд, вмещающих пород и современного аллювия на золоторудных объектах различного типа: в рудных полях месторождений Сухой Лог (400 образцов из 14 проб), Наталка (120 образцов из двух проб), а также в пределах Мечивеевской перспективной площади (Охотско-Чукотский вулканоплутонический пояс с предполагаемым меднопорфировым и эпитермальным оруденением; 100 образцов из 10 проб).

Все цирконы анализировались с помощью ИК-Фурье спектрометра Nicolet 380 и ИК-Фурье микроскопа Centaurus компании THERMO Scientific в диапазоне 650–4000 см⁻¹. Запись спектров с разрешением 2–4 см⁻¹, их обработка и определение количественных характеристик осуществлялись с помощью специальной программы OMNIC, которой оснащены спектрометры Nicolet.

Выборочно проводилось изотопное U-Pb датирование имеющихся цирконов методом LA-ICP-MS, а также изучение их внутреннего строения методом катодной люминесценции. Эти анализы были выполнены в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ им. А. П. Карпинского.

ИК-микроскопия циркона

ИК-спектры цирконов в значительной мере зависят от упорядоченности их кристаллической структуры, а также от наличия в минерале разнообразных структурных и фазовых примесей.

В структуре циркона вдоль оси 4-го порядка тетраэдры SiO₄ чередуются с додекаэдрами ZrO₈, а атомы кислорода имеют тройную координацию (Zr, Zr, Si). Часть циркония в минерале (до 30 %) изоморфно замещается на гафний, обычны также примеси кальция, редких земель, тория, иттрия. Цирконы, в значимых количествах содержащие радиоактивные элементы, часто характеризуются аморфным состоянием (метамиктность). В них также отмечается повышенное содержание воды (до 11 %), тогда как в остальных цирконах содержание водной составляющей обычно не превышает 1–2 %.

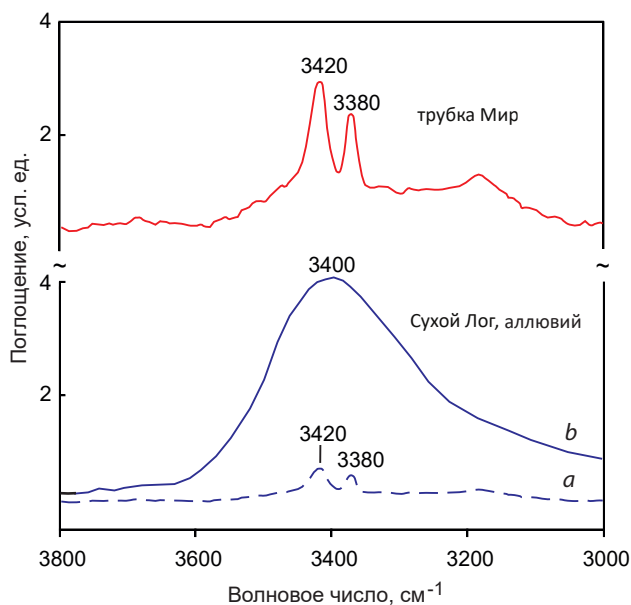


Рис. 1. Характерные спектры цирконов различного генезиса в области 3000–3800 см⁻¹: *a* – редкие, *b* – преобладающие

Fig. 1. Characteristic spectra of zircons of various genesis in the range of 3000–3800 cm⁻¹: *a* – rare, *b* – predominant

Типичными для спектров циркона, записанных под ИК-микроскопом, являются чёткий дублет около 1540–1600 см⁻¹ и сложный максимум поглощения в области 1780–1950 см⁻¹, относящийся к обертонам валентных Si–O колебаний кремнекислородного тетраэдра [12].

В диапазоне 3000–3700 см⁻¹ в спектрах цирконов имеются полосы поглощения разной конфигурации и интенсивности, относимые к валентным колебаниям молекулы воды и гидроксильных групп (рис. 1).

Установлено, что в спектре циркона по мере его метамиктизации в результате возрастающего радиационного воздействия число и резкость спектральных линий уменьшается [12]. Так, кристалл циркона ювелирного качества изначально характеризовался спектром из пяти линий: 1782, 1838, 1878, 1909, 1946 см⁻¹. С увеличением дозы облучения число полос уменьшилось до четырёх, затем до трёх вплоть до появления одного размытого максимума поглощения. Вместе с тем также исчезают

пики поглощения в диапазоне 3000–3700 см⁻¹. В связи с этим можно предположить, что спектральные характеристики природных цирконов соответствующим образом будут зависеть от содержания примесей радиоактивных элементов и от геологического возраста минерала. При равном содержании радиоактивных примесей наиболее совершенной структурой должны обладать самые молодые цирконы, а наименее совершенной, характеризующейся бесструктурным ИК спектром в области 1780–1950 см⁻¹, – наиболее древние.

По ИК-спектрам цирконы различного генезиса отличаются друг от друга. Например, цирконы из кимберлитов, как правило, обнаруживают в спектрах довольно интенсивные линии около 3380 и 3420 см⁻¹. По данным работы [9], первая из них обусловлена взаимодействием гидроксильной группы с двумя атомами циркония и одним – кремния (OH–ZrZrSi), а вторая – с двумя атомами циркония и вакансией (OH–ZrZr□). В спектрах цирконов Сухоложского района указанные линии прослеживаются лишь эпизодически и обладают слабой интенсивностью (рис. 1, *a*). Спектры большинства цирконов характеризуются «размытой» полосой поглощения с максимумом около 3400 см⁻¹, связанной с фазовой примесью молекулярной H₂O (рис. 1, *b*). Её интегральная интенсивность, согласно закону светопоглощения, прямо пропорциональна концентрации адсорбированной воды в цирконе. Можно предположить, что структурные примеси OH-групп, сингенетичных циркону, отражают насыщенность флюидов H₂O в среде его кристаллизации. По сравнению с этим молекулярная вода в адсорбированной форме, по-видимому, захватывалась кристаллом в процессе относительно низкотемпературных гидротермальных изменений циркона.

Таким образом, к наиболее информативным ИК-спектрометрическим свойствам циркона можно отнести его структурное совершенство, определяющее число и чёткость характеристических полос поглощения, а также относительное содержание в нём структурных гидроксильных групп и воды.

Цирконы Сухоложского рудного поля

Метод ИК-микроскопии уже применялся нами при изучении типоморфных свойств цирконов из месторождений Сухоложского рудного узла [7]. Было установлено значительное разнообразие цирконов, проявляющееся в спектральной области $1780\text{--}1950\text{ см}^{-1}$ и обусловленное различной степенью их структурного совершенства. По этому признаку выделено четыре типа кристаллов: с весьма совершенной (Zr_4), совершенной (Zr_3), несовершенной (Zr_2) и аморфной (Zr_1) структурой. Новые данные позволяют судить о генезисе выделенных разновидностей циркона.

Среди изученных цирконов Сухоложского рудного поля распространены бесцветные, желтоватые, розоватые, ярко-розовые и бурые хорошо огранённые коротко- и длиннопризматические кристаллы. Реже встречаются шарообразные и эллипсоидные зёрна, которые преимущественно обладают розовато-дымчатой и розовой окраской. По внешнему облику, спектральным характеристикам, изотопному возрасту и типу внутреннего строения кристаллов среди них можно выделить четыре генерации (рис. 2).

«Терригенные» цирконы преимущественно представлены в различной степени окатанными (или растворёнными, оплавленными) кристаллами и их обломками, часто имеющими розоватую и бурую окраску. Структура в подавляющем большинстве случаев несовершенная, реже – аморфная (Zr_{1+2}). По U-Pb возрасту выделяются две группы кристаллов: архей–ранний протерозой (2890–2200 млн лет) и ранний протерозой (2200–1600 млн лет). Эта разновидность циркона относится к «фоновому» детриту и распространена повсеместно. Основными источниками циркона, вероятно, служили породы архейского фундамента Нечерского и Тонодского поднятий, а также гранитоиды Чуйско-Нечерского комплекса [3].

«Плутоногенные» цирконы обнаружены в большом количестве, но только в одной пробе, отобранной вблизи гранитов Константиновского штока. Цирконы представлены идиоморфными длиннопризматическими кристаллами, возраст которых заключён в интервале

300–350 млн лет и соответствует возрасту гранитов [5]. Практически все цирконы являются метамиктными и обладают аморфной структурой (Zr_1).

«Вулканогенные» цирконы образуют хорошо сформированные зональные кристаллы с совершенной структурой (Zr_3). Возраст цирконов этого типа близок к времени седиментации (600–700 млн лет). Данный факт был установлен ранее и послужил основанием для вывода о существовании синхронных осадконакоплению проявлений вулканизма [11].

«Метасоматические» цирконы представлены идиоморфными кристаллами с зональным внутренним строением и максимальной степенью структурной упорядоченности (структура весьма совершенная, Zr_4). По времени кристаллизации (300–320 млн лет) цирконы значительно моложе пород хомолхинской свиты, из которых они были выделены, что однозначно свидетельствует о метасоматическом происхождении минерала. Предшествующими исследователями на детритовых цирконах из руд месторождения Сухой Лог были обнаружены микронные гидротермальные каймы [8]. Полученные нами данные указывают на более интенсивный и длительный рост (регенерацию?) кристаллов циркона во время герцинской гидротермально-метасоматической деятельности.

Важно отметить, что перечисленные разновидности циркона чётко различаются экспресс-методом ИК-микроскопии в процессе рядового минералогического анализа шлиховых проб. Это позволяет надёжно и статистически достоверно охарактеризовать основные закономерности распространения разнотипных цирконов на изученной площади (рис. 3).

Как видно на рисунке, наблюдается отчётливо повышенная концентрация «вулканогенного» циркона в шлихах, отмытых на площади Сухоложского рудного поля. На удалении от него отмечаются только редкие и единичные кристаллы данной разновидности. Принимая во внимание гидротермально-осадочный характер развитой в рудном поле сульфидной минерализации [10], повышенная доля

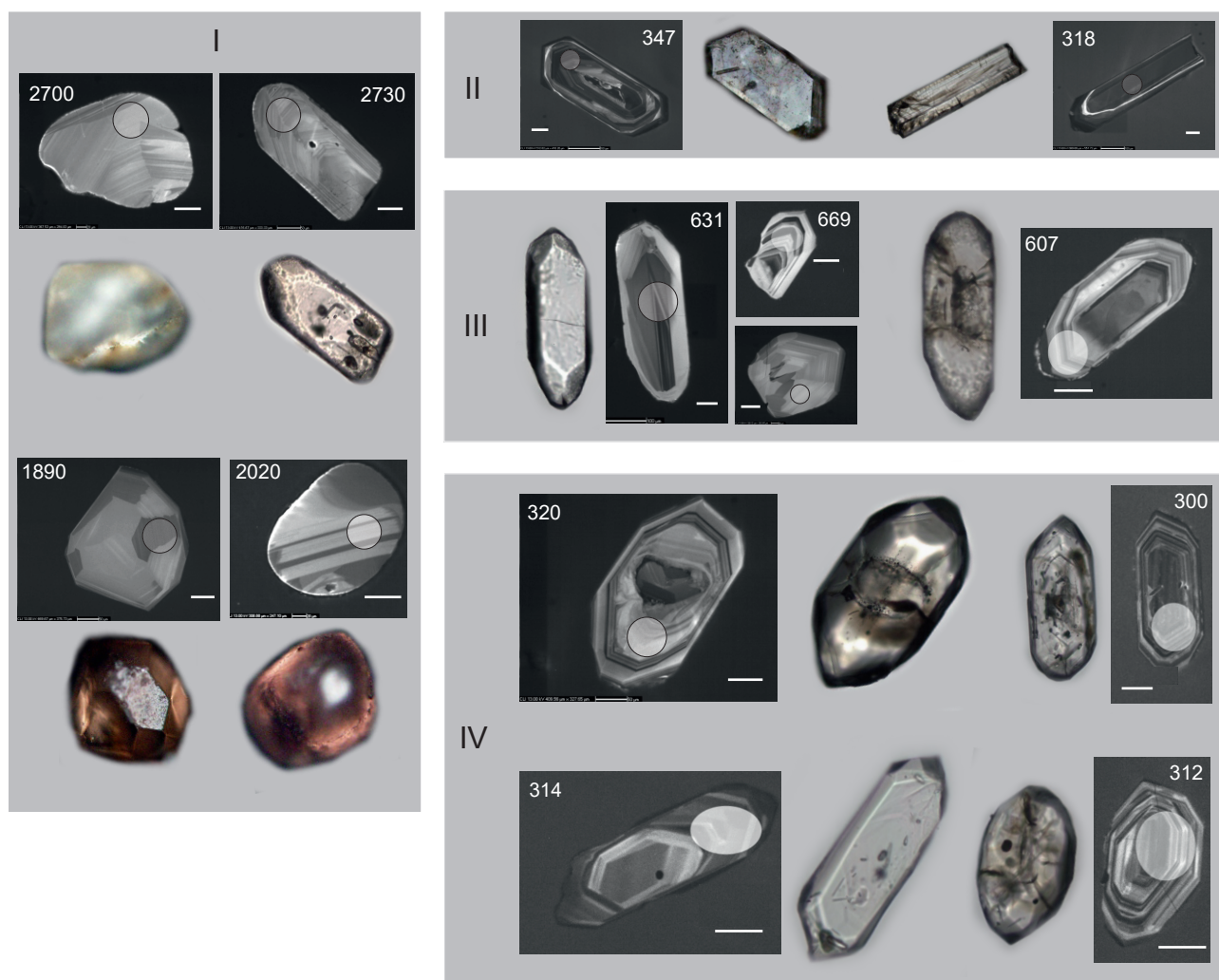


Рис. 2. Типы цирконов в протолочных и шлиховых пробах Сухоложского рудного поля:

I – в различной степени окатанные кристаллы и их фрагменты, структура несовершенная (повсеместно распространённый детрит архейского и протерозойского возраста); II – кристаллы из палеозойских гранитоидов (?), структура несовершенная, аморфное состояние; III – идиоморфные кристаллы, структура совершенная, возраст (600–700 млн лет) близок к времени осадконакопления. Выделены из пород и шлихов в сухоложском рудном поле; IV – метасоматические кристаллы с весьма совершенной структурой из пород и руд месторождения Сухой Лог, Сухоложской россыпи, шлиховых ореолов. Фото в проходящем свете и в катодных лучах. Показаны точки анализа и полученные значения U-Pb возраста (млн лет). Масштабная линейка 50 мкм

Fig. 2. Zircon types in heavy mineral concentrates of the crushed rock and alluvial samples within the Sukhoi Log ore field:

I – variably rounded crystals and their fragments, the structure is imperfect (ubiquitous detritus of Archean and Proterozoic age); II – crystals from Paleozoic granitoids (?), the structure is imperfect, amorphous state; III – euhedral crystals, the structure is perfect, the age (600–700 Ma) is close to the time of sedimentation. Extracted from rocks and alluvial concentrates taken within the Sukhoi Log ore field; IV – metasomatic crystals with a very perfect structure from rocks and ores of the Sukhoi Log deposit, from the Sukhoi Log placer, and from alluvial heavy mineral concentrate (HMC) halos. Photographed in transmitted light and cathode rays. The analysis points and obtained U-Pb age values (Ma) are shown. Scale bar 50 μm

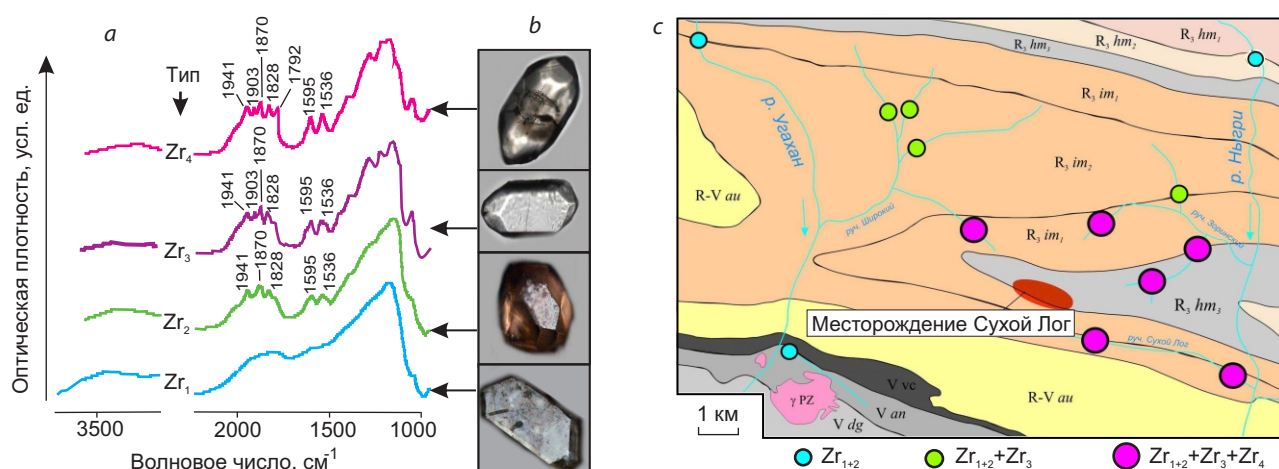


Рис. 3. Пример использования ИК-спектрометрического показателя совершенства структуры кристаллов циркона при шлихоминералогических поисках золоторудных месторождений сухоложского типа:
a – типизация цирконов по данным ИК-микроскопии; *b* – внешний облик кристаллов размером 100–200 мкм; *c* – распределение цирконов различного типа в современном аллювии на площади Сухоложского рудного поля. Геологическая основа по [2]

Fig. 3. An example of application of the IR spectrometric index of the zircon crystal structure perfection to the HMC-mineralogical prospecting for Sukhoi Log type gold deposits:

a – zircon typification based on IR microscopy data; *b* – appearance of the crystals 100–200 μm in size; *c* – distribution of zircons of various types in recent alluvium within the Sukhoi Log ore field. Geological basis after [2]

вулканогенного материала в рудовмещающих породах, по-видимому, не случайна.

«Метасоматические» цирконы с весьма совершенной структурой на площади распространены значительно более локально. Они обнаружены исключительно в аллювии ручьёв, размывающих сухоложское месторождение. Поскольку аналогичные цирконы были установлены в рудах Сухого Лога, источник выявленных шлиховых ореолов определяется однозначно.

Цирконы месторождения Наталка

Результаты исследования цирконов на месторождении Наталка (Магаданская область) подтвердили информативность отмеченных выше типоморфных признаков. Цирконы извлекали из руд месторождения Наталка (представительные технологические пробы, 60 кристаллов), а также из «фоновых» вмещающих пород, пробы которых были отобраны на удалении 1–3 км от месторождения (60 кристаллов).

Установлено, что по комбинациям линий в области 1780–1950 см⁻¹ около 20 % цирконов в рудах составляет циркон с весьма совершенной структурой (Zr₄), практически отсутствующий в «фоновых» породах. По аналогии с цирконами Сухого Лога можно предполагать, что ведущим процессом, обусловившим высокое структурное совершенство кристаллов циркона в породах месторождения Наталка, является околорудный метасоматизм.

Изоотнопно-геохронологические исследования цирконов показали, что только кристаллы Zr₄ из руд характеризуются резкой нарушенностью (дискордантностью) U-Pb системы, т. е. несут признаки метасоматического воздействия. При этом возраст нарушения системы, определённый по пересечению дискордии с конкордией (около 138 млн лет), оказался близким к времени рудообразования (по [1]).

Таким образом, структурное совершенство циркона может отражать условия роста кристалла, особенности его химического состава и возраст. Данный диагностический критерий эффективен для площадей с множественными генетически различными источниками цирконов, в частности – для ареалов развития потенциально золотоносных углеродисто-терригенных толщ.

Таким образом, структурное совершенство циркона может отражать условия роста кристалла, особенности его химического состава и возраст. Данный диагностический критерий эффективен для площадей с множественными генетически различными источниками цирконов, в частности – для ареалов развития потенциально золотоносных углеродисто-терригенных толщ.

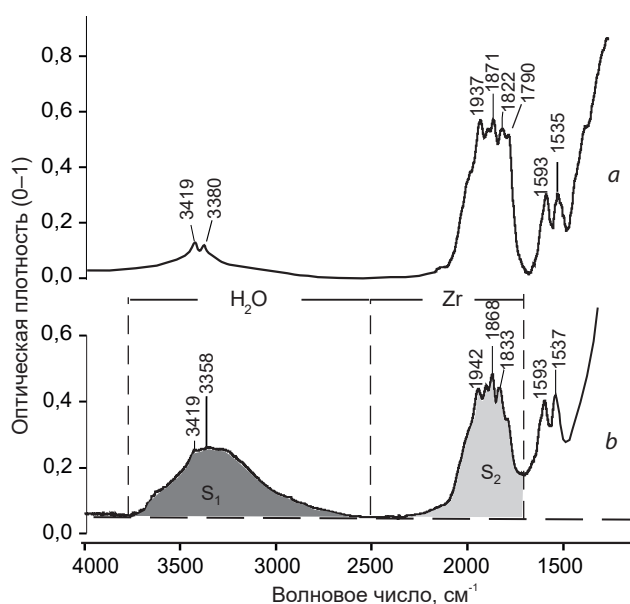


Рис. 4. Характерные ИК-спектры кристаллов циркона Мечивеевской площади с весьма совершенной (а) и совершенной (b) структурой

Fig. 4. Characteristic IR spectra of zircon crystals from the Mechiveem area with (a) very perfect structure and (b) perfect structure

Цирконы Мечивеевской площади

На Мечивеевской перспективной площади (Охотско-Чукотский вулcano-плутонический пояс) проводились поиски золото-молибден-меднопорфирового и сопряжённого оруденения с использованием шлихо-минералогического картирования. С целью апробации метода ИК-микроскопии в обстановках развития относительно молодых вулканогенных и интрузивных формаций из 10 шлихов были в случайном порядке извлечены и проанализированы под ИК-Фурье микроскопом цирконы (по 10 кристаллов в каждой пробе).

Результаты показали, что спектры всех изученных цирконов достаточно однотипны и свидетельствуют о высоком структурном совершенстве кристаллов. Это проявляется в чёткой структуре полос собственных колебаний циркона в диапазоне 1780–1950 см⁻¹. В этом интервале во всех ИК-спектрах наблюдаются четыре (Zr₃) или пять (Zr₄) спектральных линий (рис. 4), тогда как метамиктные и существенно разупорядоченные разности сре-

ди исследованных образцов не встречаются. Иначе говоря, по степени структурного совершенства значимых систематических отличий между цирконами из разных проб не обнаружено.

Общей особенностью большинства проанализированных образцов, отличающей их от наиболее типичных цирконов Сухого Лога, служит наличие в них структурных ОН-групп, проявляющихся в виде линий около 3380 и 3420 см⁻¹ (рис. 4).

Наиболее существенные отличия между изученными цирконами наблюдаются по относительному суммарному содержанию воды, находящейся, вероятно, в механических повреждениях кристалла, в составе газовой-жидких включений, во вторичных минералах, развивающихся по циркону, и т. п. Вода проявляется в спектрах в форме широкой диффузной полосы в диапазоне 2500–3800 см⁻¹, интенсивность которой сильно варьирует. Относительная интенсивность данной полосы, согласно закону светопоглощения, отражает содержание воды в минерале. Для количественной оценки концентрации воды в цирконе можно использовать отношение площади пика поглощения, обусловленного примесью воды (S₁), к площади пика собственного поглощения анализируемого кристалла (S₂).

Определение значений S₁ и S₂ осуществлялось в программе OMNIC с помощью специального инструмента измерения площади пика (Peak area tool). Значение S₁/S₂ соответствует относительному содержанию воды в кристалле циркона (xH₂O), выраженному в условных единицах. Результаты расчётов представлены в таблице и в графическом виде отражены на рис. 5.

Как видно из таблицы и рис. 5, цирконы с высоким относительным содержанием воды закономерно распространены на участке золоторудного рудопроявления Быстрое, где выявлены поля развития гидрослюдисто-каолинит-алунитовых аргиллизитов и наиболее широкие ореолы шлихового золота.

Полученные данные свидетельствуют о том, что концентрация воды в цирконе определяется интенсивностью наложенных гидротер-

Таблица. Относительное содержание воды в цирконах из шлиховых проб Мечивеевской площади по данным ИК-микроскопии

Table. Relative water content in zircons from the Metchiveem area from alluvial HMC samples according to IR microscopy data

Номер шлиха	Относительное содержание H ₂ O в цирконах (XH ₂ O)			Доля цирконов с XH ₂ O > 1, %
	от	до	среднее	
Участок «ручей Рыжий»				
20436	0,1	1,4	0,6	10
20234	0,1	2,9	0,8	20
20488	0,2	1,3	0,6	10
20215	0,1	2,2	0,9	40
ШТ007	0,3	1,3	0,8	20
Участок рудопроявления Быстрое				
20095	0,1	2,5	1,3	60
20619	0,1	2,2	1,0	40
ШШ2	0,1	2,2	1,0	60
20258	0,3	1,8	1,0	50
20256	0,4	2,7	1,1	40

мальных преобразований минерала и может служить отличительным признаком цирконов из околорудных метасоматитов.

Выводы

Рассмотренные примеры свидетельствуют о перспективности использования ИК-микроскопии для анализа циркона при прогнозе и поисках месторождений цветных и благородных металлов. Метод эффективен при экспресс-диагностике этого минерала в шлиховых пробах и определении его типоморфных признаков для разбраковки шлиховых ореолов при минералогическом картировании. Присутствие индикаторных цирконов в шлихах (по данным ИК-спектроскопии) может служить эффективным критерием выявления потенциальных рудных полей и локализации поисковых участков.

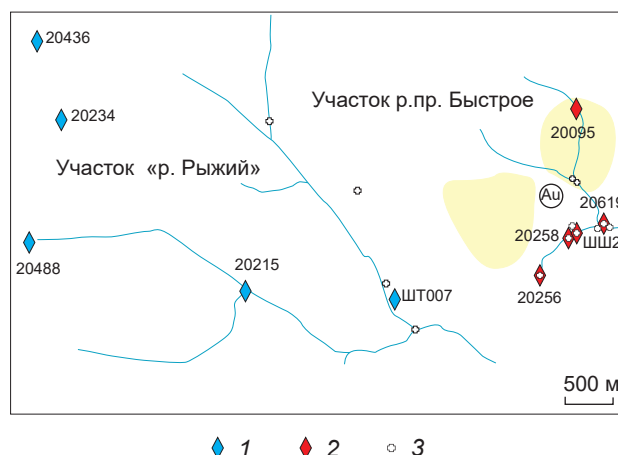


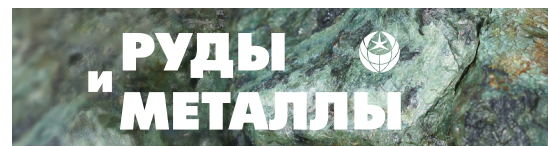
Рис. 5. Распределение цирконов различного типа на Мечивеевской площади:

среднее относительное содержание воды (XH₂O) в цирконах из шлиховых проб: 1 – < 1 у. е., 2 – ≥ 1 у. е.; 3 – шлиховые ореолы золота. Жёлтым выделены поля развития аргиллизитов. Названия участков и номера шлиховых проб те же, что и в таблице; Au – рудопроявление Быстрое

Fig. 5. Distribution of zircons of different types in the Metchiveem area:

average relative water content (XH₂O) in the zircons from alluvial HMC samples: 1 – < 1 c.u., 2 – ≥ 1 c.u.; 3 – alluvial HMC gold halos; yellow – areas of argillizites; see sample numbers in the table; Au – Bystroe ore occurrence

Важной типоморфной характеристикой циркона, определяемой с помощью ИК-микроскопа, является степень структурного совершенства кристаллов. Этот диагностический признак зависит от химического состава, возраста, условий кристаллизации минерала и может использоваться в качестве критерия для выделения его генераций на поисковых площадях с множественными источниками циркона, например в ареалах развития потенциально золотоносных углеродисто-терригенных комплексов. Установлено, что помимо «детритового» циркона на золоторудных объектах в углеродисто-терригенных толщах присутствует метасоматический новообразованный циркон, возраст которого совпадает со временем проявления основных этапов рудообразования.



Одним из показателей интенсивности гидротермальных преобразований циркона служит относительное содержание адсорбированной воды в кристалле, которое может быть количественно оценено по его ИК-спектрам.

Как показано на примере Мечивеевской площади, данный признак наиболее эффективен при поисках в районах развития относительно молодых вулканогенных и интрузивных формаций.

Список литературы

1. Гончаров В. И., Ворошин С. В., Сидоров В. А. Наталкинское золоторудное месторождение. – Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 2002. – 250 с.
2. Иванов А. И. Золото Байкало-Патома (геология, оруденение, перспективы). – М. : ЦНИГРИ, 2014. – 215 с.
3. Иванов А. И., Лившиц В. И., Перевалов О. В. и др. Докембрий Патомского нагорья. – М. : Недра, 1995. – 352 с.
4. Каулина Т. В. Образование и преобразование циркона в полиметаморфических комплексах. – Апатиты : Изд-во Кольского научного центра РАН, 2010. – 144 с.
5. Рыцк Е. Ю., Толмачева Е. В., Великославинский С. Д., Кузнецов А. Б., Родионов Н. В., Андреев А. А., Федосеев А. М. Результаты исследования циркона (SIMS) из гранитоидов Константиновского штока (район золоторудного месторождения Сухой Лог): возраст, источники и геологические следствия // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2021. – Т. 496, № 2. – С. 169–175.
6. Хачатрян Г. К., Анашкина Н. Е. Применение ИК-Фурье микроскопии для исследования индикаторных минералов кимберлитов при шлихо-минералогических поисках месторождений алмаза // Руды и металлы. – 2024. – № 4. – С. 78–90.
7. Хачатрян Г. К., Кряжев С. Г. Методика анализа породообразующих и аксессуарных минералов рудных месторождений с использованием ИК-Фурье микроскопа // Руды и металлы. – 2010. – № 5. – С. 64–73.
8. Юдовская М. А., Дистлер В. В., Родионов Н. В. и др. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb-изотопного SHRIMP-датирования аксессуарных минералов // Геология рудных месторождений. – 2011. – Т. 53, № 1. – С. 32–64.
9. Beran A., Libowitzky E. Water in Natural Mantle Minerals II: Olivine, Garnet and Accessory Minerals // Reviews in Mineralogy & Geochemistry. – 2006. – V. 62. – P. 169–191.
10. Large R., Maslennikov V., Robert F., Danyushevsky L., Chang Z. Multistage Sedimentary and Metamorphic Origin of Pyrite and Gold in the Giant Sukhoi Log Deposit, Lena Gold Province, Russia // Economic Geology. – 2007. – V. 102. – P. 1233–1267.
11. Meffre S., Large R., Scott R. et al. Age and pyrite Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2008. – V. 72. – P. 2377–2391.
12. Zhang M., Salje E., Ewing R. C. Infrared spectra of Si–O overtones, hydrous species, and U ions in metamict zircon: radiation damage and recrystallization // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2002. – V. 14. – P. 3333–3352.

References

1. Goncharov V. I., Voroshin S. V., Sidorov V. A. Natalkinskoe zolotorudnoe mestorozhdenie [Natalka gold deposit], Magadan, SVKNII FEB RAS Publ., 2002, 250 p.
2. Ivanov A. I. Zoloto Baikalo-Patoma (geologiya, orudenenie, perspektivy) [Baikal-Patom gold (geology, mineralization, prospects)], Moscow, TsNIGRI Publ., 2014, 215 p.
3. Ivanov A. I., Livshits V. I., Perevalov O. V. et al. Dokembrii Patomskogo nagor'ya [Precambrian of the Patom Upland], Moscow, Nedra Publ., 1995, 352 p.
4. Kaulina T. V. Obrazovanie i preobrazovanie tsirkona v polimetamorficheskikh kompleksakh [Formation and transformation of zircon in polymetamorphic complexes], Apatity, Kola Science Center of RAS Publ., 2010, 144 p.
5. Rytsk E. Yu., Tolmacheva E. V., Velikoslavinskii S. D., Kuznetsov A. B., Rodionov N. V., Andreev A. A., Fedoseenko A. M. Rezul'taty issledovaniya tsirko-

- на (SIMS) iz granitoidov Konstantinovskogo shtoka (raion zolotorudnogo mestorozhdeniya Sukhoi Log): vozrast, istochniki i geologicheskie sledstviya [Results of the study of zircon (SIMS) from granitoids of the Konstantinovsky stock (area of the Sukhoi Log gold ore deposit): age, sources and geological consequences], *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle* [Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences], 2021, V. 496, No 2, pp. 169–175. (In Russ.)
6. Khachatryan G. K., Anashkina N. E. Primenenie IK-Fur'e mikroskopii dlya issledovaniya indikatornykh mineralov kimberlitov pri shlikho-mineralogicheskikh poiskakh mestorozhdenii almaza [Application of IR Fourier microscopy for the investigation of kimberlite indicator minerals to search for diamond deposits using heavy-mineral concentrate method], *Rudy i metally* [Ores and metals], 2024, No 4, pp. 78–90. (In Russ.)
 7. Khachatryan G. K., Kryazhev S. G. Metodika analiza porodoobrazuyushchikh i aktsessornykh mineralov rudnykh mestorozhdenii s ispol'zovaniem IK-Fur'e mikroskopa [Methodology for analyzing rock-forming and accessory minerals of ore deposits using an IR Fourier microscope], *Rudy i metally* [Ores and metals], 2010, No 5, pp. 64–73. (In Russ.)
 8. Yudovskaya M. A., Distler V. V., Rodionov N. V. et al. Sootnoshenie protsessov metamorfizma i ru-
doobrazovaniya na zolotom chernoslantsevom mestorozhdenii Sukhoi Log po dannym U-Th-Pb-izotopnogo SHRIMP-datirovaniya aktsessornykh mineralov [Relationship between metamorphic and ore formation processes at the Sukhoi Log gold black shale deposit based on U-Th-Pb isotope SHRIMP dating of accessory minerals], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 2011, V. 53, No 1, pp. 32–64. (In Russ.)
 9. Beran A., Libowitzky E. Water in Natural Mantle Minerals II: Olivine, Garnet and Accessory Minerals, *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2006, V. 62, pp. 169–191.
 10. Large R., Maslennikov V., Robert F., Danyushevsky L., Chang Z. Multistage Sedimentary and Metamorphic Origin of Pyrite and Gold in the Giant Sukhoi Log Deposit, Lena Gold Province, Russia, *Economic Geology*, 2007, V. 102, pp. 1233–1267.
 11. Meffre S., Large R., Scott R. et al. Age and pyrite Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, V. 72, pp. 2377–2391.
 12. Zhang M., Salje E., Ewing R. C. Infrared spectrum of Si–O overtones, hydrous species, and U ions in metamict zircon: radiation damage and recrystallization, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2002, V. 14, pp. 3333–3352.

Хачатрян Галина Карленовна (Khachatryan-g-k@mail.ru)

доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник

Кряжев Сергей Гаврилович

доктор геолого-минералогических наук, начальник отдела

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

Galina Karlenovna Khachatryan

Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher

Sergey Gavrilovich Kryazhev

Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Department

Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals (FSBU TsNIGRI), Moscow, Russia

СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.441:550.4 (571.65)

Геохимические особенности самородного золота Шаманихо-Столбовского рудного района (Магаданская область)

Литвиненко И. С.

СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан, Россия

Аннотация. Приведены материалы исследований самородного золота Шаманихо-Столбовского рудного района Приколымского поднятия Северо-Востока России. По его геохимическим особенностям, в совокупности с данными о составе распространённых в нём микровключений, развитое в районе золотое оруденение может быть отнесено к классу месторождений золота, связанных с восстановленными гранитоидами. Свойственная для него зональность выражается в смене золото-гематит-пиритового типа минерализации золото-полисульфидным и золото-серебряно-полисульфидным. Они характеризуются соответственно преимущественно высокопробным, среднепробным и низкопробным самородным золотом, высокой частотой встречаемости и повышенным содержанием меди, свинца, висмута и железа. Основную роль в питании россыпей играло оруденение с золото-полисульфидной минерализацией. Комбинированными методами кластер-анализа, корреляционного анализа и метода главных компонент установлено, что индикаторными являются марганец-мышьяк-теллур-висмут-палладий-свинцовый и железо-висмут-свинец-никель-мышьяк-марганцевый геохимические типы золота при общем золото-редкометалльном характере рудных систем. По роли геохимических типов самородное золото Шаманихо-Столбовского района отличается от самородного золота Центрально-Колымских золото-кварцевых объектов и молибден-медно-порфиновых проявлений Тополево-Хетачанского рудного района.

Ключевые слова: Северо-Восток России, рудные месторождения, россыпи, золото.

Для цитирования: Литвиненко И. С. Геохимические особенности самородного золота Шаманихо-Столбовского рудного района (Магаданская область). Руды и металлы. 2026. № 1. С. 35–50. DOI: 10.47765/0869-5997-2026-10003.

Geochemical features of native gold from the Shamanikha-Stolbovaya ore region, Magadan Oblast

Litvinenko I. S.

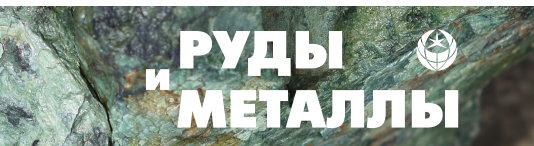
N. A. Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute (NEISRI), FEB RAS, Magadan, Russia

Annotation. The paper presents data on native gold from the Shamanikha-Stolbovaya ore region of the Prikolymское uplift in the Northeastern Russia. Gold mineralization developed in the region, taking into account its geochemical characteristics and data on the composition of microinclusions within it, can be assigned to the type of gold deposits related to reduced granitoids. Its characteristic zonality is expressed in change of gold-hematite-pyrite mineralization to gold-polysulfide and to gold-silver-polysulfide ones. These mineral assemblages are characterized by native gold of predominantly high, medium, and low fineness and by high frequency and elevated contents of copper, lead, bismuth, and iron, respectively. The gold-polysulfide mineralization played the main role in feeding the gold placers. Using combination of the cluster analysis, correlation analysis, and principal component methods allow us to reveal an indicative significance of the manganese-arsenic-tellurium-bismuth-palladium-lead and iron-bismuth-lead-nickel-arsenic-manganese geochemical types of native gold with a general gold-rare metal character of the ore-forming systems. Native gold of the Shamanikha-Stolbovaya ore region differs in the role of the geochemical types from the native gold derived from gold-quartz objects of the Central Kolyma and from porphyry molybdenum-copper occurrences of the Topolevaya-Khetachan ore region.

Keywords: Northeastern Russia, ore deposits, placers, gold.

For citation: Litvinenko I. S. Geochemical features of native gold from the Shamanikha-Stolbovaya ore region, Magadan Oblast. Rudy i metally (Ores and metals). 2026. No. 1. pp. 35–50. DOI: 10.47765/0869-5997-2026-10003.





Введение

Шаманихо-Столбовской рудный район расположен в среднем течении р. Колыма; в геологическом отношении это центральная часть Приколымского складчато-глыбового поднятия. Россыпная золотоносность в районе была выявлена в 1933 г., рудные концентрации установлены в 1936 г. В настоящее время здесь разведано 18 россыпных и 3 мелких рудных месторождения золота.

Несмотря на многочисленность и богатство россыпных месторождений Шаманихо-Столбовского района, представления о формационном типе их коренных источников не нашли определённого трактования. Это связано со сложностью геологического строения и развития района.

При реконструкции формационного типа коренных источников золотоносных россыпей важное место отводится исследованиям самородного золота. Изучение золота при проведении в районе поисковых, разведочных и эксплуатационных работ носило попутный характер и опиралось на ограниченное количество материала. Специализированные исследования типоморфных свойств самородного золота на рудных и россыпных объектах Глухаринского рудного узла касались его крупности, морфологии, внутреннего строения, пробности и микровключений [1, 6, 13 и др.]. Геохимические особенности (микропримесный состав) выделений самородного золота в рудах и россыпях, которые могли бы способствовать решению вопроса о формационном типе коренных источников россыпей, детально не освещались.

В настоящей работе для уточнения представлений о формационном типе золотого оруденения Шаманихо-Столбовского района рассмотрены геохимические особенности распространённого в рудах и россыпях самородного золота, с использованием средств пакета прикладных программ «Leader»* проведён сравнительный анализ с геохимическими особенностями золота молибден-медно-порфировой и золото-кварцевой формаций Тополево-Хе-

* Разработка информационно-вычислительного центра ПГО «Севзапгеология».

тачанского и Центрально-Колымских рудных районов.

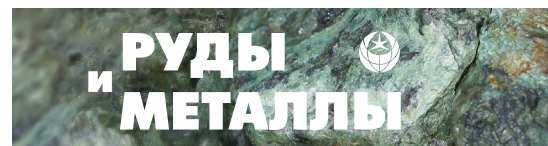
Методика работ

Сбор и обработка материалов осуществлялись в рамках научно-исследовательских работ, проводившихся в СВКНИИ ДВО РАН.

Исследованное самородное золото извлечено из протолочных и шлиховых проб. Шлиховые концентраты получены после промывки на винтовом сепараторе ВС-200 и винтовом шлюзе ВШ-200 рыхлого материала из реликтов отработанных россыпных месторождений и коллювиальных образований, перекрывающих рудные тела. Самородное золото из них извлекалось под бинокляром. Раздробленный до 1,0 мм материал протолочных проб последовательно растворялся в плавиковой и азотной кислотах. После каждой стадии растворения из полученного остатка проводился отбор зёрен золота под бинокляром.

Двенадцать образцов самородного золота анализировались в Центральной лаборатории бывшего объединения «Севостгеология» (г. Магадан, аналитик Н. П. Оверченко) микроспектральным методом по методике И. П. Ланцева [15]. Десять проб были проанализированы в Лаборатории методов спектрального анализа СВКНИИ ДВО РАН (г. Магадан, аналитик Н. П. Оверченко), в которой на основе методики И. П. Ланцева и методологии экспрессного количественного спектрального анализа (ЭКСА) был разработан новый способ аналитического исследования природных золотин – ЭКСА-Au [10]. Результаты анализов шести образцов самородного золота, выполненных микроспектральным методом в Институте геологии ЯФ СО РАН (г. Якутск, аналитик Н. И. Петрова), взяты из материалов Г. Н. Гамянина и др. (Г. Н. Гамянин, Н. А. Горячев, В. Л. Половинкин, А. Г. Бахарев, 1984 г.).

Микроспектральный анализ образцов самородного золота выполнялся на Cu, Bi, Co, Pb, Ni, Mn, Sb, Te, Pd, Fe, Zn, Sn, As, Pt. Из-за низкой представительности (не обнаружены ни в одной из проб) Co, Sn, Zn и Pt в дальнейшем в обработку материалов не включались. Содержание Au и Ag определялись с помо-



щью микронзондового анализатора Camebax (г. Магадан, СВКНИИ ДВО РАН, аналитики М. И. Парфенов, Е. М. Горячева) на дубликатах проб и рассчитывались как среднее арифметическое их значений в отдельных зёрнах. Всего для определения пробности золота на рудных объектах и россыпях Шаманихо-Столбовского района было исследовано 948 золотин, в которых проведено 2169 определений золота и серебра. Исследованы микровключения рудных минералов в составе 204 зёрен.

Геолого-структурная позиция и золотоносность Шаманихо-Столбовского рудного района

Шаманихо-Столбовской золотоносный район расположен в среднем течении р. Колыма на междуречье её правых притоков – рек Шаманиха и Большая Столбовая (рис. 1). В геологическом отношении это центральная часть Приколымского складчато-глыбового поднятия – фрагмента краевой зоны Азиатского континента с длительной историей становления и развития. В геолого-структурном отношении поднятие представляет собой сложное сооружение обобщённо антиклинорной морфологии, сочетающее разнопорядковые линейные складчатые, блоковые и покровные структуры. В осевой части поднятия вскрываются мощные терригенные и карбонатно-терригенные формации протерозоя, краевые его зоны сложены в основном терригенно-карбонатными формациями среднего и верхнего палеозоя. Локально развиты мезозойские вулканогенно-терригенные формации и позднемеловые вулканиты.

В пределах Шаманихо-Столбовского золотоносного района повсеместно преобладают интенсивно метаморфизованные терригенные и карбонатно-терригенные породы протерозойского (нижнего) структурного яруса. Отложения средне-позднепалеозойского (среднего) и позднеюрского (верхнего) ярусов имеют ограниченное распространение (рис. 1).

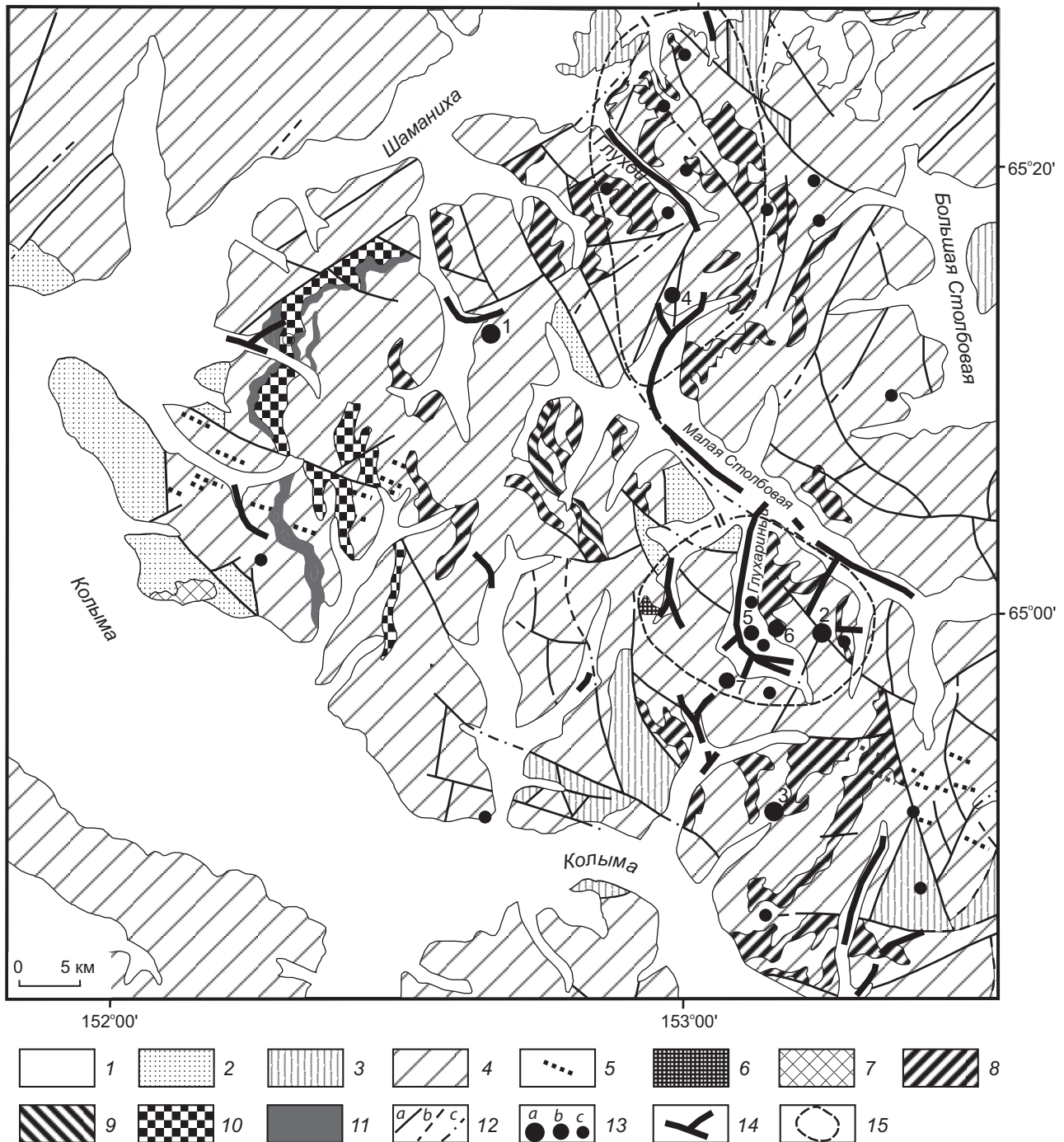
Магматические образования в районе представлены залежами рифейских риолитовых и трахириолитовых порфиров, метаба-

зитов, габбро-диабазов и габбро-амфиболитов хакдонского субвулканического комплекса [4], интрузией гранитов, условно отнесённой к позднемеловому наяханскому комплексу (В. И. Шпикерман и др., 2019 г.), и позднемеловыми дайками долеритов и диоритовых порфиров.

Основная масса рудных и россыпных объектов располагается в Глухаринской золотоносной полосе (зоне), локализованной в восточной части района (рис. 1). Она включает в себя Глухаринский и Глуховской рудные узлы. Расположенная между ними группа россыпей в долине р. Малая Столбовая, которую можно выделить как самостоятельную Мало-Столбовскую рудно-россыпную зону, формировалась за счёт серии рудных проявлений, сосредоточенных в тектонической зоне, осваиваемой этим водотоком.

Выявленные в пределах Шаманихо-Столбовского золотоносного района рудные месторождения и проявления приурочены к выходам протерозойских пород. Рудные поля представляют собой пакеты надвиговых чешуй, осложнённых более поздними разрывами. К ним приурочены зоны прожилково-метасоматического окварцевания (с отдельными мелкими жилами) и сульфидизации (преобладает пирит) в метаморфизованных терригенных и карбонатных породах, риолит-порфирах, дайках метадиабазов [2, 3, 5 и др.]. Рудные тела выделяются по данным опробования. Степень окисления руд по результатам технологических исследований картировочных проб на месторождении Надежда варьирует от 74 до 98 %, на месторождении Тый-Юрья – от 96 до 100 % [2]. Вторичные минералы представлены в основном гидроксидами железа.

О рудно-формационном типе, времени формирования и генезисе золоторудной минерализации существуют различные мнения. Одни исследователи связывают её с проявлением раннепалеозойской (?) автономной тектономагматической активизации и метаморфизмом в период формирования гранито-гнейсового купола [14]. При этом выделяются «собственно» золото-кварцевый метаморфо-



генно-гидротермальный и более поздний золото-кварц-сульфидный постмагматические типы оруденения. Другие исследователи высказывают мнение о парагенетической связи золотого оруденения Шаманихо-Столбовского района с процессами позднемезозойской тектоно-магматической активизации и отно-

сят его к золото-кварцевому малосульфидному [7, 16, 17] или золото-редкометалльному и золото-серебряному [2, 3, 5 и др.] типам.

Выявленные в Шаманихо-Столбовском районе россыпные месторождения в большинстве своём относятся к разряду очень мелких и мелких. Основное количество выявленных

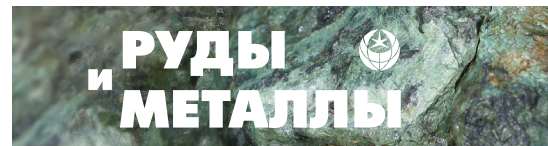


Рис. 1. Геолого-структурная схема Шаманихо-Столбовского золотоносного района (использованы материалы тематических работ [4] с изменениями и дополнениями):

1 – кайнозойские отложения речных долин и впадин; 2–4 – структурные ярусы: 2 – верхний: вулканогенные, вулканогенно-терригенные и грубообломочные терригенные отложения поздней юры, 3 – средний: терригенно-карбонатные, терригенные и вулканогенные отложения среднего и позднего палеозоя, 4 – нижний: интенсивно метаморфизованные терригенные, карбонатно-терригенные и вулканогенные отложения протерозоя; 5 – поздне меловые дайки долеритов и диоритовых порфиров; 6 – поздне меловые граниты; 7 – позднеюрские диабазы и габбро-диориты; 8, 9 – рифейские риолиты, трахириолиты (8), метабазиты, габбро-диабазы и габбро-амфиболиты (9); 10, 11 – раннепротерозойские гнейсограниты (10), габбро-амфиболиты и перидотиты (11); 12 – разрывные нарушения: установленные (а), предполагаемые (b), скрытые под чехлом рыхлых отложений (с); 13 – золоторудные объекты: а – месторождения (1 – Сохатиное, 2 – Надежда, 3 – Тый-Юрья), b – рудопроявления (4 – Тимша, 5 – Глухаринское, 6 – Гольца Глухаринский, 7 – Тёмное), с – пункты минерализации; 14 – россыпи золота; 15 – участки Глуховского (I) и Глухаринского (II) рудных узлов, на рудных и россыпных объектах которых проведено изучение геохимических особенностей самородного золота

Fig. 1. Schematic geological and structural map of the Shamanikha-Stolbovaya gold-bearing region (modified after materials of thematic works [4]):

1 – Cenozoic deposits of river valleys and depressions; 2–4 – structural stages: 2 – upper: volcanogenic, volcanogenic-terrigenous, and coarse-grained terrigenous deposits of the Late Jurassic, 3 – middle: terrigenous-carbonate, terrigenous, and volcanogenic deposits of the Middle and Late Paleozoic, 4 – lower: intensively metamorphosed terrigenous, carbonate-terrigenous, and volcanogenic deposits of the Proterozoic; 5 – Late Cretaceous dikes of dolerites and diorite porphyrites; 6 – Late Cretaceous granites; 7 – Late Jurassic diabases and gabbro-diorites; 8, 9 – Riphean rhyolites and trachyrhyolites (8), Riphean metabasites, gabbro-diabases, and gabbro-amphibolites (9); 10, 11 – Early Proterozoic gneiss-granites (10), Early Proterozoic gabbro-amphibolites and peridotites (11); 12 – faults: established (a), inferred (b), hidden under a cover of loose sediments (c); 13 – gold ore objects: a – ore deposits (1 – Sokhatinoe, 2 – Nadezhda, 3 – Tuy-Yurya), b – ore occurrences (4 – Timsha, 5 – Glukharinoe, 6 – Goltza Glukharinyi, 7 – Temnoe), c – mineralization points; 14 – gold placers; 15 – sites of the Glukhovskoe (I) and Glukharinskoe (II) ore clusters, where the geochemical features of native gold were studied

запасов россыпного золота сосредоточено в средних и крупных (Глухаринский, Малая Столбовая) объектах.

Россыпные месторождения района характеризуются широким возрастным и генетическим разнообразием. Здесь присутствуют палеоцен-эоценовые остаточные концентрации кор выветривания, аллювиальные долинские с возрастом от олигоцена до плейстоцена [8] и современные коллювиальные россыпи. Слабая степень обработки металла и его сростки с кварцем указывают на их формирование близ коренных источников.

Геохимические особенности самородного золота Шаманихо-Столбовского рудного района

В настоящей работе рассматриваются геохимические особенности самородного золота россыпных и рудных объектов Глухаринской золотоносной полосы. Исследовано золото Глухаринского и Глуховского рудных узлов

и расположенной между ними группы россыпных месторождений и проявлений в долине р. Малая Столбовая (Мало-Столбовская россыпная зона).

Исследованные рудные объекты в Глухаринском узле относятся к зонам прожилково-метасоматического окварцевания (с отдельными мелкими жилами) в метаморфизованных осадочных породах (месторождение Надежда, рудопроявление Глухаринское), риолит-порфирах (рудопроявление Пионер) и в приконтактной зоне штока гранитов (рудопроявление Хая). По исследованиям протоочных проб в рудах месторождения Надежда распространено среднепробное и высокопробное золото (рис. 2), средняя пробность 925 ‰; на рудопроявлении Пионер – среднепробное с преобладанием зёрен класса 850–900 ‰ (средняя 872 ‰). Геохимический состав рудного золота остался пока не исследованным. Из микровключений выявлены пирит и гидроксиды железа.

Золото из развитых по рудным проявлениям элювиальных образований (элювиальных россыпей) характеризуется более широким колебанием пробности.

На месторождении Надежда в элювиальной россыпи присутствует золото с пробностью от 787 до 974 ‰ (средняя 882 ‰), на рудопроявлении Глухариное – от 796 до 927 ‰ (средняя 859 ‰). В элювиальном золоте, как и в рудном, в составе отдельных золотин со средней пробностью выявляются три фазы: среднепробная (преобладает), высокопробная и весьма высокопробная в виде гипергенных кайм. Редко наблюдаются зёрна блокового строения, состоящие из умеренно высокопробного и высокопробного золота.

Золото из элювиальных развалов на рудопроявлении Хая отличается выдержанностью пробности (854–867 ‰) и однородным составом.

По данным спектрального анализа (рис. 3) для золота из элювиальной россыпи на месторождении Надежда характерны примеси меди (до 0,064 %), железа (до 0,078 %), висмута (до 0,026 %), теллура (до 0,02 %), свинца (до 0,012 %). В незначительных количествах присутствуют марганец (до 0,0015 %) и палладий (до 0,0011 %). Золото с более богатого участка характеризуется более высоким содержанием висмута и теллура. Из рудных минералов в качестве микровключений отмечаются выделения тетрадимита (75 % от всех исследованных микровключений) и пирита.

В аллювиальных россыпях Глухаринского узла присутствует золото с пробностью от 431 до 985 ‰. Довольно определённо выделяются три его генерации: высокой, средней и низкой пробности. В целом при резком преобладании в россыпях золотин со средней и высокой пробностью (преобладают зёрна с пробностью 900–950 ‰) отмечается центр с максимумом развития низкопробного золота.

В группе россыпей Глухаринского узла такой центр развития низкопробного золота включает в себя россыпи руч. Темный и Дорожный и участок россыпи руч. Глухариный в районе этих притоков (рис. 2). Количество зёрен низкопробной генерации здесь в отдельных точках достигает 49,9 %, а в среднем со-

ставляет 20,4 %, тогда как в россыпи руч. Глухариного выше и ниже участка максимального присутствия низкопробного золота, а также в россыпях соседних ручьёв (Надежда, Юный, Хая) золото этой генерации или отсутствует, или содержится в ничтожно малом количестве. Доля же весьма высокопробного золота в них, напротив, достигает 30 %, тогда как на участке распространения низкопробной генерации она не превышает 14,3 %. Изучение распределения разнопробного золота по вертикали разрезов рыхлых отложений на примере верхнего и нижнего пластов руч. Глухариного показало, что нижний пласт характеризуется более высоким содержанием высокопробного золота (рис. 2).

По данным спектрального анализа в золоте аллювиальных россыпей Глухаринского узла установлены медь (до 0,091 %), свинец (до 0,09 %), железо (до 0,079 %), висмут (до 0,035 %), теллур (до 0,035 %), марганец (до 0,0056 %), сурьма (до 0,0022 %). На участке максимального развития низкопробной генерации оно отличается повышенным содержанием свинца и присутствием сурьмы. По разрезу рыхлых отложений в Верхне-Глухаринской впадине верхний пласт характеризуется повышением в самородном золоте концентраций свинца и уменьшением содержания висмута и меди (рис. 3). В качестве микровключений отмечаются главным образом галенит и пирит, в отдельных случаях – мартит, тетрадимит и блеклые руды.

В Глуховском узле исследованные рудные объекты характеризуются зонами и ореолами окварцевания и сульфидизации в кварцитах (рудопроявление Звенящий), хлорит-серицитовых сланцах и риолит-порфирах (рудопроявления Копач, Путаник), дайке метадиабазов (рудопроявление Горняк). Так же, как и в Глухаринском узле, здесь на рудопроявлении Копач среди выделенных из элювиальных образований знаков, наряду с основными среднепробной и высокопробной генерациями золота, присутствуют низкопробные зёрна (рис. 2). На рудопроявлении Звенящий установленные в элювиальных развалах золотины были полностью представлены низкопробными (от 497 до 692 ‰) разностями.

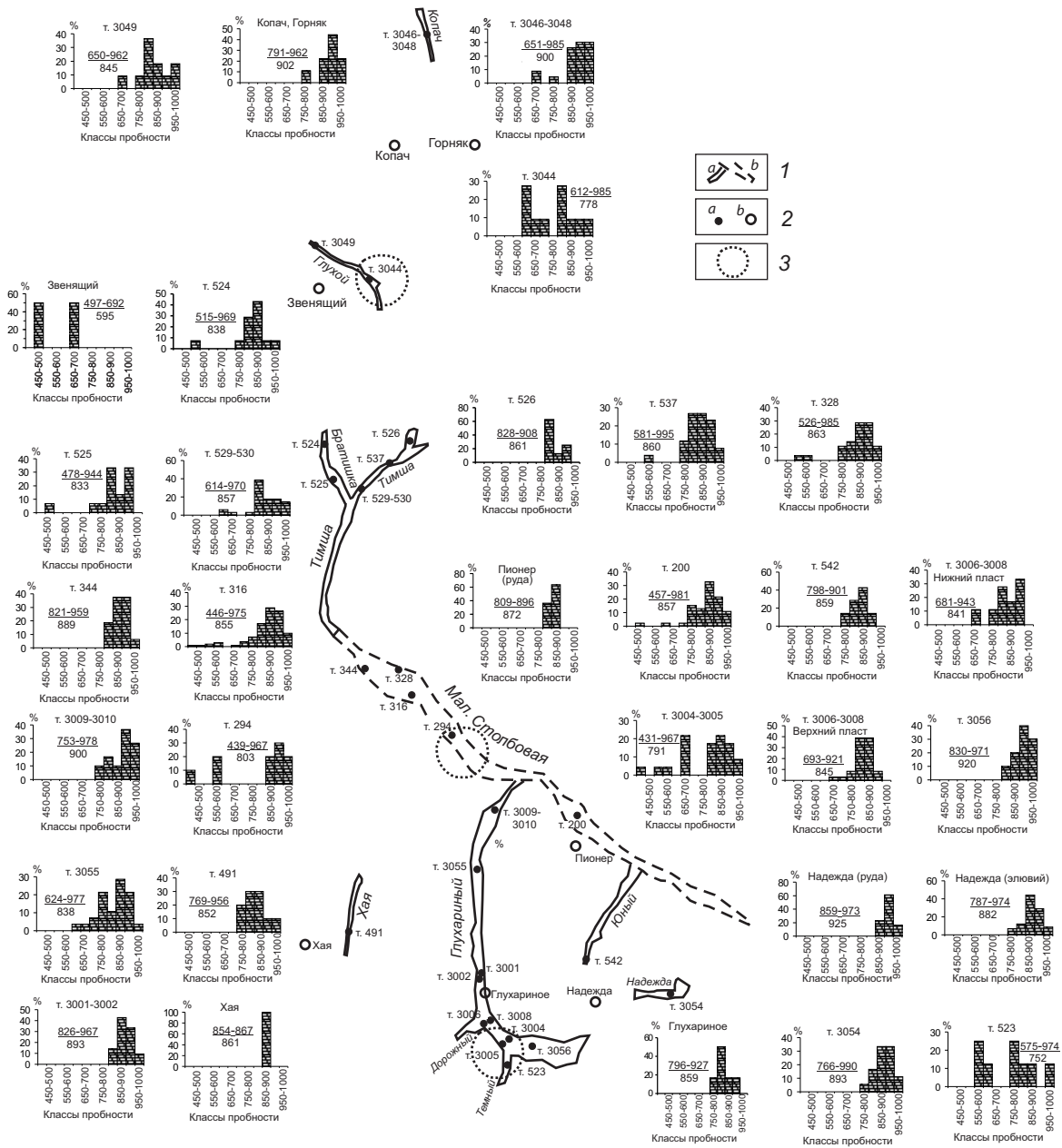


Рис. 2. Пробность самородного золота рудных и россыпных объектов Глухаринской золотоносной полосы:
 1 – установленные (a) и предполагаемые (b) контуры россыпных месторождений с их названиями; 2 – точки опробования аллювиальных (a) и элювиальных (b) россыпей с номерами точек и названиями рудных объектов; 3 – участки максимального присутствия золота низкопробной генерации.

На гистограммах указаны: номера точек опробования, названия рудных объектов, пределы колебания пробности (числитель) и средняя пробность (знаменатель) самородного золота

Fig. 2. Fineness of native gold from ore and placer gold deposits of the Glukharinyy gold-bearing zone:

1 – established (a) and proposed (b) outlines of placer gold deposits with their names; 2 – sampling points of alluvial (a) and eluvial (b) gold placers with point numbers and names of ore objects; 3 – areas of maximum distribution of the low-fineness gold generation.

The histograms show: sampling point numbers, ore deposit names, gold fineness ranges (above the line) and the average fineness (below the line) of native gold

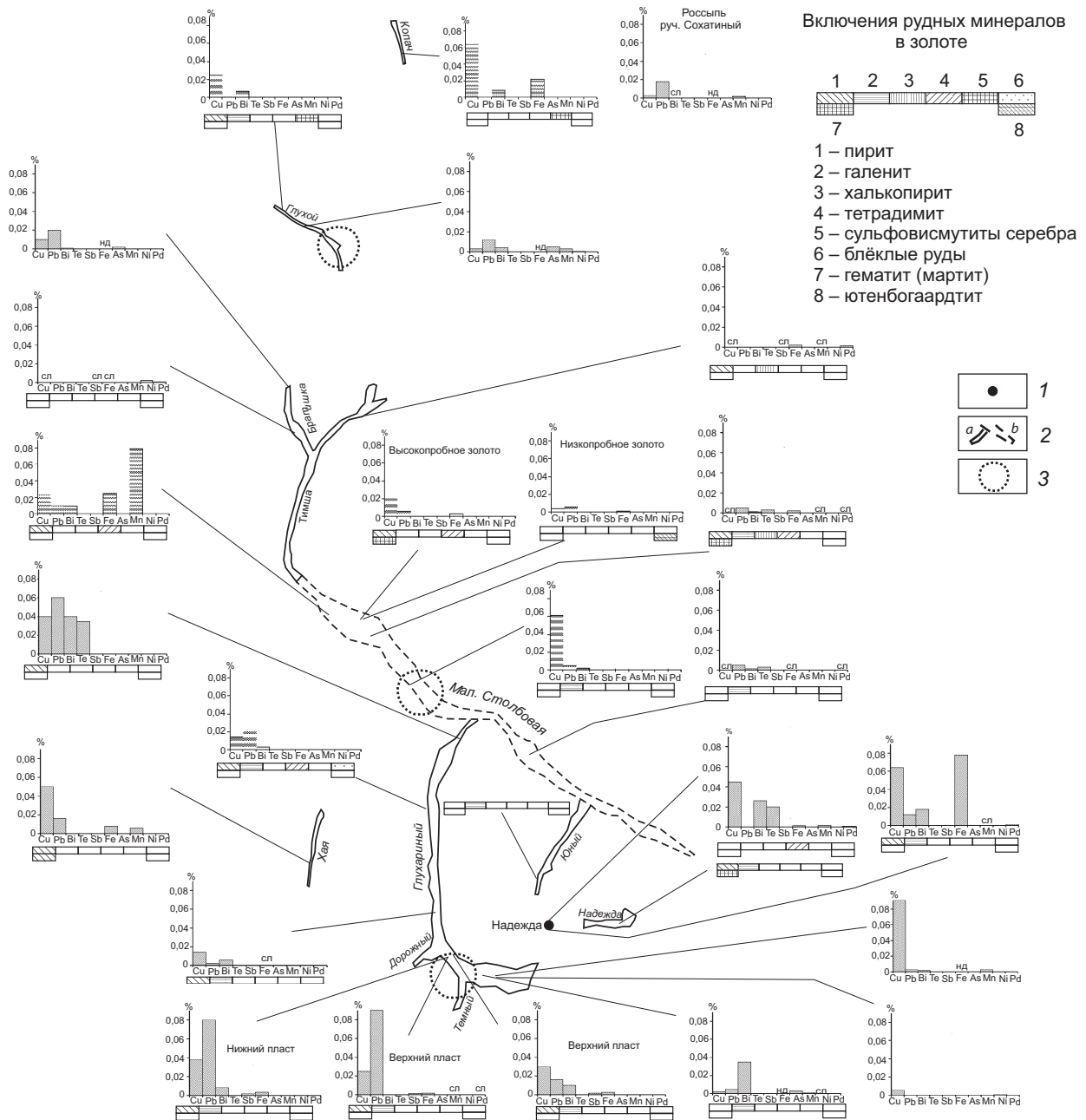


Рис. 3. Микропримеси и микровключения в самородном золоте рудных и россыпных объектов Глухаринской золотоносной полосы (с использованием материалов тематических (К. И. Жилин и др., 1984 г.) работ):
1 – рудное месторождение; 2 – установленные (а) и предполагаемые (b) контуры россыпных месторождений с их названиями; 3 – участки максимального присутствия золота низкопробной генерации; на гистограммах: сл – следы, нд – нет данных

Fig. 3. Microimpurities and microinclusions in native gold of the ore and placer gold deposits of the Glukharinyy gold-bearing zone (compiled using materials from thematic works (K. I. Zhilin et al., 1984)):

1 – ore deposit; 2 – established (a) and supposed (b) outlines of placer gold deposits with their names; 3 – areas of maximum distribution of low-finesness gold generation. Note: on the histograms of microimpurities: “сл” – traces, “нд” – no data

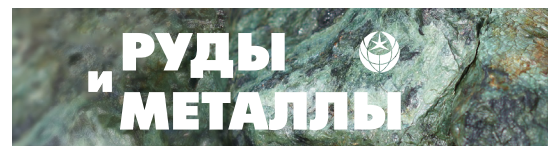


Табл. 1. Геохимическая характеристика самородного золота по золотоносным площадям

Table 1. Geochemical characteristics of native gold by different gold-bearing areas

Элементы-примеси	Глухаринский узел (14)				Мало-Столбовская зона (7)				Глуховской узел (7)			
	Содержание элементов-примесей, г/т			Частота встречаемости, %	Содержание элементов-примесей, г/т			Частота встречаемости, %	Содержание элементов-примесей, г/т			Частота встречаемости, %
	min	max	сред.		min	max	сред.		min	max	сред.	
Cu	55	910	332	100,0	37	741	273	100,0	30	635	177	100,0
Bi	–	350	82	78,6	–	110	36	85,7	–	89	30	71,4
Pb	–	900	241	85,7	30	103	59	100,0	–	200	48	42,9
Ni	–	8	1	14,3	–	–	–	–	–	5	1	14,3
Mn	–	56	9	42,9	–	787	113	28,6	–	28	5	42,9
Sb	–	22	4	21,4	–	–	–	–	–	5	1	28,6
Te	–	350	26	14,3	–	31	9	28,6	–	–	–	–
Pd	–	11	2	21,4	–	17	6	71,4	–	16	3	28,6
Fe	–	780	75	78,6	5	250	48	100,0	–	218	35	85,7
As	–	30	4	14,3	–	–	–	–	–	20	3	14,3
Пробность, ‰	838	925	874	100,0	860	895	872	100,0	845	900	866	100,0

Примечание. Прочерк – элемент не обнаружен. min и max – минимальные и максимальные концентрации. В скобках – количество проб.

В аллювиальных россыпях Глуховского узла выявлено золото с пробностью 478–944 ‰. Преобладают среднепробные зёрна с пробностью 800–850 ‰.

Центр развития низкопробной генерации золота располагается в верхней части россыпи руч. Глухой. Её доля достигает здесь 29,4 %. В нижней части россыпи и в россыпях соседних ручьёв (Копач, Тимша, Братишка) доля золотин низкопробной генерации уменьшается до 3,7–9,1 %. По данным спектрального анализа самородное золото в Глуховском узле по сравнению с Глухаринским узлом характеризуется более узким спектром элементов-примесей при более низких концентрациях висмута, свинца, меди и железа (табл. 1). В качестве микровключений наряду с галенитом и пиритом выявляются халькопирит, матильдит, павонит (рис. 3).

В исследованных аллювиальных россыпных месторождениях и проявлениях, локализованных в **Мало-Столбовской россыпной зоне**, присутствует золото с пробностью 439–985 ‰ с преобладанием среднепробных и высокопробных его разновидностей (преобладают золоти-

ны с пробностью 850–900 ‰) при подчинённом количестве низкопробных зёрен.

Наибольшее развитие низкопробной генерации золота отмечается в россыпных струях в районе устья руч. Хая (рис. 2). Количество зёрен с низкой пробностью здесь достигает 30 %. На выше- и нижележащих участках выделения этой генерации присутствуют в очень незначительном количестве (до 4,4–7,2 %).

По данным спектрального анализа золото из россыпных месторождений и проявлений в долине р. Малая Столбовая характеризуется повышенным содержанием большинства элементов-примесей по сравнению с золотом россыпей Глуховского и пониженным (за исключением марганца и палладия) по сравнению с золотом Глухаринского узла (табл. 1). Золото низкопробной генерации отличается более бедным спектром и более низкими концентрациями микропримесей меди и железа. В микровключениях среди рудных минералов преобладают галенит и пирит, в подчинённом количестве на отдельных участках отмечаются тетрадимит, халькопирит, мартит, ютенбогаардит.

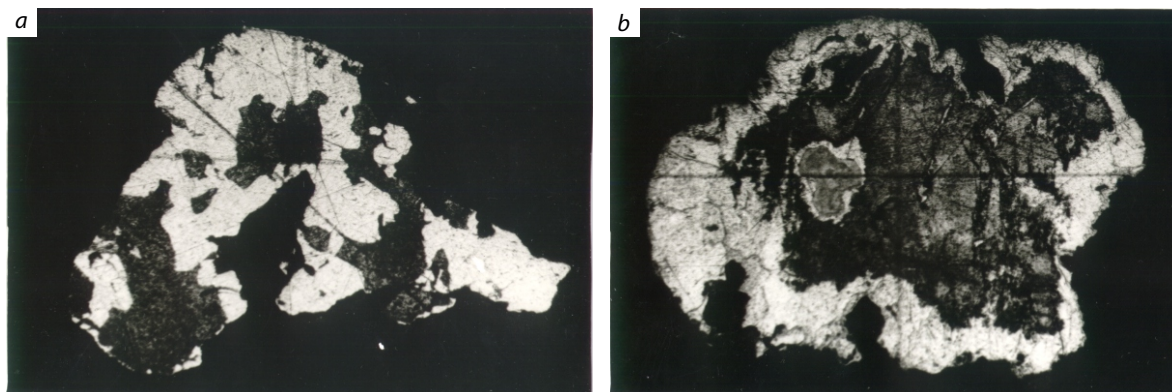


Рис. 4. Двухфазная (светло-серое – высокопробная фаза, тёмно-серое – среднепробная) золотина (а) и высокопробная гипергенная оболочка (светло-серое) на золотине средней пробы (b) из россыпи р. Малая Столбовая: монтированный аншлиф, травление HCl + CrO₃, увеличение 100

Fig. 4. Gold particles from placer of the Malaya Stolbovaya River: (a) two-phase gold particle (light gray is high-fineness phase, dark gray is medium-fineness one) and (b) high-fineness supergene coating shell (light gray) on medium-fineness gold particle. Mounted polished section. Etching with HCl + CrO₃. Magn. 100

По составу низкопробные и весьма высокопробные золотины из аллювиальных россыпных месторождений Глухаринского, Глуховского узлов и Мало-Столбовской зоны относительно однородны. В золотилах средней и высокой пробы, как и в элювиальном золоте, довольно часто выявляются две гипогенные фазы (рис. 4, а) с перепадом пробы до 150 ‰. Достаточно широко распространены гипергенные весьма высокопробные каймы и межзерновые прожилки (рис. 4, б). Максимальную степень развития они имеют в низкопробных золотилах. У них же отмечаются высокопробные микропористые участки с заполненными гидроксидами железа порами. Золото с гипергенными преобразованиями наиболее распространено в россыпях р. Малая Столбовая и руч. Глухариный.

В целом можно отметить, что в рудных и россыпных месторождениях Глухаринской золотоносной полосы выделяется три типа золота: преимущественно высокопробное с пиритом и гематитом; преимущественно среднепробное с полисульфидной минерализацией и низкопробное с сульфовисмутитами и сульфидами серебра (табл. 2). При этом первый тип характерен для руд, элювиальных и аллювиальных россыпей, второй – лишь в отдельных случаях для руд, частично для элювиаль-

ных и главным образом аллювиальных россыпей, а третий – главным образом для аллювиальных россыпей.

Сравнительный анализ типоморфных свойств самородного золота коренных и россыпных объектов указывает на достаточно определённую связь россыпей с выявленными рудопроявлениями и месторождениями, представляющими в большинстве случаев корневые части рудных систем. Их сэродированные части характеризуются золото-серебряно-полисульфидной и золото-полисульфидной специализацией, в то время как нижние (сохранившиеся) представлены преимущественно золото-гематит-пиритовой минерализацией. Основную роль в питании россыпей играло оруденение с золото-полисульфидной специализацией.

Типохимизм самородного золота Шаманихо-Столбовского рудного района

С целью уточнения представлений о формационном типе золотого оруденения Шаманихо-Столбовского района проведён сравнительный анализ геохимических особенностей распространённого в нём самородного золота с геохимическими особенностями золота молибден-медно-порфировой и золото-кварцевой

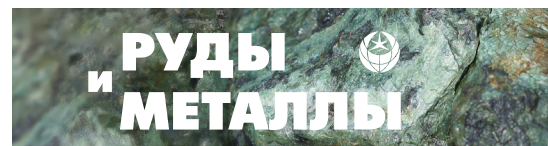


Таблица 2. Геохимические особенности самородного золота минеральных типов оруденения

Table 2. Geochemical features of native gold of the ore mineralization mineral types

Минеральный тип оруденения	Пробность золота	Основные микропримеси	Микровключения
Золото-гематит-пиритовый	Преимущественно высокопробное	Cu, Pb, Bi, Fe	Пирит , гематит, <i>тетрадимит</i>
Золото-полисульфидный	Преимущественно среднепробное	Cu, Pb, Bi, Fe	Пирит, галенит, <i>гематит, тетрадимит, халькопирит</i>
Золото-серебряно-полисульфидный	Преимущественно низкопробное	Cu, Pb, Bi, Fe	Пирит, галенит , <i>павонит, матильдит, тетраэдрит, ютенбогаардтит</i>

Примечание. Жирным шрифтом указаны элементы и минералы, присутствующие в повышенном количестве, курсивом – в пониженном.

формаций соответственно Тополево-Хетачанского и Центрально-Колымских рудных районов. Образцы золота из них анализировались в Центральной лаборатории бывшего объединения «Севостгеология» по методике И. П. Ланцева (г. Магадан, аналитик Н. П. Оверченко).

Для типизации самородного золота по его геохимическим особенностям в статистическую обработку результатов микроспектрального анализа образцов самородного золота по всем трём районам** были включены Cu, Bi, Pb, Ni, Mn, Sb, Te, Pd, Fe, As, а также пробность золота, установленная на дубликатах образцов с помощью микрозондовых анализаторов.

Средствами пакета прикладных программ «Leader» комбинированными методами кластер-анализа по комплексу элементов-примесей проведена типизация самородного золота (Аналитический центр СВКНИИ ДВО РАН, оператор – ведущий инженер С. Г. Морозова) и выделено семь его геохимических типов.

Для характеристики геохимической специализации выделенных типов самородного золота использован показатель (Δ) – нормированное отклонение содержания элементов в данном геохимическом типе самородного золота. Он рассчитывался по формуле:

$$\Delta = \ln (C_b / C_o),$$

** Использовались результаты микроспектрального анализа образцов, проанализированных по методике И. П. Ланцева.

где C_b и C_o – соответственно средние значения концентраций элемента в данном геохимическом типе и во всей совокупности проб (среднее между всеми геохимическими типами). Этот показатель указывает на индикаторную роль элементов в геохимических типах самородного золота. Если среднее содержание элемента в геохимическом типе превышает его среднее содержание во всей совокупности проб, то их отношение больше 1, а показатель нормированного отклонения имеет положительное значение. Чем он больше, тем более высокую индикаторную роль играет элемент в данном геохимическом типе.

Индикаторная роль элементов в выделенных геохимических типах самородного золота показана на рис. 5.

Индикаторная значимость геохимических типов самородного золота в рассматриваемых районах определялась по показателю k – средневзвешенной доле проб золота данного геохимического типа в рудных и россыпных проявлениях данного золотоносного района. Он рассчитывался по формуле [11]:

$$k = \ln [(n_{m,r} \times N) / (n_r \times n_m)],$$

где $n_{m,r}$ – число проб золота данного геохимического типа в золотоносных объектах данного района; N – общее число проанализированных проб золота; n_r – число проб золота в целом по геохимическим типам; n_m – то же по районам. Геохимические типы золота

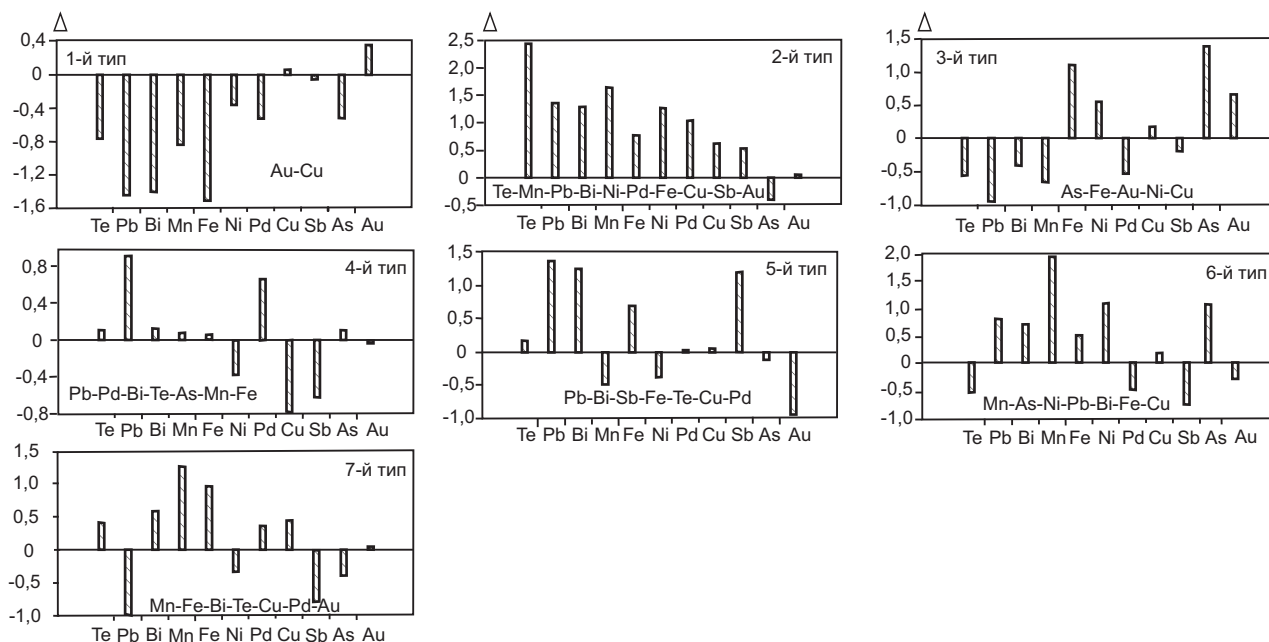


Рис. 5. Индикаторная роль элементов в установленных геохимических типах самородного золота:

Δ – нормированное отклонение содержания элементов в геохимических типах самородного золота. В надписях на диаграммах – элементы, играющие положительную индикаторную роль, расположенные в порядке убывания значений их Δ

Fig. 5. Indicator role of elements in established geochemical types of native gold:

Δ – normalized deviation of the content of elements in geochemical types of native gold. In the inscriptions on the diagrams, elements playing a positive indicator role are arranged in descending order of their Δ

с положительным значением показателя k являются статистически значимыми («законными») в золотоносных объектах рассматриваемых рудных районов. Чем выше значение показателя, тем большую индикаторную роль (как индикаторный признак) играет данный геохимический тип золота в золотоносных объектах характеризуемого района.

Распределение геохимических типов золота в золотоносных объектах рассматриваемых рудных районов и значения показателей их средневзвешенной доли приведены в таблице 3.

Как следует из таблицы 3, по роли геохимических типов самородное золото Шаманихо-Столбовского района отличается и от самородного золота Центрально-Колымских золото-кварцевых объектов, и от золота молибден-медно-порфировых проявлений Тополево-Хетачанского рудного района. Индикаторным для Шаманихо-Столбовского района

является золото четвертого (с марганец-мышьяк-теллур-висмут-палладий-свинцовой специализацией) и шестого (с железо-висмут-свинец-никель-мышьяк-марганцевой специализацией) типов, несвойственных орудуению Центрально-Колымских и Тополево-Хетачанского районов.

По результатам корреляционного анализа и метода главных компонент в самородном золоте Шаманихо-Столбовского района в тесной корреляционной связи с его пробностью находятся теллур и висмут*** (рис. 6). Это также отличает самородное золото Шаманихо-Столбовского района от самородного золота рудных объектов золото-кварцевого формационного типа Центральной Колымы (пробность

*** Мерой связи между элементами служит коэффициент корреляции, который численно равен косинусу угла между радиусами, проведенными из центра круга к соответствующим фигуративным точкам элементов [12].

Таблица 3. Распределение геохимических типов самородного золота по золотоносным районам

Table 3. Distribution of geochemical types of native gold by gold-bearing regions

Золотоносный район	Геохимический тип самородного золота							n_m
	1-й	3-й	4-й	6-й	5-й	7-й	2-й	
Центрально-Колымские	$\frac{23}{\mathbf{0,74}}$	$\frac{6}{\mathbf{0,63}}$	$\frac{1}{-1,70}$	–	$\frac{1}{-1,61}$	–	–	31
Шаманихо-Столбовской	$\frac{1}{-1,84}$	$\frac{1}{-0,62}$	$\frac{10}{\mathbf{1,15}}$	$\frac{3}{\mathbf{1,04}}$	$\frac{2}{-0,38}$	$\frac{1}{-0,06}$	–	18
Тополево-Хетачанский	–	–	$\frac{1}{-1,21}$	$\frac{1}{-0,11}$	$\frac{8}{\mathbf{0,96}}$	$\frac{3}{\mathbf{0,99}}$	$\frac{6}{\mathbf{1,27}}$	19
n_r	24	7	12	4	6	4	11	68

Примечание. В числителе число проб (шт.), в знаменателе – показатель средневзвешенной доли проб золота данного геохимического типа в золотоносных объектах данного золотоносного района k ; n_r – число проб (шт.) в целом по геохимическим типам; n_m – то же по золотоносным районам. Положительные значения k выделены жирным шрифтом. Прочерк – данный геохимический тип самородного золота не установлен.

золота коррелируется с медью и никелем) и молибден-медно-порфировых проявлений Тополево-Хетачанской зоны (в корреляционной связи с пробностью золота находятся медь и марганец) и указывает на золото-редкометалльную специализацию развитых в районе рудных систем, связанных с гранитными интрузиями.

В целом можно отметить, что явно выраженная зональность развития оруденения в единых рудных системах, наличие двухфазного строения золотин, состав микропримесей и микровключений в самородном золоте и золото-редкометалльная специализация рудных проявлений в Шаманихо-Столбовском районе оруденения с золоторудными системами, связанными с восстановленными гранитоидами [9]. Источником его в золоторудных узлах, очевидно, являлись устанавливаемые по геофизическим данным не вскрытые гранитоидные массивы.

Закключение

Полученная характеристика геохимических особенностей самородного золота Шаманихо-Столбовского района в совокупности с данными о составе распространенных в нём микровключений указывает, что развитое в этом районе золотое оруденение может быть отнесено к классу месторождений золота, связанных с восстановленными гранитоидами. В англоязычной геологической литературе они обозначаются аббревиатурой RIRGD (Reduced In-

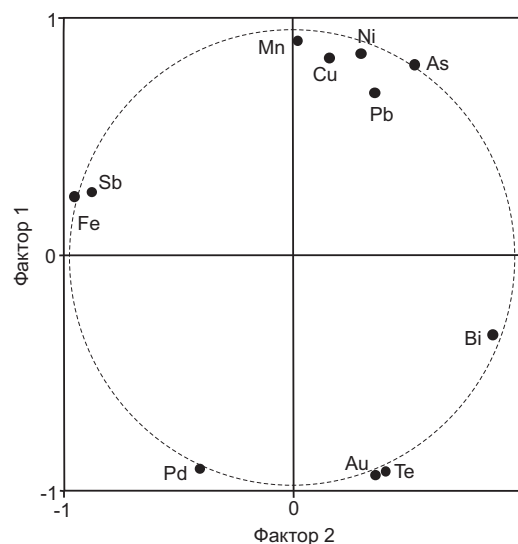


Рис. 6. Структура комплекса элементов-примесей в самородном золоте Шаманихо-Столбовского рудного района в координатах главных факторов

Fig. 6. Structure of the complex of impurity elements in native gold of the Shamanikha-Stolbovaya ore region in coordinates of the main factors

trusive Related Gold Deposit) [18 и др.]. Свойственная для них зональность оруденения в Шаманихо-Столбовском районе выражается в смене золото-гематит-пиритового типа минерализации золото-полисульфидным и золото-серебряно-полисульфидным. Они характеризуются соответственно преимущественно высокопробной, среднепробной и низкопробной генерациями самородного золота, высокой частотой встречаемости и повышенным

содержанием меди, свинца, висмута и железа. Геохимическая зональность оруденения проявляется в повышении в самородном золоте золото-серебряно-полисульфидного типа минерализации концентраций свинца и уменьшении содержаний висмута и железа. Основную роль в питании россыпей играло оруденение с золото-полисульфидной специализацией.

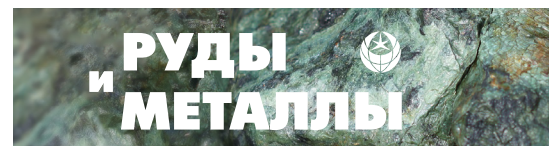
Индикаторным по геохимической типизации в золоторудных и россыпных объектах Шаманиха-Столбовского района является золо-

то с марганец-мышьяк-теллур-висмут-палладий-свинцовой и с железо-висмут-свинец-никель-мышьяк-марганцевой специализацией при общем золото-редкометалльном характере рудных систем.

Выявленные геохимические особенности самородного золота RIRGD-систем Шаманихо-Столбовского рудного района могут использоваться при прогнозе новых рудных объектов подобного типа и оценке степени их эродированности.

Список литературы

1. Бирюков А. А. Типоморфизм самородного золота месторождения Надежда (Магаданская область) // Геология, география, биологическое разнообразие и ресурсы Северо-Востока России: Материалы III Всероссийской конференции, посвящённой памяти А. П. Васьяковского и в честь его 105-летия (Магадан, 12–14 октября 2016 г.); [отв. ред. Н. А. Горячев]. – Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 2016. – С. 104–106.
2. Бирюков А. А. Минералого-генетические аспекты золоторудных объектов в пределах Глухаринского рудно-россыпного узла // Научная молодежь – Северо-Востоку России: Материалы VII Межрегиональной конференции молодых ученых. – Магадан : ООО «Типография», 2018. – С. 6–11.
3. Бирюков А. А., Михалицына Т. И., Фомина М. И. Геологическое строение и минералого-петрографическая характеристика рудопроявления Темный // Чтения памяти акад. К. В. Симакова: Материалы докладов Всероссийской научной конференции. – Магадан : СВНЦ ДВО РАН, 2013. – С. 77–79.
4. Геологическая карта и Карта полезных ископаемых Колымо-Омолонского региона. Масштаб 1 : 500 000 / Отв. исполнитель В. М. Кузнецов. – Магадан : Комитет природных ресурсов по Магаданской области; СевВостНИЦМИС. 1998.
5. Глухов А. Н. Геологическое строение и состав руд золоторудного месторождения Надежда (Магаданская область) // Отечественная геология. – 2013. – № 4. – С. 7–17.
6. Глухов А. Н., Савва Н. Е., Буляков Г. Х., Фомина М. И., Бирюков А. А. Самородное золото в рудах и россыпях Глухаринского узла, Магаданская область // Руды и металлы. – 2018. – № 2. – С. 55–64.
7. Горячев Н. А., Жилин К. И. Самородное золото одного из районов центрального Приколымья // Полезные ископаемые Якутии: Бюллетень научно-технической информации. – Якутск : ЯФ СО АН СССР, 1984. – С. 15–16.
8. Казанцев А. С., Жарикова Л. П. Стратиграфия рыхлых отложений правобережья р. Колымы // Кайнозой Восточной Якутии. – Якутск : ЯНЦ СО АН СССР, 1980. – С. 76–86.
9. Литвиненко И. С., Шилина Л. А. Золотое оруденение Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла // Вестник СВНЦ ДВО РАН. – 2022. – № 2. – С. 26–44.
10. Оверченко Н. П., Приставко В. А., Есипенко А. Г., Козырева Т. П. Определение примесей в природных золотинах «ЭКСА-Au» // Геология, география, биологическое разнообразие и ресурсы Северо-Востока России: Материалы Дальневосточной региональной конференции, посвящённой памяти А. П. Васьяковского и в честь его 100-летия (Магадан, 22–24 ноября 2011 г.). – Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 2011. – С. 45–46.
11. Приставко В. А., Пляшкевич А. А., Морозова С. Г. Геолого-геохимические типы руд и метасоматитов месторождения Нодди (Южно-Омолонский рудный район) // Геодинамика, магматизм и минералогия континентальных окраин Севера Тихоокеанского региона: Материалы Всероссийского совещания, посвящённого 90-летию академика Н. А. Шило (XII годичное собрание Северо-Восточного отделения ВМО). Магадан, 3–6 июня 2003 г. – Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 2003. – Том 3. – С. 136–139.
12. Приставко В. А., Пляшкевич А. А., Трушнин А. В., Морозова С. Г. Распределение ареалов комплексного оруденения по геохимическим данным



- (Омсукчанский район) // Проблемы металлогении рудных районов Северо-Востока России: сборник научных трудов. – Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 2005. – С. 220–233.
13. Савва Н. Е., Бирюков А. А., Глухов А. Н. Типоморфизм самородного золота Глухаринского рудно-россыпного узла (Магаданская область) // Вестник СВНЦ ДВО РАН. – 2018. – № 2. – С. 18–28.
 14. Садовский А. И., Шашурина И. Т., Шишкин В. А. О новом перспективном типе золотого оруденения в Шаманихо-Столбовском узле // Колыма. – 1975. – № 11. – С. 42–44.
 15. *Спектрографическое определение элементов-примесей в самородном золоте. Инструкция № 141-С.* – М. : ВИМС, 1976. – 41 с.
 16. Федотов А. И. К вопросу о возрасте золотого оруденения Шаманихо-Столбовского района // Колыма. – 1964. – № 7. – С. 41–43.
 17. Флеров И. Б., Шишкин В. А., Шашурина И. Т. О морфологии и возрасте золоторудных тел Шаманихо-Столбовского района // Колыма. – 1970. – № 11. – С. 41–42.
 18. Thompson J. F. H., Newberry R. J. Gold deposits related to reduced granitic intrusions // Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology. – 2000. – V. 13. – P. 377–400.
 1. Biryukov A. A. Tipomorfizm samorodnogo zolota mestorozhdeniya Nadezhda (Magadanskaya oblast') [Typomorphism of native gold of the Nadezhda deposit (Magadan region)]. In: Geologiya, geografiya, biologicheskoye raznoobraziye i resursy Severo-Vostoka Rossii: Materialy III Vserossiyskoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati A. P. Vas'kovskogo i v chest' yego 105-letiya (Magadan, 12–14 oktyabrya 2016 g.); otv. red. N. A. Goryachev [Geology, geography, biological diversity and resources of the North-East of Russia: Proceedings of the III All-Russian conference dedicated to the memory of A. P. Vas'kovsky and in honor of his 105th anniversary (Magadan, October 12–14, 2016); ed. N. A. Goryachev], Magadan, NEISRI FEB RAS Publ., 2016, pp. 104–106.
 2. Biryukov A. A. Mineralogo-geneticheskiye aspekty zolotorudnykh ob'yektov v predelakh Glukharinskogo rudno-rossypnogo uzla [Mineralogical and genetic aspects of gold ore objects within the Glukharinsky ore-placer cluster]. In: Nauchnaya molodezh' – Severo-Vostoku Rossii: Materialy VII Mezhhregional'noy konferentsii molodykh uchenykh [Scientific youth – to the North-East of Russia: Proceedings of the VII Interregional Conference of Young Scientists], Magadan, OOO «Tipografiya», 2018, pp. 6–11.
 3. Biryukov A. A., Mikhailitsyna T. I., Fomina M. I. Geologicheskoye stroyeniye i mineralogo-petrograficheskaya kharakteristika rudoproyavleniya Temnyu [Geological structure and mineralogical and petrographic characteristics of the Temny ore occurrence]. In: Chteniya pamyati akad. K. V. Simakova: Materialy dokladov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii [Readings in memory of academician K. V. Simakov: Proceedings of the reports of the All-Russian scientific conference], Magadan, NESCFEB RAS Publ., 2013, pp. 77–79.
 4. Fedotov A. I. K voprosu o vozraste zolotogo orudeneniya Shamanikho-Stolbovskogo rayona [On the age of gold mineralization in the Shamanikho-Stolbovsky region], *Kolyma [Kolyma]*, 1964, No 7, pp. 41–43. (In Russ.)
 5. Flerov I. B., Shishkin V. A., Shashurina I. T. O morfologii i vozraste zolotorudnykh tel Shamanikho-Stolbovskogo rayona [On the morphology and age of gold ore bodies of the Shamanikho-Stolbovsky region], *Kolyma [Kolyma]*, 1970, No 11, pp. 41–42. (In Russ.)
 6. Geologicheskaya karta i Karta poleznykh iskopayemykh Kolymo-Omolonskogo regiona. Masshtab 1 : 500 000 / Otv. ispolnitel' V. M. Kuznetsov [Geological map and map of useful minerals of the Kolyma-Omolon region. Scale 1 : 500 000 / Responsible executor V. M. Kuznetsov], Magadan, Committee for Natural Resources of the Magadan Region, SevVostNITsMIS, 1998.
 7. Glukhov A. N. Geologicheskoye stroyeniye i sostav rud zolotorudnogo mestorozhdeniya Nadezhda (Magadanskaya oblast') [Geological structure and composition of ores of the Nadezhda gold deposit (Magadan region)], *Otechestvennaya geologiya [National geology]*, 2013, No 4, pp. 7–17. (In Russ.)
 8. Glukhov A. N., Savva N. E., Bulyakov G. Kh., Fomina M. I., Biryukov A. A. Samorodnoye zoloto v rudakh i rossypyakh Glukharinskogo uzla, Magadanskaya oblast' [Native gold from lodes and placers of the Glukhariny mining camp, Magadan region], *Rudy i metally [Ores and metals]*, 2018, No 2, pp. 55–64. (In Russ.)

9. Goryachev N. A., Zhilin K. I. Samorodnoye zoloto odnogo iz rayonov tsentral'nogo Prikolym'ya [Native gold of one of the districts of central Prikolymye]. In: Poleznye iskopayemye Yakutii: Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy informatsii [Mineral resources of Yakutia: Bulletin of scientific and technical information], Yakutsk, YaB SB AS USSR Publ., 1984, pp. 15–16.
10. Kazantsev A. S., Zharikova L. P. Stratigrafiya rykhlykh otlozheniy pravoberezh'ya r. Kolymy [Stratigraphy of loose deposits of the right bank of the river Kolyma]. In: Kaynozoy Vostochnoy Yakutii [Cenozoic of Eastern Yakutia], Yakutsk, YaSC SB AS USSR Publ., 1980, pp. 76–86.
11. Litvinenko I. S., Shilina L. A. Zolotoye orudeniye Nizhne-Myakitskogo rudno-rossypnogo uzla [Gold mineralization of the Nizhne-Myakitsky ore-placer cluster], *Vestnik SVNTS DVO RAN* [Bulletin of the NESCI FEB RAS], 2022, No 2, pp. 26–44. (In Russ.)
12. Overchenko N. P., Pristavko V. A., Esipenko A. G., Kozyreva T. P. Opredeleniye primesey v prirodnykh zolotinakh «EKSA-Au» [Determination of impurities in natural gold particles "EKSA-Au"]. In: Geologiya, geografiya, biologicheskoye raznoobrazie i resursy Severo-Vostoka Rossii: materialy Dal'nevostochnoy regional'noy konferentsii, posvyashchennoy pamyati A. P. Vas'kovskogo i v chest' yego 100-letiya (Magadan, 22–24 noyabrya 2011 g.) [Geology, geography, biological diversity and resources of the North-East of Russia: Proceedings of the Far Eastern regional conference dedicated to the memory of A. P. Vas'kovsky and in honor of his 100th anniversary (Magadan, November 22–24, 2011)], Magadan, NEISRI FEB RAS Publ., 2011, pp. 45–46. (In Russ.)
13. Pristavko V. A., Plyashkevich A. A., Morozova S. G. Geologo-geokhimicheskiye tipy rud i metasomatitov mestorozhdeniya Noddi (Yuzhno-Omolonskiy rudnyy rayon) [Geological and geochemical types of ores and metasomatites of the Noddi deposit (South Omolon ore region)]. In: Geodinamika, magmatizm i minerageniya kontinental'nykh okrain Severa Patsifiki : Materialy Vserossiyskogo soveshchaniya, posvyashchennogo 90-letiyu akademika N. A. Shilo (XII godichnoye sobraniye Severo-Vostochnogo otdeleniya VMO). Magadan, 3–6 iyunya 2003 g. [Geodynamics, magmatism and minerageny of the continental margins of the North Pacific: 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, June 3–6, 2003], Magadan, NEISRI FEB RAS Publ., 2003, Vol. 3, pp. 136–139.
14. Pristavko V. A., Plyashkevich A. A., Trushnin A. V., Morozova S. G. Raspredeleniye arealov kompleksnogo orudneniya po geokhimicheskim dannym (Omsukchanskiy rayon) [Distribution of areas of complex mineralization based on geochemical data (Omsukchan district)]. In: Problemy metallogeni rudnykh rayonov Severo-Vostoka Rossii: sbornik nauchnykh trudov [Problems of metallogeny of ore regions of North-East Russia: collection of scientific papers], Magadan, NEISRI FEB RAS Publ., 2005, pp. 220–233.
15. Savva N. E., Biryukov A. A., Glukhov A. N. Tipomorfizm samorodnogo zolota Glukharinskogo rudno-rossypnogo uzla (Magadanskaya oblast') [Typomorphism of native gold of the Glukharinsky ore-placer cluster (Magadan region)], *Vestnik SVNTS DVO RAN* [Bulletin of the NESCI FEB RAS], No 2, 2018, pp. 18–28. (In Russ.)
16. Sadovsky A. I., Shashurina I. T., Shishkin V. A. O novom perspektivnom tipe zolotoy orudneniya v Shamanikho-Stolbovskom uzle [On a new promising type of gold mineralization in the Shamanikho-Stolbovsky cluster], *Kolyma* [Kolyma], 1975, No 11, pp. 42–44. (In Russ.)
17. Spektrograficheskoye opredeleniye elementov primesey v samorodnom zolote. Instruksiya № 141-S [Spectrographic determination of impurity elements in native gold. Instruction No 141-S], Moscow, VIMS Publ., 1976, 41 p.
18. Thompson J. F. H., Newberry R. J. Gold deposits related to reduced granitic intrusions, Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology, 2000, Vol. 13, pp. 377–400.

Литвиненко Иван Степанович (Litvinenko@neisri.ru)

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

ФГБУН Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт
им. Н. А. Шило ДВО РАН, г. Магадан, Россия

Ivan Stepanovich Litvinenko

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher

N. A. Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute (NEISRI), FEB RAS,
Magadan, Russia

Особенности геологического строения, минерального состава руд и условий их формирования золоторудного месторождения Чульбаткан (Хабаровский край)

Писарев П. А.¹, Куприянова Т. Н.¹, Козлов Д. С.¹, Власов Е. А.², Колова Е. Е.³

¹ ООО «Удинск Золото» (ПАО «Полюс»), г. Хабаровск, Россия;

² МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия; ³ СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан, Россия

Аннотация. В статье представлены новые данные об особенностях геолого-структурного строения и минерального состава руд месторождения Чульбаткан. Показана взаимосвязь тектоники и процессов рудообразования на месторождении: руды локализуются в узлах пересечения систем разломов восток-северо-восточного и северо-западного простирания. Руды месторождения мало-сульфидные (не более 2–3 % сульфидов); полезные компоненты руд: золото (главный), серебро (путный).

Полученные в ходе исследований данные о геологическом строении и минеральном составе руд, составе газовой-жидких включений, выявленные рудоконтролирующие факторы позволяют отнести месторождение к золоторудным системам, связанным с восстановленными интрузиями (RIRGS), и выработать критерии поиска аналогичных объектов в Нижнем Приамурье.

Выводы, которые делают авторы, стали результатом многолетнего комплексного изучения месторождения Чульбаткан специалистами компании «Полюс» и ведущих российских научных центров. Новые данные по месторождениям RIRGS, хорошо известных за рубежом, вносят вклад в развитие изучения месторождений данного типа в России.

Ключевые слова: Чульбаткан, золото, золоторудное месторождение, Амгунь-Бичинское междуречье, теллуриды, восстановленные интрузии, RIRGS.

Для цитирования: Писарев П. А., Куприянова Т. Н., Козлов Д. С., Власов Е. А., Колова Е. Е. Особенности геологического строения, минерального состава руд и условий их формирования золоторудного месторождения Чульбаткан (Хабаровский край). Руды и металлы. 2026. № 1. С. 51–70. DOI: 10.47765/0869-5997-2026-10004.

Peculiarities of the geological structure, mineral composition of the ores, and formation conditions of the Chulbatkan gold deposit, Khabarovsk Krai

Pisarev P. A.¹, Kupriyanova T. N.¹, Kozlov D. S.¹, Vlasov E. A.², Kolova E. E.³

¹ LLC «Udinsk Zoloto» (PJSC Polyus), Khabarovsk, Russia; ² M. V. Lomonosov Moscow State University,

Moscow, Russia; ³ N. A. Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute (NEISRI), FEB RAS, Magadan, Russia

Annotation. The article presents new data on the geological and structural features and mineral composition of the Chulbatkan gold deposit. Relationship between the tectonic and ore formational processes at the deposit is demonstrated: the ores are localized at intersections between the east-northeast and southeast-northwest trending fault systems. The ores of the deposit are low-sulfide (no more than 2–3% sulfides); the useful components are gold (main) and silver (associated).

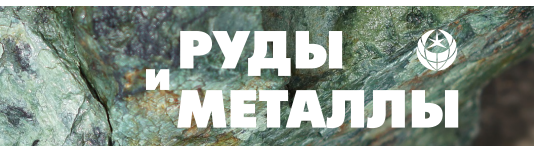
The research data regarding the geological structure and mineral composition of the ores, the gas-liquid inclusions composition, and the identified ore-controlling factors allow us to assign the Chulbatkan deposit to Reduced Intrusion-Related Gold Systems (RIRGS) and to develop prospecting criteria for similar objects in the Lower Amur Region.

The authors' conclusions are the result of a complex long-standing study of the Chulbatkan deposit by specialists from the “Polyus” company and Russian leading research centers. New data on RIRGS type deposits, well-known abroad, contribute to development of studying ore deposits of this type in Russia.

Keywords: Chulbatkan, gold, gold ore deposit, Amgun-Bichin interfluvial area, tellurides, reduced intrusions, Reduced Intrusion Related Gold Systems (RIRGS).

For citation: Pisarev P. A., Kupriyanova T. N., Kozlov D. S., Vlasov E. A., Kolova E. E. Peculiarities of the geological structure, mineral composition of the ores, and formation conditions of the Chulbatkan gold deposit, Khabarovsk Krai. Rudy i metally (Ores and metals). 2026. No. 1. pp. 51–70. DOI: 10.47765/0869-5997-2026-10004.





Введение

Месторождение Чульбаткан располагается на правом берегу р. Амгунь (левый приток р. Амур), в 18 км южнее посёлка Удинск (район им. Полины Осипенко, Хабаровский край) (рис. 1). Месторождение локализовано в пределах южной части Херпучинского рудно-россыпного узла и представляет собой крупный золоторудный объект с утверждёнными в 2025 г. запасами со средними содержаниями золота в руде до 1,2–1,5 г/т, серебра – 0,8 г/т.

Первые сведения о золоторудной минерализации на месторождении были получены ещё в 1949 г. (А. П. Кисец и др., 1960–1961 гг.). В 1983 г. по результатам поисковых работ Херпучинской геологической партии (В. А. Кайдалов и др., 1981–1986 гг.) было локализовано рудопоявление золота, представляющее собой штокверк, расположенный в эндоконтакте интрузии гранитоидов и приуроченный к тектоническому разлому северо-восточного простирания. Активные геологоразведочные работы на месторождении проводились в 2013–2022 гг. («Третья ГГК», «Kinross Gold Corporation») и продолжаются в настоящее время (компания «Полюс»). Первые данные о минеральном составе руд и метасоматитов опубликованы в работах [1, 2]. Полученные в ходе настоящего исследования данные о геологическом строении и минеральном составе руд, составе газовой-жидких включений, выявленные рудоконтролирующие факторы позволяют выработать критерии поиска аналогичных объектов в Нижнем Приамурье.

Геологическое строение

Месторождение Чульбаткан находится на территории Амгунь-Бичинского междуречья, в центральной части северного окончания Сихотэ-Алинской складчатой системы, где обнаружены структуры фундамента, сложенного интенсивно смятыми осадочными и вулканогенно-осадочными образованиями Горинской подзоны Баджало-Горинской структурно-формационной зоны (СФЗ) (рис. 1). С угловым и стратиграфическим несогласием на них залегают небольшие по площади, разрозненные маломощные покровы верхнемеловых, палео-

геновых и неогеновых вулканитов и галечников. Завершают разрез рыхлые современные континентальные отложения.

На территории Амгунь-Бичинского междуречья широко распространены разнообразные интрузивные образования, слагающие как крупные массивы, так и малые тела и дайки. Преобладают гранодиориты и близкие к ним тоналиты, плагиограниты. Отдельные массивы сложены лейкократовыми гранитами. Дайковый комплекс представлен диорит-порфирами, спессартитами, аплитами, гранит-порфирами, андезитами. Известные в районе месторождения магматиты отнесены к поздне-меловому нижнеамурскому гранодиоритовому комплексу, раннепалеогеновому гранодиорит-гранитному верхнеудоминскому комплексу, раннепалеогеновому диоритовому комплексу и эоценовому сизиманскому базальтовому комплексу.

Нижнеамурский комплекс слагает крупный многофазный Чульбатский массив, а также многочисленные малые тела и дайки. Первая фаза представлена кварцевыми диоритами биотит-роговообманково-пироксеновыми, малыми интрузивными телами и дайками диоритовых порфиритов. Вторая фаза слагает большую часть массива и представлена плагиогранитами, тоналитами и гранодиоритами. Породы второй фазы секутся многочисленными мелкими штокообразными телами третьей фазы – лейкократовыми плагиогранитами, дайками аплитов. Также в пределах массива известны субвертикальные пострудные дайки андезитов раннепалеогенового возраста.

Верхнеудоминский комплекс на рассматриваемой территории слагает небольшие трещинные тела и дайки гранодиорит-порфиров первой фазы и гранитов роговообманково-биотитовых второй фазы, цепочкой простирающихся вдоль водораздела рек Наткулчны и Большой и Малой Уды (В. А. Кайдалов и др., 1981–1986 гг.).

Раннепалеогеновый диоритовый комплекс представлен преимущественно дайками кварцевых диорит-порфиров, андезитов, равномерно разбросанных по всему району месторождения.

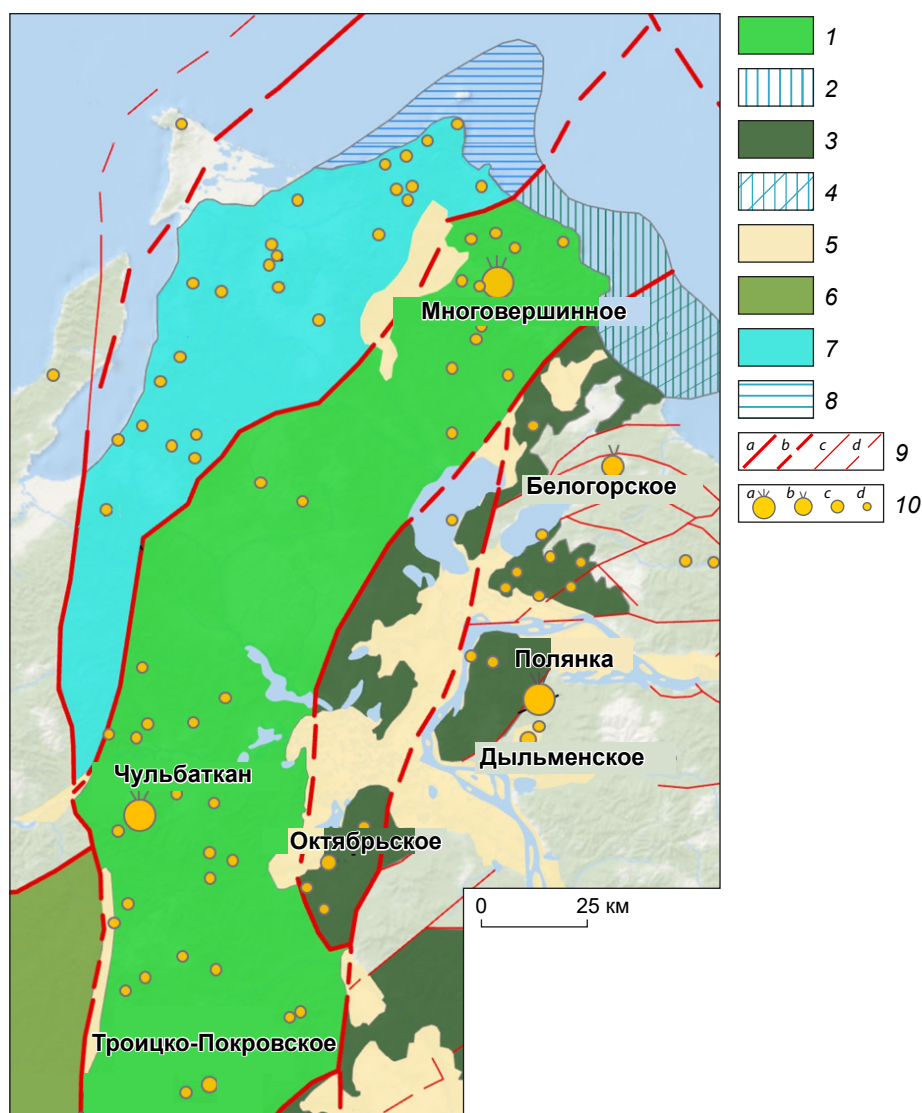


Рис. 1. Схема геолого-структурного районирования м-ба 1 : 1 000 000 (составлена на основе [13]):

Баджалло-Горинская СФЗ, Горинская подзона: 1 – в пределах материковой части, 2 – в пределах морской акватории; Западно-Сихотэалинская СФЗ, Приамурская подзона: 3 – в пределах материковой части, 4 – в пределах морской акватории; 5 – континентальные впадины; 6 – Баджалло-Горинская СФЗ, Бокторская подзона; Ульбанская СФЗ, Мевачанская подзона: 7 – в пределах материковой части, 8 – в пределах морской акватории; 9 – разрывные нарушения: *a* – основные достоверные, *b* – основные перекрытые, *c* – прочие достоверные, *d* – прочие перекрытые; 10 – золоторудные проявления: месторождения (*a* – крупные, *b* – средние, *c* – мелкие), рудопроявления (*d*)

Fig. 1. Schematic map showing the geological and structural regionalization, scale 1 : 1 000 000 (based on [13]):

1 – Gorin subzone of the Badzhal-Gorin structural-formational zone (SFZ), 2 – marine portion; Priamurskaya subzone of the West Sikhote-Alin SFZ: 3 – continental portion, 4 – marine portion; 5 – continental depressions; 6 – Boktor subzone of the Badzhal-Gorin SFZ; Mevachan subzone of the Ulban SFZ: 7 – continental portion, 8 – marine portion; 9 – faults: *a* – major proved, *b* – major covered, *c* – other proved, *d* – other covered; 10 – gold ore objects: ore deposits (*a* – large, *b* – medium, *c* – small), ore occurrences (*d*)

Сизиманский базальтовый комплекс сложен покровными и субвулканическими базальтами, трассирующими одно из оперений регионального Лимурчанского разлома.

Месторождение Чульбаткан локализовано на территории ~ 2 км² в юго-восточном эндоконтакте многофазного Чульбатского массива, площадь которого ~ 160 км² (рис. 2). Гранодиориты и плагиограниты Чульбатского массива характеризуются нормальной и умеренной щёлочностью ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 5,07\text{--}7,24$ %) калий-натриевого типа ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0,55\text{--}1,24$), высокой и весьма высокой глинозёмистостью ($\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO}) = 2,27\text{--}3,06$). Отличительная особенность пород массива – низкое отношение трёхвалентного железа к двухвалентному ($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO} = 0,17$), что указывает на восстановительные условия формирования. Минералогически эта особенность выражается в большом количестве акцессорного ильменита при почти полном отсутствии магнетита, то есть Чульбатский массив относится к ильменитовой серии [8, 17]. Находит она отражение и в магнитном поле: в результате магниторазведочных работ установлен низкий уровень интенсивности магнитного поля.

U-Pb изотопное датирование цирконов из гранитов и гранодиоритов рудного поля Чульбаткан выполнено методом LA-SF-ICP-MS в Лаборатории физических методов анализа Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ, аналитик В. Б. Хубанов). Выделение цирконов для анализа проведено в СВКНИИ ДВО РАН (г. Магадан). Проанализировано 11 проб, результаты по семи пробам показали возраст кристаллизации гранитоидов $92 \pm 90 \pm 1$ млн лет, по двум – 87 и 86 ± 1 млн лет. Одна проба, показавшая более древний возраст кристаллизации (~ 115 млн лет), содержит многочисленные унаследованные кристаллы цирконов, вероятно, захваченного характера. Таким образом, на данный момент исследований нижний возрастной предел возраста золоторудной минерализации можно оценить как постконьякский (моложе 86 ± 1 млн лет).

Геолого-структурная модель месторождения. Важную роль на месторождении играет взаимосвязь тектоники и рудообразования,

часто определяя и (или) контролируя направление развития и интенсивность рудообразующих метасоматических процессов. В связи с этим на месторождении был проведён обширный комплекс работ по ориентированному бурению, а также осуществлены исследования в скважинах с помощью методов оптического и акустического каротажа (acoustic and optical televiewer borehole logging). Большинство данных собрано по разведочным скважинам с направлением бурения на юго-восток, вквост генеральной структуры – Чульбатского разлома. Позднее с целью детализации, прослеживания выявленной рудной минерализации и геолого-структурного положения были выполнены отдельные буровые программы с юго-западной ориентировкой направления бурения.

Всего были собраны данные структурного анализа более чем со ста разведочных скважин колонкового бурения. Данные оптического и акустического каротажа позволили выделить более 80 тысяч различных структур (прожилки, контакты, трещины и др.), по результатам ориентированного бурения были выполнены замеры более 100 тысяч ориентированных структур.

Ранее отмечалось [1, 2], что рудные тела месторождения имеют вытянутую форму, простирающуюся на северо-восток с крутым падением на северо-запад, и приурочены к зоне сдвига-раздвига Чульбатского разлома с аналогичным простиранием. На стереограмме (рис. 3, а) представлена интерпретация полной выборки структурных данных (ЮВ направление бурения), подтверждающая влияние Чульбатского разлома при формировании месторождения. На стереограмме (рис. 3, б) приведены результаты отдельных программ ориентированного бурения ЮЗ направления, упомянутых ранее. В результате исследований было выявлено, что минерализация месторождения Чульбаткан локализуется в узлах пересечения систем разломов восток-северо-восточного (Чульбатский разлом) и северо-западного (Центральный, Придолинный и Западный разломы) простирания, которые являются одними из главных рудоконтролирующих факторов (рис. 3). Установлено, что

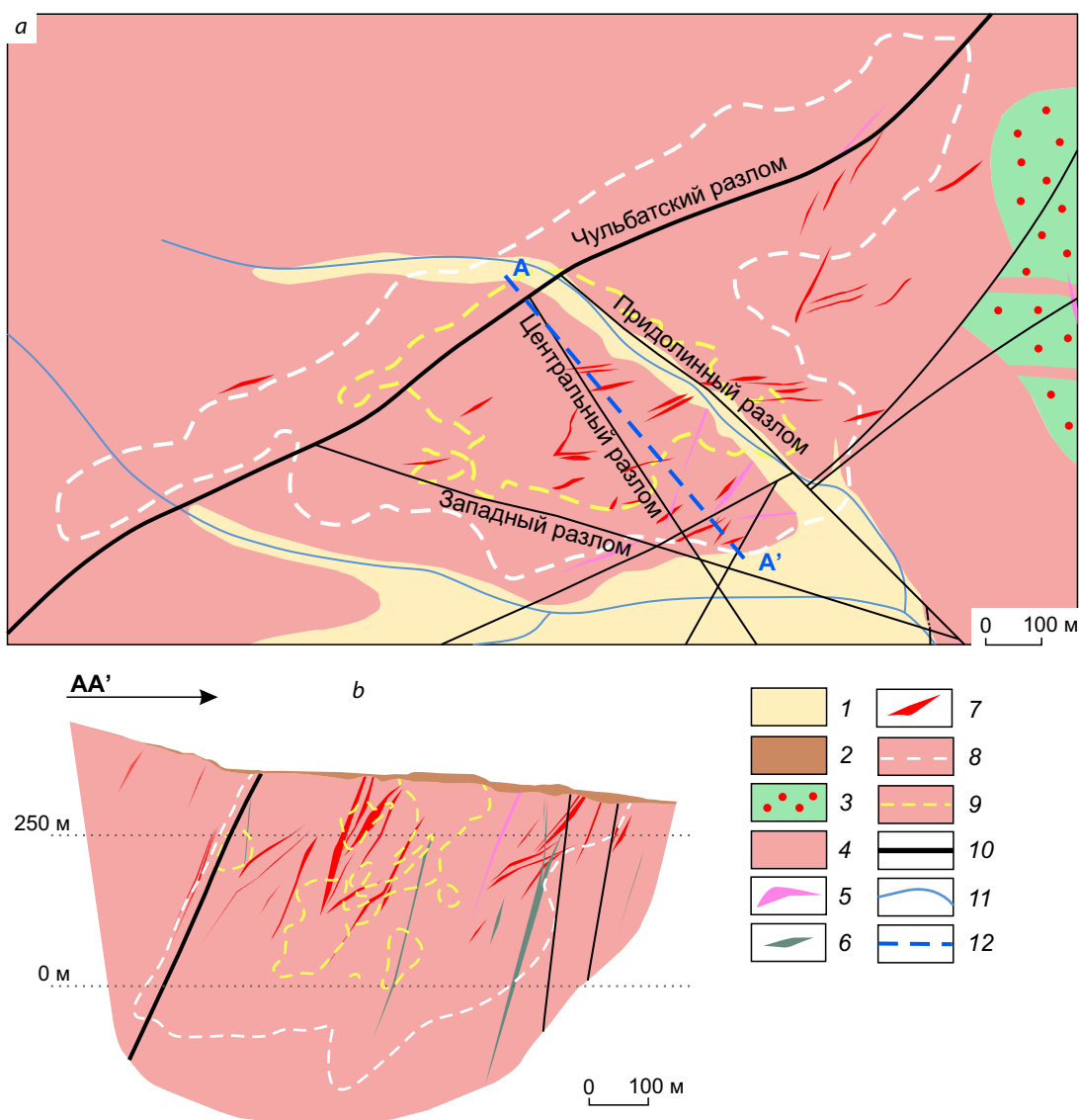


Рис. 2. Геологическая схема центральной части месторождения Чульбаткан (а) и разрез по линии AA' (б):
 1 – аллювиальные отложения; 2 – четвертичные элювиально-делювиальные отложения; 3 – ороговикованные алевролиты, песчаники (горинская свита); 4 – плагиограниты (вторая фаза нижнеамурского интрузивного комплекса); 5 – дайки диоритовых порфиров (третья фаза нижнеамурского интрузивного комплекса); 6 – дайки андезитов, спессартитов (пострудные); 7 – дайки аплитов (третья фаза нижнеамурского интрузивного комплекса); 8 – проекция бедного рудного домена; 9 – проекция богатого рудного домена; 10 – достоверные разломы; 11 – ручьи; 12 – линия разреза AA'

Fig. 2. (a) Schematic geological map of the central Chulbatkan deposit, (b) schematic geological cross-section along line AA':
 1 – alluvial deposits; 2 – Quaternary eluvial-deluvial deposits; 3 – hornified siltstones and sandstones (Gorin Formation); 4 – plagiogranites (second phase of the Nizhneamursky Suite); 5 – diorite porphyrite dikes (third phase of the Nizhneamursky Suite); 6 – andesite and spessartite dikes (post-ore); 7 – aplite dikes (third phase of the Nizhneamursky Suite); 8 – projection of the low-grade ore domain; 9 – projection of the high-grade ore domain; 10 – proved faults; 11 – streams; 12 – cross-section line AA'

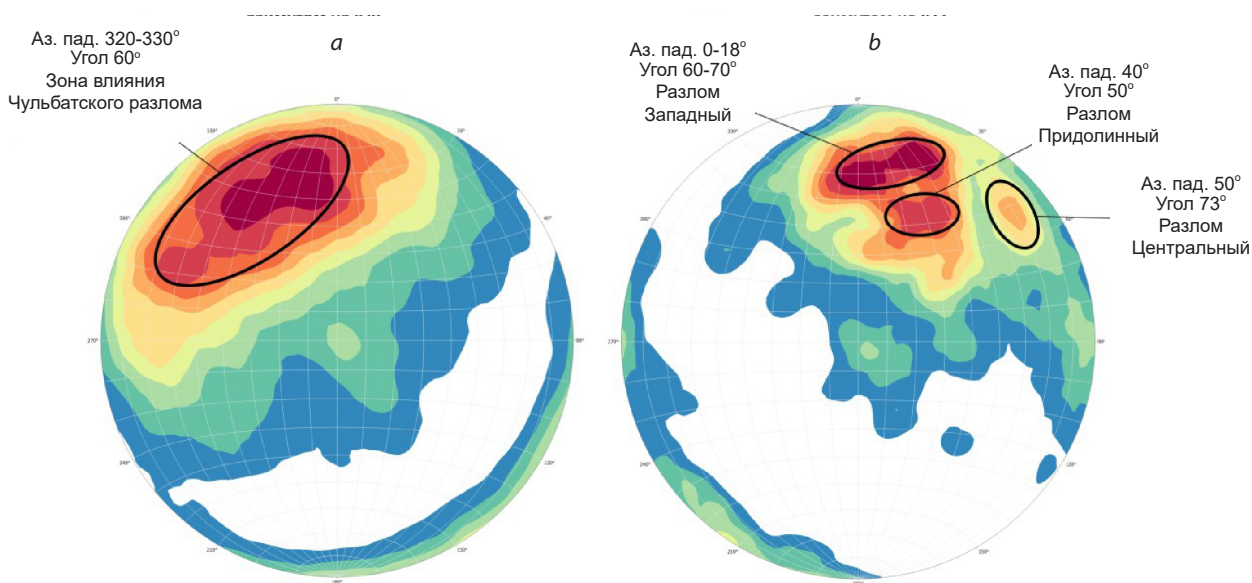


Рис. 3. Стереогаммы по данным ориентированного бурения (проекция на верхнее полушарие, степень достоверности данных 3, 4):

a – по данным ориентированного бурения с азимутом на ЮВ (полная выборка); *b* – по данным ориентированного бурения с азимутом на ЮЗ (блок богатых руд)

Fig. 3. Stereograms based on oriented drilling data (upper hemisphere, confidence degree 3, 4):

a – oriented drilling azimuth toward southeast (whole ore zone); *b* – oriented drilling azimuth toward southwest (high-grade ore block)

оруденение не имеет единого генерального простирания. Частично оно тянется вдоль Чульбатского разлома, но основная его часть приурочена к лежащему блоку Чульбатского разлома и представляет собой штокверковое «скопление микропрожилков» неправильной формы, которое простирается в двух направлениях: восток-северо-восточном и юго-восточном (рис. 4).

Чульбатский разлом был прослежен с максимальной степенью достоверности по так называемой зоне «black marker», представленной интервалом интенсивно перетёртых пород чёрного цвета со средней мощностью 20–30 см, в единичных пересечениях до 1 м (рис. 5, *a*).

Разлом Западный контролирует оруденение с юго-запада и простирается на северо-запад, разлом Центральный тянется через всю минерализованную зону, Придолинный трасируется вдоль долины ручья Чульбаткан. Выделенные разломы не так явно выражены в керне скважин, как Чульбатский разлом, но при детальном изучении отмечаются зонами

повышенной трещиноватости, раздробленности, катаклазирования и брекчирования пород (рис. 5, *b*).

На рисунке 4, *b* на разрезах представлены контуры бедного (содержание > 0,1 г/т) и богатого (> 1 г/т) рудных доменов, которые были выделены по результатам kernового опробования. На структурно-геологическом плане видно, что как бедное, так и богатое оруденение приурочено не только к Чульбатскому разлому, но и к области сочленения разломов, которая явилась ослабленной зоной, предпочтительной для проникновения гидротермальных рудоносных растворов.

Гидротермально-метасоматические процессы на месторождении, в целом, проявлены неравномерно. Выделяется четыре основных типа метасоматических изменений рудовмещающих пород: березитизация, карбонатизация, аргиллизация и окварцевание. Иногда отмечается связь между интенсивностью гидротермально-метасоматических изменений и степенью дробления пород. Березитизированные

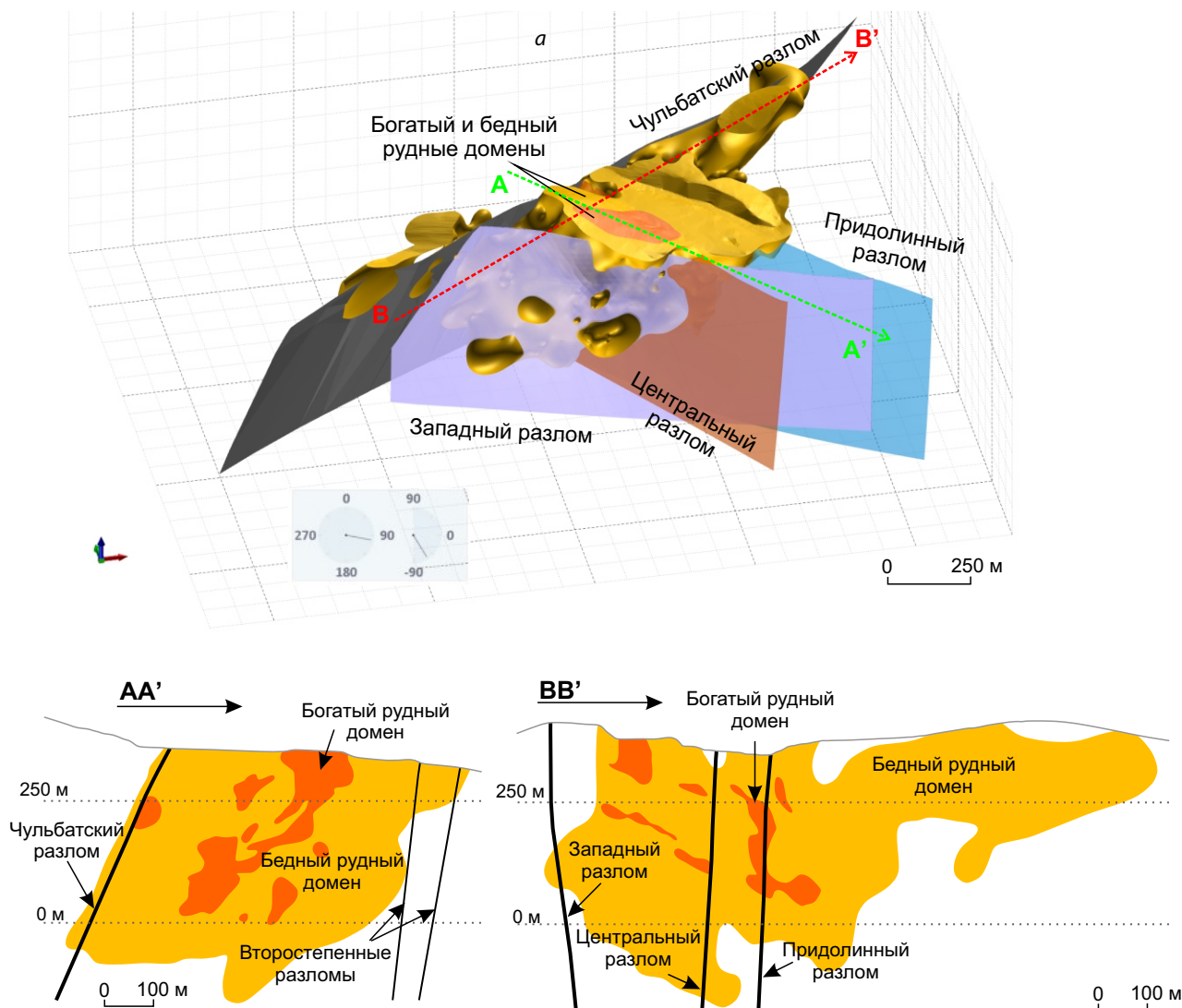


Рис. 4. Трёхмерная модель рудной минерализации и рудоконтролирующих разломов месторождения Чульбаткан (а) и схематические разрезы с положением рудных доменов (б)

Fig. 4 (a) 3D model of the ore mineralization and ore-controlling faults of the Chulbatkan deposit and (b) schematic geological cross-sections along lines AA' and BB', showing position of the ore domains

породы находятся в различных сочетаниях и соотношениях в составе рудных тел и представляют собой классическую колонку березитизации: гранитоиды умеренно-кислого состава – внешняя хлоритовая зона – промежуточная серицит-карбонатная зона – внутренняя кварцево-серицитовая зона. Карбонатизация проявляется в замещении доломитом, реже анкеритом и кальцитом кристаллов плагиоклаза и биотита. При этом карбонатизация сопровождала рудный процесс на всех стадиях

минералообразования (дорудной, синрудной и пострудной). Аргиллизация отмечена в виде единичных пятен гипогенной каолинизации.

Ранее уже было отмечено [2], что окварцевание, наложенное на березитизированные породы, проявлено в виде зон метасоматического замещения с реликтами первичной структуры, а также жил замещения с неровными краями. Породы зон бедных руд (бедный домен) преимущественно березитизированы, карбонатизированы и аргиллизированы, степень

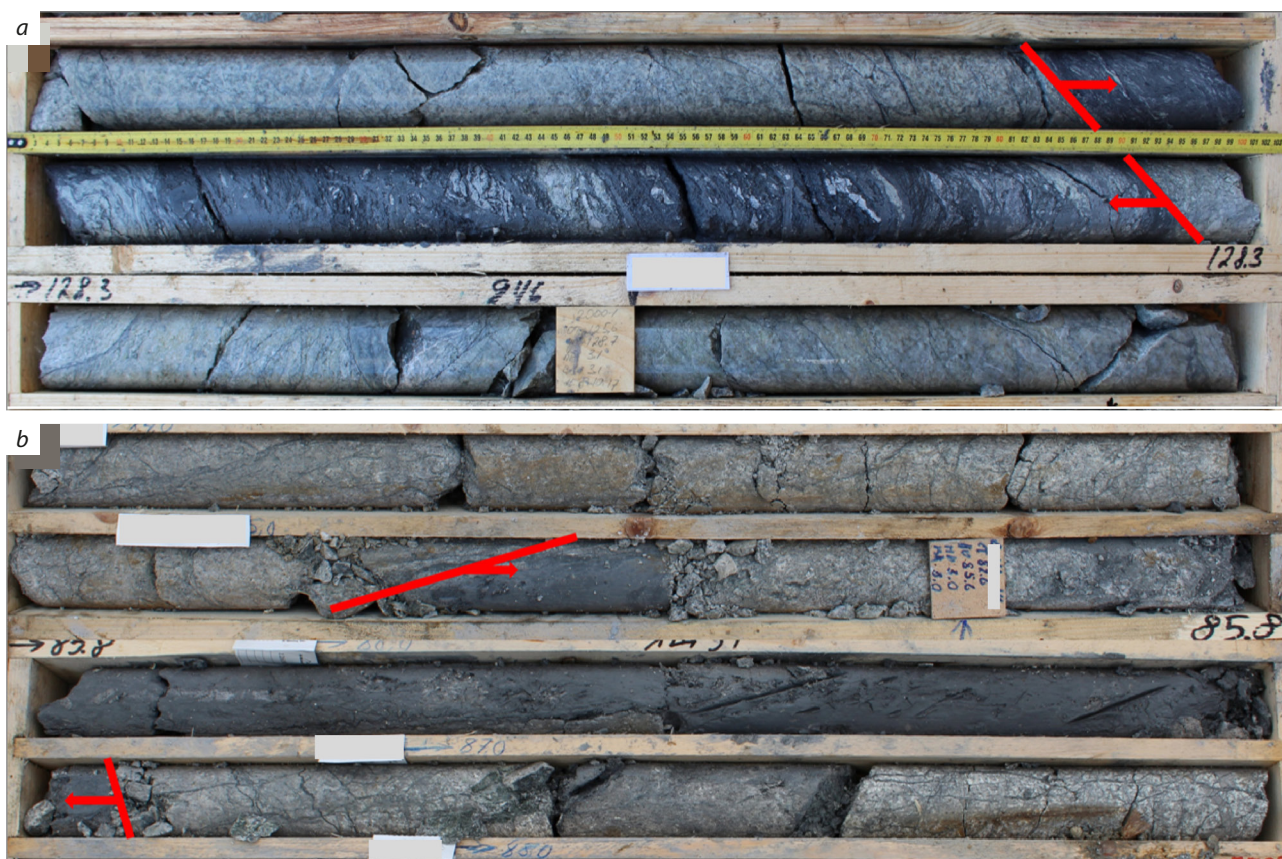


Рис. 5. Фотографии керн с примерами разломов (выделены красным цветом):
а – Чульбатский, б – Центральный

Fig. 5. Fault intervals in the borehole core photos (marked in red):

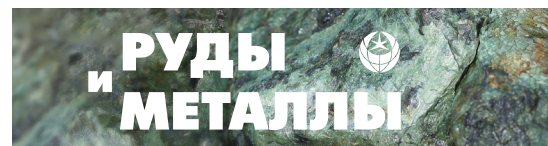
а – Chulbatsky fault, б – Central fault

же их окварцевания незначительная. В зонах богатых руд (богатый домен) проявлены как процессы березитизации, так и более позднего достаточно интенсивного окварцевания; с последним, главным образом, связано золотое оруденение.

В целом, плагиограниты, гранодиориты, тоналиты в большей степени подвержены метасоматозу, чем аплиты даечного комплекса. Последние в основном окварцованы и карбонатизированы. Андезиты преимущественно не изменены, реже карбонатизированы, серицитизированы и хлоритизированы. Золоторудные образования проявлены в плагиогранитах и в гранит-, гранодиорит-аплитах, пострудные дайки андезитов не содержат золотой минерализации.

Минеральный состав руд

Вещественный состав руд изучался в аншлифах из кернового материала с различным содержанием золота (от 2,4 до более 100 г/т), для исследований отбирались фрагменты керна с максимальной концентрацией сульфидов. Минералого-петрографические исследования проводились в лабораториях геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. Для получения изображений в отражённых электронах, качественного и количественного микроанализа минералов использовался сканирующий электронный микроскоп Jeol JSM-IT500 (лаборатория локальных методов исследования кафедры петрологии и вулканологии геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, аналитик В. Д. Щербаков).



Прибор оснащён энергодисперсионным спектрометром XMax^N (Oxford Instruments) с площадью кристалла 50 мм². Условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток электронного зонда 0,7 нА, диаметр пучка электронов 2–3 мкм. Непосредственная продолжительность накопления ЭД-спектра составляла 70–100 секунд. Для оптимизации условий измерений (приведения условий анализа к условиям измерения стандартов) использовался металлический кобальт.

Руды месторождения вкрапленные или прожилково-вкрапленные, количество рудных минералов обычно не превышает 3–5 %, в отдельных изученных образцах – до 20–25 об. %. В некоторых случаях рудные минералы образуют равномерную вкрапленность, но чаще всего они распределены неравномерно: образуют небольшие гнезда, развиваются по трещинам, в брекчированных породах тяготеют к цементу брекчии. В составе руд установлены пирит, халькопирит, сфалерит, галенит, пирротин, молибденит, тетраэдрит-(Zn), тетрадимит, алтаит, теллуrowисмутит, гессит, вольтскит, рутил, минералы золота – калаверит, петцит, самородное золото. Следует отметить, что в богатых рудах возрастает распространённость теллуридов, и золото-серебряные теллуриды начинают играть роль важных минералов-концентраторов Au и Ag.

В исследованных рудах было выделено три главных минеральных ассоциации: ранняя (дорудная), сульфидная и золото-теллуридная (продуктивная). Подобный порядок отложения рудных минералов на месторождении Чульбаткан ранее отмечался и другими исследователями [1, 2, 12].

Ранняя (дорудная) ассоциация сложена пиритом-1, рутилом, нерудными минералами – карбонатом, серицитом, хлоритом. Формирование минералов ассоциации связано с процессами гидротермально-метасоматического изменения рудовмещающих пород. Пирит-1 является наиболее распространённым минералом руд. Он образует как плохо сформированные округлые кристаллы и небольшие их сростки, так и кристаллы кубического и кубооктаэдрического габитуса. Размер выделений пирита-1 меняется от долей миллиметра

до 1,5–2 мм, наиболее крупные кристаллы часто катаклазированы. Пирит-1 нередко ассоциирует с карбонатом и рутилом (рутил отмечается в виде включений в пирите-1, иногда корродирует его), содержит многочисленные включения нерудных минералов. В отражённых электронах кристаллы пирита-1, как правило, кавернозны, с помощью электронно-зондовых исследований примеси в минерале не установлены.

Сульфидная ассоциация сложена пиритом-2, сфалеритом, тетраэдритом-(Zn), халькопиритом, галенитом, редкими пирротином и молибденитом. Пирит-2 представлен округлыми, реже кубическими кристаллами размером 0,1–1,0 мм. Пирит-2 тяготеет к зонам трещиноватости пород, образуя прожилки мощностью от долей миллиметра до 2–3 мм (за счёт обильных включений пирита-2 эти зоны приобретают тёмно-серую окраску). В брекчированных породах пирит-2 развит в цементе брекчии. По сравнению с первой генерацией пирит-2 часто лучше огранён и, как правило, свободен от микровключений. Как и в случае пирита-1, кристаллы пирита-2 бывают сильно катаклазированы. В отражённых электронах кристаллы пирита-2 могут проявлять слабо выраженную зональность (рис. 6, а). На изображениях, полученных в отражённых электронах, светлые зоны содержат примесь мышьяка (до 4,1 мас. %).

Отложение других сульфидов ассоциации происходило позднее пирита-2. Чешуйчатый молибденит нарастает на кристаллы пирита-2. Сфалерит образует отдельные ксеноморфные зёрна (0,05–1,0 мм) в кварце, вместе с другими сульфидами часто развивается в агрегатах пирита-2, «цементируя» его кристаллы. Для сфалерита характерна тонкая эмульсионная вкрапленность халькопирита, причём распределение включений халькопирита может быть неравномерным, что, видимо, связано с зональным строением зёрен сфалерита. Сфалерит близок теоретической формуле, из примесей в минерале присутствует только Fe (до 0,5 масс. %).

Тетраэдрит-(Zn) встречен в виде ксеноморфных зёрен в кварце, тетраэдрит-(Zn) нарастает на пирит-2, нередко развивается в нём по

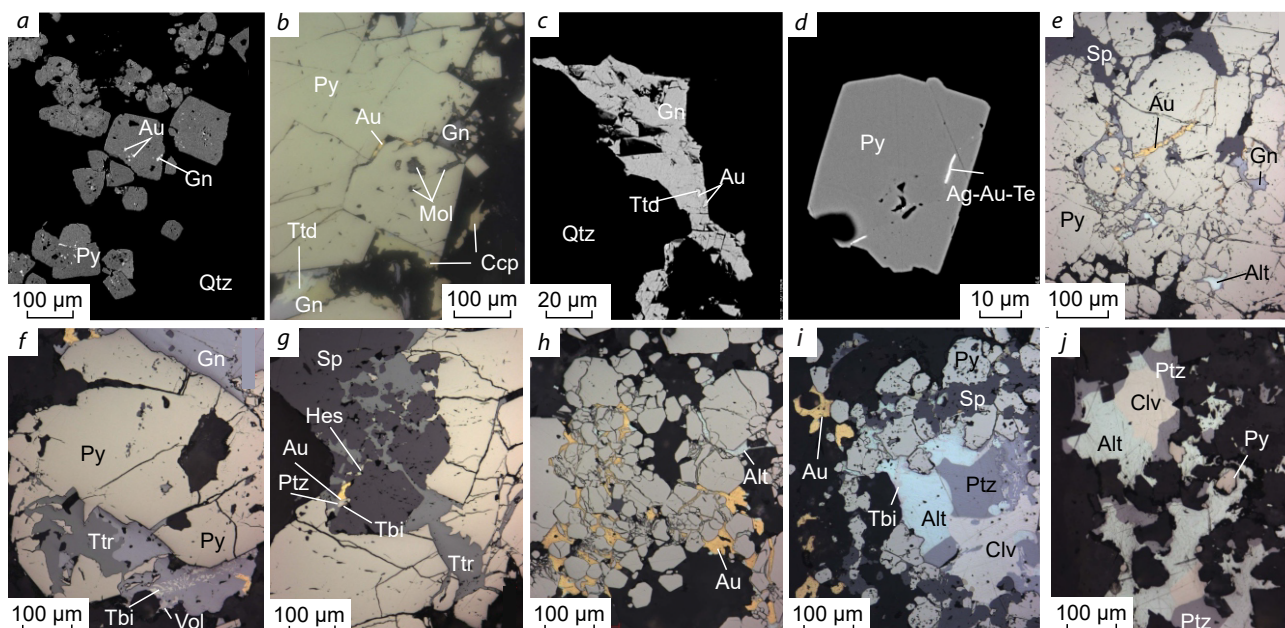


Рис. 6. Минералы золото-теллуридной ассоциации в рудах с умеренным содержанием золота (a–d) и богатых руд (e–j):

a – включения галенита и самородного золота (877–880 ‰) в слабозональном пирите (светлые зоны обогащены As до 4,1 мас. %); *b* – самородное золото (832–842 ‰), тетрадимит, галенит, халькопирит и молибденит, отлагающиеся на кристаллах пирита и по трещинам в них; *c* – включения самородного золота (754 ‰) и тетрадимита в зерне галенита; *d* – тонкие включения недиагностированного теллурида золота и серебра (Ag-Au-Te) в кристалле пирита; *e* – самородное золото (933–935 ‰), алтаит, галенит и сфалерит, отлагающиеся по трещинам в агрегате зёрен пирита; *f* – самородное золото (860 ‰), теллуровисмутит и волинскит в галенит-тетраэдрит-пиритовом агрегате; *g* – самородное золото (921 ‰), петцит, гессит и теллуровисмутит в тетраэдрит-сфалеритовом агрегате, частично заместившим пирит; *h* – самородное золото (935–937 ‰) и алтаит, развивающиеся по трещинам и межзерновым границам в агрегате пирита; *i* – самородное золото (933–935 ‰), алтаит, петцит, калаверит и теллуровисмутит в сростании с пиритом и сфалеритом); *j* – агрегат калаверита, петцита и алтаита в кварце. Фото *a*, *c*, *d* – в отражённых электронах, *b*, *e*–*j* – в отражённом свете. Alt – алтаит, Au – золото, Ccp – халькопирит, Clv – калаверит, Gn – галенит, Hes – гессит, Mol – молибденит, Ptz – петцит, Py – пирит, Qtz – кварц, Sp – сфалерит, Tbi – теллуровисмутит, Ttd – тетрадимит, Ttr – тетраэдрит, Vol – волинскит

Fig. 6. Minerals of the gold-telluride assemblage: (a–d) in medium-grade gold ores and (e–j) in high-grade gold ores:

a – inclusions of galena and native gold (877–880 ‰) in unclearly zonal pyrite (the light zones are enriched in As up to 4.1 wt. %); *b* – native gold (832–842 ‰), tetradymite, galena, chalcocopyrite, and molybdenite, deposited over pyrite crystals and in their cracks; *c* – inclusions of native gold (754 ‰) and tetradymite in a galena grain; *d* – fine inclusions of an undiagnosed telluride of gold and silver in a pyrite crystal; *e* – native gold (933–935 ‰), altaite, galena, and sphalerite, deposited along fractures in an aggregate of pyrite grains; *f* – native gold (860 ‰), tellurobismuthite, and volynskite in a galena-tetrahedrite-pyrite aggregate; *g* – native gold (921 ‰), petzite, hessite, and tellurobismuthite in a tetrahedrite-sphalerite aggregate partially replacing pyrite; *h* – native gold (935–937 ‰) and altaite, developing along fractures and intergranular boundaries in a pyrite aggregate; *i* – native gold (933–935 ‰) and altaite, developing along fractures and intergranular boundaries in a pyrite aggregate; *j* – aggregate of calaverite, petzite, and altaite in quartz. Photos *a*, *c*, *d* – in reflected electrons, *b*, *e*–*j* – in reflected light. Alt – altaite, Au – gold, Ccp – chalcocopyrite, Clv – calaverite, Gn – galena, Hes – hessite, Mol – molybdenite, Ptz – petzite, Py – pyrite, Qtz – quartz, Sp – sphalerite, Tbi – tellurobismuthite, Ttd – tetradymite, Ttr – tetrahedrite, Vol – volynskite

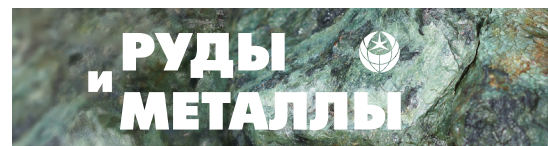


Таблица 1. Химический состав тетраэдрита-(Zn)

Table 1. Chemical composition of tetrahedrite-(Zn)

№ образца	1	2	3	4	5	6	7
Масс. %							
Cu	40,29	38,72	37,20	39,62	38,11	38,43	37,24
Fe	0,61	0,56	0,82	-	0,39	0,51	-
Zn	7,54	7,54	6,92	7,91	7,21	7,48	7,40
As	9,00	2,89	2,38	6,87	2,36	4,96	1,10
Sb	17,95	25,27	26,76	19,73	27,19	22,88	28,03
S	26,63	25,23	25,24	25,86	25,65	25,63	24,31
Сумма	102,02	100,21	99,32	99,99	100,91	99,89	98,08
Атомов на формулу							
Cu	9,90	10,01	9,74	10,03	9,83	9,85	9,99
Fe	0,17	0,16	0,24	-	0,11	0,15	-
Zn	1,80	1,89	1,76	1,94	1,80	1,86	1,93
As	1,88	0,63	0,53	1,47	0,52	1,08	0,25
Sb	2,30	3,41	3,66	2,61	3,66	3,06	3,92
S	12,95	12,90	13,07	12,95	13,08	13,00	12,90
Sb/(Sb + As)	0,55	0,84	0,87	0,64	0,88	0,74	0,94
Fe/(Fe + Zn)	0,09	0,08	0,12	0,00	0,06	0,07	0,00

трещинам. Отмечается частичное замещение тетраэдритом-(Zn) более раннего сфалерита. Сурьмянистость (Sb/(Sb + As)) тетраэдрита-(Zn) меняется в интервале 0,55–0,94, железистость (Fe/(Fe + Zn)) – 0,00–0,12 (табл. 1). В отражённых электронах тетраэдрит-(Zn) проявляет слабовыраженную ростовую зональность: от центра зёрен к краям, как правило, наблюдается повышение сурьмянистости.

Халькопирит в изученных образцах представлен обособленными ксеноморфными зёрнами, минерал нарастает на кристаллы пирита-2 или самостоятельно или совместно с тетраэдритом-(Zn) развивается по трещинам в катаклазированном пирите, а также (нередко вместе с пирротинном) образует неправильной формы включения в пирите-2.

Галенит, видимо, является одним из наиболее поздних минералов сульфидной ассоциации. Главным образом он отлагается в агрегатах катаклазированных кристаллов пирита, развиваясь в них по трещинам и в межзерновом пространстве или образуя в кристаллах

пирита изометричные включения (до 30 мкм). Изредка встречаются обособленные зёрна галенита (до 0,2 мм) и сростки галенита с тетраэдритом-(Zn), халькопиритом и самородным золотом.

В ассоциации со сфалеритом и галенитом нередко отмечается карбонат доломит-анкеритового ряда. Как правило, он представлен хорошо сформированными ромбоэдрическими кристаллами размером до 0,3 мм. Кристаллы карбоната в отражённых электронах демонстрируют зональное строение – содержание Fe (в масс. %) меняется в интервале 0,6–12,9, Mn – 0,3–0,9. Видимо, галенит и сфалерит отлагались как совместно с карбонатом, так и позднее, нарастая на его хорошо сформированные кристаллы.

Золото-теллуридная (продуктивная) ассоциация. В рудах с умеренным содержанием золота (2,2–9,8 г/т) данная ассоциация проявлена слабо. Выявлены самородное золото, тетрадимит и редкие микронного размера недиагностированные теллуриды Au и Ag

Таблица 2. Химический состав алтаита, теллуrowисмутита и тетрадимита

Table 2. Chemical composition of altaite, tellurobismuthite, and tetradymite

Минерал	Масс. %						Атомов на формулу				
	Pb	Bi	Sb	S	Te	Сумма	Pb	Bi	Sb	S	Te
Алтаит	60,76	-	-	-	37,83	98,60	0,99				1,01
	60,56	-	-	-	37,42	97,98	1,00				1,00
	61,36	-	-	-	37,99	99,35	1,00				1,00
Теллуrowисмутит	-	50,23	-	-	47,96	98,19		1,95			3,05
	-	38,95	9,39	-	50,44	98,78		1,41	0,59		3,00
	-	51,45	-	-	48,30	99,75		1,97			3,03
	-	50,61	-	-	47,27	97,88		1,98			3,02
Тетрадимит	-	57,80	-	4,40	36,18	98,38		1,98		0,98	2,03
	-	57,17	-	4,70	36,69	98,57		1,93		1,04	2,03

(рис. 6, *d*). Тетрадимит развивается в трещинах кристаллов пирита, замещает более ранний халькопирит. Самородное золото образует единичные округлые или слегка удлинённые включения в кристаллах пирита и в халькопирит-блэклюдных агрегатах, вместе с тетрадимитом отлагается в пирите по трещинам, образует включения в более раннем галените (рис. 6, *b, c*). Размер зёрен самородного золота не превышает 10 мкм, его пробность 754–938 ‰.

В богатых рудах (десятки-сотни г/т) золото-теллуридная ассоциация проявлена в наибольшей мере. В рудах установлены обильные выделения алтаита, теллуrowисмутита, вольтскита, калаверита, петцита, гессита и самородного золота. Алтаит является наиболее ранним минералом золото-теллуридной ассоциации богатых руд. Он отлагается в трещинах кристаллов пирита, частично замещает галенит и тетраэдрит-(Zn); размер его зёрен не превышает 0,5 мм. Алтаит отвечает своему теоретическому составу (табл. 2). Теллуrowисмутит и более редкий вольтскит образуют включения в галените или сростки с алтаитом. Размер выделений теллуrowисмутита и вольтскита меняется от первых микрометров до 30 мкм. Некоторые выделения теллуrowисмутита имеют зональное строение, связанное с наличием в составе примеси Sb (до 9,1 масс. %) (табл. 2).

Минералы Au представлены калаверитом, петцитом и самородным золотом; самородное золото является главным концентратом Au, калаверит и петцит распространены в меньшей степени. Самородное золото, как правило, находится в сростаниях с теллуридами, в свободной форме встречается редко. Минералы образуют, рассекают и частично замещают более ранние минералы сульфидной ассоциации (рис. 6, *e–h*). Облик агрегатов самородного золота уплощённый или изометричный, размер меняется от первых десятков микрометров до 0,3 мм. В присутствии калаверита самородное золото имеет наибольшую пробность (до 938 ‰). В рудах, не содержащих в своём составе калаверит, пробность золота снижается. В последнем случае золото ассоциирует с петцитом, гесситом, вольтскитом. Самородное золото по составу весьма однородно: кроме серебра другие примеси не выявлены.

Калаверит в отражённом свете имеет светло-жёлтую с розовым оттенком окраску, при скрещенных николях проявляет яркую анизотропию. Размеры выделений калаверита меняются от 50 до 300 мкм. В некоторых зёрнах калаверита установлены редкие вроски серицита. Составы калаверита хорошо рассчитываются на формулу AuTe₂, в одном анализе минерала определена примесь Ag (0,6 масс. %) (табл. 3).

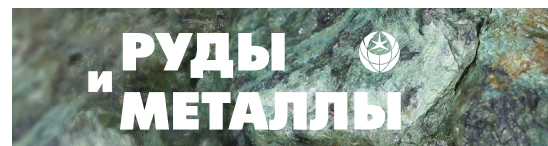


Таблица 3. Химический состав калаверита, петцита, гессита и волынскита

Table 3. Chemical composition of calaverite, petzite, hessite, and volynskite

Минерал	Масс. %					Атомов на формулу			
	Ag	Au	Bi	Te	Сумма	Ag	Au	Bi	Te
Калаверит	-	42,53	-	57,93	100,47		0,97		2,03
	0,56	41,23	-	56,28	98,07	0,02	0,96		2,02
	-	42,81	-	56,89	99,70		0,98		2,02
Петцит	41,68	25,34	-	33,25	100,27	2,99	1,00		2,02
	42,16	25,59	-	33,63	101,38	2,99	0,99		2,02
	41,00	24,71	-	32,90	98,61	2,99	0,99		2,03
	41,79	25,09	-	33,04	99,92	3,00	0,99		2,01
	41,92	25,56	-	33,38	100,86	2,99	1,00		2,01
	41,35	25,19	-	33,00	99,54	2,99	1,00		2,02
	41,39	25,10	-	32,70	99,20	3,00	1,00		2,00
Гессит	62,72	-	-	37,39	100,11	1,99			1,01
	62,03	-	-	36,86	98,89	2,00			1,00
Волынскит	18,72	-	35,47	44,14	98,33	1,01		0,99	2,01

Петцит и гессит являются наиболее поздними рудными минералами исследованных руд. Они представлены редкими неправильной формы зёрнами (до 40 мкм) в галените и сфалерит-тетраэдритовых агрегатах (рис. 6, *i*). Петцит может нарастать на самородное золото и агрегаты алтаита и калаверита (рис. 6, *j*). В таком случае размер выделений петцита достигает 0,3 мм. В гессите и петците примеси не установлены, минералы близки своим теоретическим формулам (табл. 3).

Результаты термобарогеохимических исследований

Микротермометрические исследования флюидных включений выполнены в СВКНИИ ДВО РАН при помощи измерительного комплекса, созданного на основе микротермокамеры THMSG-600 фирмы «Linkam» (Англия), микроскопа «Motic», видеокамеры «Moticam» и управляющего компьютера. Исследовано девять образцов, из которых было изготовлено 13 двухсторонне полированных пластинок. В целом, весь кварц насыщен флюидными

включениями (ФВ), но их размер, как правило, менее 3 мкм, что, наряду с низкой прозрачностью, является ограничением для выполнения термобарогеохимического анализа. Вследствие этого изучено всего 35 индивидуальных ФВ в кварце шести образцов (табл. 4). Размер ФВ оценивается по диаметру описываемой вокруг ФВ окружности. Коэффициент наполнения ФВ (в таблице 4 обозначен F) рассчитан при условии, что ФВ имеют уплощённую форму, по формуле: $КН = S_{ж}/S_{в} \times 100$, где $S_{ж}$ – площадь жидкой фазы, $S_{в}$ – площадь вакуоли. Солевой состав растворов определялся по температурам эвтектики [3], концентрация солей по температуре плавления льда ($T_{пл}$ льда), согласно [14]. Расчёт концентраций солей, плотности и давлений водяного пара проводились с использованием программы «FLINCOR» [15] по системе [21].

Согласно методикам [7, 10, 11, 20] в кварце отбирались первичные и первично-вторичные ФВ. По фазовому составу при комнатной температуре обнаруженные во всех образцах ФВ – двухфазовые газовой-жидкие (рис. 7). По

Таблица 4. Результаты термобарогеохимических исследований флюидных включений в кварце из Чулбатканского месторождения

Table 4. Results of thermobarogeochemical studies of fluid inclusions in quartz from the Chulbatkan deposit

Зона отбора образцов	<i>n</i>	Размер ФВ, мкм	<i>F</i> , %	<i>T</i> _{гом.} , °С	<i>T</i> _{эвт.} , °С	<i>T</i> _{пл.} , °С	<i>C</i> масс. % экв. NaCl	<i>D</i> , г/см ³
Придолинный разлом	3	3–8	60–75	280–335	-21	-1	1,7	0,6
	11	3–6	70–89	210–240	-30...-28	-3...-1,3	4,9–2,1	0,8–0,9
Центральный разлом	2	5	67	265	-31	-2	3,3	0,8
	3	3–4	67–75	210–230	-45...-38	-3,2...-2	5,2–3,3	0,9
	3	4–5	60–80	128–145	-43	-3,6...-1,2	5,8–2	1
Западный разлом	4	5–11	75–80	230–240	-40...-38	-4...-3	6,4–4,9	0,9
	9	5–20	60–91	156–217	-32...-28	-3,6...-1,8	5,8–3	1

соотношению «жидкой» и «газовой» фаз 57 % ФВ имеют коэффициент наполнения от 60 до 75 (табл. 4), 43 % ФВ – от 80 до 90. Исследованы немногочисленные ФВ размером от 3 до 20 мкм. Флюидные включения в кварце распространены преимущественно группами, зачастую образуя «струи», но не редки случаи их расположения одиночно в центральных и краевых зонах кристаллов кварца (рис. 7). Обычно ФВ имеют удлинённую, реже округлую форму.

Температура гомогенизации ФВ меняется в диапазоне от 335 до 128 °С (табл. 4). Распределение температур гомогенизации по интервалам имеет одномодальный характер с пиком 200–225 °С.

Плавление последнего кристаллика льда во ФВ происходит при температурах от -1 до -4 °С (табл. 4), что соответствует концентрациям солей в растворах от 1,7 до 6,4 масс. % экв. NaCl.

В большинстве ФВ эвтектика раствора наблюдается в интервале от -46 до -28 °С, в наиболее высокотемпературных – при -21 °С (табл. 4). В целом, эти показатели соответствуют NaCl-системе с примесью магния и железа, довольно часто приближаясь к эвтектическим составам.

Кварц рудных зон, приуроченных к Придолинному разлому и характеризующихся меньшим распространением золото-блётчуродной минерализации, кристаллизовался в более высокотемпературных условиях, из гидротерм меньшей солёности, в составе которых было меньше примесей магния и железа. Кварц рудных зон Центрального разлома образовался в среднетемпературном интервале в присутствии более солёного флюида, насыщенного ионами магния и железа. Наиболее низкотемпературный режим был в системе формирования кварца рудных зон Западного разлома, в которых проявлен наибольший спектр минералов теллура, золота, серебра, при этом солёность гидротерм была наивысшей из зафиксированных. Тренды изменения физико-химических параметров (рис. 7, б) также различаются: рудные зоны Придолинного разлома формировались в условиях остывания, а Центрального и Западного разломов – остывания и разбавления.

Обсуждение полученных результатов

Тектонический рудоконтролирующий фактор является одним из ключевых: месторождение приурочено к пересечению систем тектонических нарушений северо-восточного (главный

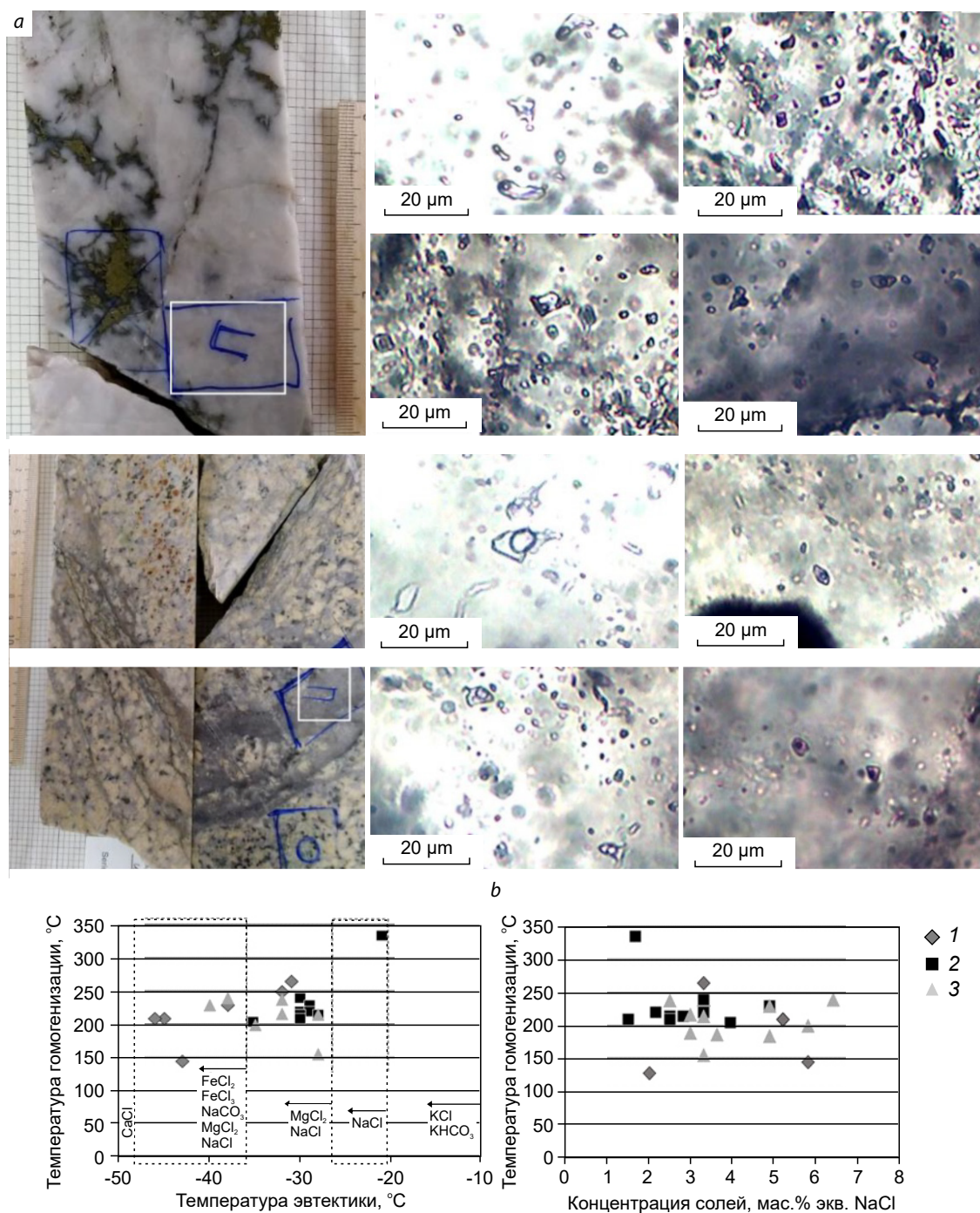


Рис. 7. Фотографии образцов, отобранных для проведения термобарогеохимического анализа, и некоторых из изученных ФВ (а); диаграммы зависимости температуры гомогенизации от температуры эвтектики и концентрации солей (b): из рудных зон: 1 – Центрального разлома, 2 – Придолинного разлома, 3 – Западного разлома

Fig. 7. (a) Photos of the samples taken for thermobarogeochemical analysis and of some studied fluid inclusions and (b) diagrams of dependence of the homogenization temperature on the eutectic temperature and salt concentration: from ore zones of: 1 – Central fault, 2 – Pridolinnyy fault, 3 – Western fault

Чульбатский разлом) и северо-западного простираения (второстепенные разломы – Центральный, Придолинный, Западный), вследствие чего рудное тело представляет собой микроштокверковую минерализованную зону неправильной формы, не имеющую единого генерального направления. Бедный рудный домен частично простирается вдоль Чульбатского разлома, частично локализуется в тысячем блоке; богатый рудный домен концентрируется главным образом в лежачем блоке.

Полезные компоненты руд месторождения Чульбаткан – золото (главный) и серебро (попутный). В исследованных рудах было выделено три главных минеральных ассоциации: ранняя (дорудная), сульфидная и золото-теллуридная (продуктивная). В богатых рудах возрастает распространённость теллуридов, которые, наряду с самородным золотом, начинают играть роль важных минералов-концентраторов Au и Ag.

Проведённые термобарогеохимические исследования показали, что кварц рудных образований формировался при температурах от 335 до 128 °С из среднеконцентрированных (6,4–1,7 масс. % экв. NaCl) хлоридных растворов, насыщенных ионами Fe, Mg и Na. Основная масса кварца кристаллизовалась в диапазоне температур от 250 до 175 °С. В работе [2] приведены результаты исследования ФВ в дорудном жильном кварце. Температуры гомогенизации первичных флюидных включений составили 325–330 °С, концентрация солей в растворе 5,4 масс. % экв. NaCl, что коррелирует с полученными нами данными. В изученных авторами образцах были идентифицированы ФВ с углекислотой, концентрация которой, по их оценкам, составляет 2,5 моль/кг раствора, и метаном – 0,6 моль/кг раствора, а плотность углекислотно-водного флюида – 0,87 г/см³. Давление флюида, оценённое для ассоциаций углекислотно-водных и газовых флюидных включений в кварце, захваченных в периоды гетерогенизации флюида, составляет 440 бар при температуре 330 °С.

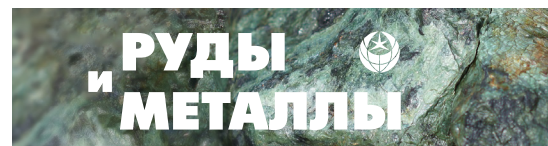
По ряду характерных признаков месторождение Чульбаткан отвечает глобально распространённому классу месторождений,

связанных с восстановленными интрузиями (RIRGS), выделенному в конце прошлого века в золоторудном поясе Тинтина [16].

Приуроченность к активной континентальной окраине и неоднократная тектономагматическая активизация территории являются благоприятными условиями для размещения месторождений этого класса.

Гранодиориты и плагиограниты вмещающего месторождение Чульбатского массива мелового возраста характеризуются нормальной и умеренной щёлочностью калий-натриевого типа, высокой и весьма высокой глинозёмистостью. Локализация массива в поясе развития пород ильменитовой серии [8], низкое отношение двухвалентного железа к трёхвалентному, преобладание акцессорного ильменита при отсутствии магнетита указывают на то, что массив формировался в восстановительных условиях. Характер гидротермально-метасоматических изменений, в которых ведущую роль играют березитизация и окварцевание, также говорит в пользу золоторудных систем, связанных с восстановленными интрузиями [5, 16, 19].

Малосульфидный состав руд (< 3 %), ассоциация золота с минералами теллура (алтаит, калаверит, петцит и др.), небольшие размеры золотин (0,004–0,066 мм) и высокая пробность позволяют отнести месторождение Чульбаткан к аналогичным по генетическому типу объектам на северо-западе североамериканского континента и на северо-востоке России. Результаты исследования флюидных включений дают возможность утверждать, что температура, солёность и насыщенность CO₂ рудообразующего флюида соответствуют типу RIRGS [5, 16, 19]. Геохимические особенности месторождения, проявленные во вторичных ореолах рассеяния, такие как ассоциация золота с Ag, Sb, Cu, Pb, Te, Bi, Zn, наличие Au-As-Bi с W и Sn рудного фактора, низкие содержания Rb и Nb в породах массива, корреляция содержаний золота и теллура на уровне более 90 %, также позволяют предположить, что месторождение Чульбаткан относится к золоторудным системам, связанным с восстановленными интрузиями [9].



Выводы

Проведённые исследования позволили установить руководящую роль структурного рудоконтролирующего фактора на месторождении Чульбаткан. Изучение минерального состава богатых руд выявило тесную связь золота и минералов теллура (калаверит, петцит), которые играют значительную роль и концентрируют большую часть золота месторождения. Впервые приводятся данные исследования газовой-жидких включений из кварца рудных образований, позволяющие глубже взглянуть на условия формирования месторождения.

По совокупности признаков (минеральный и химический состав вмещающих пород и руд, характер гидротермально-метасоматических образований, состав газовой-жидких включений, положение в региональных структурах и т. д.) месторождение Чульбаткан можно отнести к классу месторождений, связанных с восстановленными интрузиями (RIRGS). Данный вывод представляет практический инте-

рес в связи с тем фактом, что известные мировые примеры месторождений этого класса группируются в протяжённые пояса (например, в Восточной Австралии, на Аляске, на северо-востоке России) [4–6, 16, 18, 19]. Большинство RIRGS объектов – крупнотоннажные, с низкими содержаниями, например, Форт Нокс или Даблин Галч. Запасы руды этих месторождений варьируют от десятков до нескольких сотен миллионов тонн при содержаниях 0,8–1,4 г/т. В Нижнем Приамурье, в целом, и в междуречье Амгунь–Бичи, в частности, известно множество слабоизученных гранитоидных массивов, в некоторых из которых установлены признаки золоторудной минерализации.

Изученные данные и результаты исследований дают основание прогнозировать наличие на этой территории объектов, аналогичных месторождению Чульбаткан, для поиска которых применим опыт, полученный на Чульбаткане.

Список литературы

1. Алексеев А. С., Старостин В. И. Новое месторождение золота в Нижнем Приамурье – Чульбаткан (Хабаровский край) // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. – 2017. – Вып. 1. – С. 33–38.
2. Алексеев А. С., Шишакова Л. Н. Минеральный состав руд золоторудного месторождения Чульбаткан, Нижнее Приамурье, Хабаровский край // Руды и металлы. – 2017. – № 3. – С. 43–50.
3. Борисенко А. С. Изучение солевого состава газовой-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. – 1977. – № 8. – С. 16–27.
4. Волков А. В., Савва Н. Е., Сидоров А. А., Прокофьев В. Ю., Горячев Н. А., Вознесенский С. Д., Альшевский А. В., Чернова А. Д. Золоторудное месторождение Школьное (Северо-Восток России) // Геология рудных месторождений. – 2011. – Т. 53, № 1. – С. 3–31.
5. Волков А. В., Сидоров А. А. Прогнозно-поисковая модель месторождений золота, связанных с интрузивами гранитоидов Арктической зоны России // Арктика: экология и экономика. – 2018. – № 3 (31). – С. 84–99.
6. Волков А. В., Черепанова Н. В., Прокофьев В. Ю., Савва Н. Е., Смильгин С. В., Трубкин Н. В., Алексеев В. Ю. Месторождение золота в гранитоидном штоке Бутарный (Северо-Восток России) // Геология рудных месторождений. – 2013. – Т. 55, № 3. – С. 214–237.
7. Долгов Ю. А., Ермаков Н. П. Термобарогеохимия. – М.: Недра, 1979. – 271 с.
8. Меркулова Т. В., Мишин Л. Ф. Окислительно-восстановительные процессы в мезозойско-кайнозойских вулcano-плутонических системах и их роль в формировании региональных гравитационных и магнитных аномалий Дальнего Востока // Тихоокеанская геология. – 2015. – Т. 34, № 6. – С. 112–124.
9. Писарев П. А., Куприянова Т. Н., Козлов Д. С., Власов Е. А., Колова Е. Е. Особенности вещественного состава руд и формационная принадлежность золоторудного месторождения

Чульбаткан // Сб. тезисов докладов XIV Международной научно-практической конференции «Геология, прогноз, поиски и оценка месторождений алмазов, благородных и цветных металлов». – М. : ЦНИГРИ, 2025. – С. 328–331.

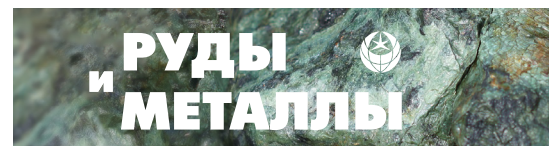
10. Рёддер Э. Флюидные включения в минералах. В 2-х т. Т. 1: Природа включений и методы их исследования / Пер. с англ. – М. : Мир, 1987. – Т. 1. – 560 с.
11. Рёддер Э. Флюидные включения в минералах. В 2-х т. Т. 2: Использование включений при изучении генезиса пород и руд / Пер. с англ. – М. : Мир, 1987. – Т. 2. – 632 с.
12. Фомина М. И., Михалицына Т. И. Характерные минералогические черты Au-кварцевого месторождения Чульбаткан (Хабаровский край) // Сб. тезисов докладов XIII Международной научно-практической конференции «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов». – М. : ЦНИГРИ, 2024. – С. 383–386.
13. Шаруева Л. И., Лопатин Б. Г. Государственная карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000. Третье поколение. Серия Дальневосточная. Лист N-54 (Николаевск-на-Амуре). – СПб. : ВСЕГЕИ, 2016.
14. Bodnar R. J. and Vityk M. O. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions / Fluid inclusions in minerals: methods and

applications, IMA short course volume. – Virginia Polytechnic Institute and State University Press, 1994. – P. 117–130.

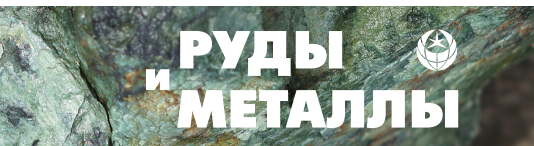
15. Brown P. E. FLINCOR: a microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data // American Mineralogist. – 1989. – V. 74. – P. 1390–1393.
16. Hart C. J. R. Reduced intrusion-related gold systems / Mineral deposits of Canada: a synthesis of major deposit types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods. – Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication. – 2007. – № 5. – P. 95–112.
17. Ishihara S. The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks // Mining Geology. – 1977. – № 27. – P. 293–305.
18. Logan J. M. Prospective areas for intrusion-related gold-quartz veins in Southern British Columbia // Geological Fieldwork 2000. – Paper 2001-1. – P. 113–134.
19. Thompson J. F. H., Sillitoe R. H., Baker T., Lang J. R., Mortensen J. K. Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces // Mineral Deposita. – 1999. – V. 34. – P. 323–334.
20. Van den Kerkhof A. M., Hein U. F. Fluid inclusion petrography // Lithos. – 2001. – V. 55 (1). – P. 27–47.
21. Zhang Y. G. and Frantz J. D. Determination of the homogenisation temperatures and densities of superficial fluids in the system NaCl-KCl-CaCl₂-H₂O using synthetic fluids inclusions // Chemical Geology. – 1987. – V. 64. – P. 335–345.

References

1. Alekseev A. S., Starostin V. I. Novoe mestorozhdenie zolota v Nizhnem Priamur'e – Chul'batkan (Khabarovskii krai) [New gold deposit in the Lower Amur region – Chulbatkan (Khabarovsk Krai)], *Vestnik MGU [Bulletin of Moscow State University]*. Series 4. Geology, 2017, Issue 1, pp. 33–38. (In Russ.)
2. Alekseev A. S., Shishakova L. N. Mineral'nyi sostav rud zolotorudnogo mestorozhdeniya Chul'batkan, Nizhnee Priamur'e, Khabarovskii krai [Mineral composition of ores of the Chulbatkan gold deposit, Lower Amur region, Khabarovsk Krai], *Rudy i metally [Ores and Metals]*, 2017, No 3, pp. 43–50. (In Russ.)
3. Borisenko A. S. Izuchenie solevogo sostava gazovozhidkikh vklyuchenii v mineralakh metodom kriometrii [Study of the salt composition of gas-liquid inclusions in minerals by the cryometry method], *Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]*, 1977, No 8, pp. 16–27. (In Russ.)
4. Volkov A. V., Savva N. E., Sidorov A. A., Prokof'ev V. Yu., Goryachev N. A., Voznesenskii S. D., Al'shevskii A. V., Chernova A. D. Zolotorudnoe mestorozhdenie Shkol'noe (Severo-Vostok Rossii) [The Shkolnoye gold deposit (North-East of Russia)], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii [Geology of ore deposits]*, 2011, V. 53, № 1, pp. 3–31. (In Russ.)
5. Volkov A. V., Sidorov A. A. Prognozno-poiskovaya model' mestorozhdenii zolota, svyazannykh s intruzivami granitoidov Arkticheskoi zony Rossii [Forecast and exploration model for gold deposits associated with granitoid intrusions in the Arctic zone of Russia], *Arktika: ehkologiya i ehkonomika*



- [*Arctic: Ecology and Economics*], 2018, No 3 (31), pp. 84–99. (In Russ.)
6. Volkov A. V., Cherepanova N. V., Prokof'ev V. Yu., Savva N. E., Smil'gin S. V., Trubkin N. V., Alekseev V. Yu. Mestorozhdenie zolota v granitoidnom shtoke Butarnyi (Severo-Vostok Rossii) [Gold deposit in the Butarny granitoid stock (North-East Russia)], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [*Geology of ore deposits*], 2013, V. 55, № 3, pp. 214–237. (In Russ.)
 7. Dolgov Yu. A., Ermakov N. P. Termobarogeokhimiya [Thermobarogeochemistry], Moscow, Nedra Publ., 1979, 271 p.
 8. Merkulova T. V., Mishin L. F. Okislitel'no-vostranovitel'nye protsessy v mezozoisko-kainozoiskikh vulkano-plutonicheskikh sistemakh i ikh rol' v formirovaniy regional'nykh gravitatsionnykh i magnitnykh anomalii Dal'nego Vostoka [Redox processes in Mesozoic-Cenozoic volcano-plutonic systems and their role in the formation of regional gravitational and magnetic anomalies of the Far East], *Tikhookeanskaya geologiya* [*Pacific Geology*], 2015, V. 34, № 6, pp. 112–124. (In Russ.)
 9. Pisarev P. A., Kupriyanova T. N., Kozlov D. S., Vlasov E. A., Kolova E. E. Osobennosti veshchestvennogo sostava rud i formatsionnaya prinadlezhnost' zolotorudnogo mestorozhdeniya Chul'batkan [Features of the material composition of ores and formational affiliation of the Chulbatkan gold deposit], *Sbornik tezisev dokladov XIV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Geologiya, prognoz, poiski i otsenka mestorozhdenii almazov, blagorodnykh i tsvetnykh metallov»* [*Collection of abstracts of reports of the XIV International scientific and practical conference "Geology, forecast, prospecting and evaluation of deposits of diamonds, noble and non-ferrous metals"*], Moscow, TsNIGRI Publ., 2025, pp. 328–331. (In Russ.)
 10. Roedder E. Flyuidnye vklyucheniya v mineralakh. V 2-kh t. T. 1: Priroda vklyucheniya i metody ikh issledovaniya / Perevod s angliiskogo [Fluid inclusions in minerals. In 2 volumes. Volume 1: The nature of inclusions and methods of their study / Translated from English], Moscow, Mir Publ., 1987, V. 1, 560 p.
 11. Roedder E. Flyuidnye vklyucheniya v mineralakh. V 2-kh t. T. 2: Ispol'zovanie vklyucheniya pri izuchenii genezisa porod i rud / Perevod s angliiskogo [Fluid inclusions in minerals. In 2 volumes. Volume 2: Using inclusions in the study of the genesis of rocks and ores / Translated from English], Moscow, Mir Publ., 1987, V. 2, 632 p.
 12. Fomina M. I., Mikhailitsyna T. I. Kharakternye mineralogicheskie cherty Au-kvartsevoogo mestorozhdeniya Chul'batkan (Khabarovskii krai) [Characteristic mineralogical features of the Chulbatkan Au-quartz deposit (Khabarovsk Krai)], *Sbornik tezisev dokladov XIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauchno-metodicheskie osnovy prognoza, poiskov, otsenki mestorozhdenii almazov, blagorodnykh i tsvetnykh metallov»* [*Collection of abstracts of reports of the XIII International scientific and practical conference "Scientific and methodological foundations for forecasting, prospecting, and evaluation of deposits of diamonds, precious and non-ferrous metals"*], Moscow, TsNIGRI Publ., 2024, pp. 383–386. (In Russ.)
 13. Sharueva L. I., Lopatin B. G. Gosudarstvennaya karta Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1 : 1 000 000. Tret'e pokolenie. Seriya Dal'nevostochnaya. List N-54 (Nikolaevsk-na-Amure) [State Map of the Russian Federation, Scale 1 : 1 000 000. Third Generation. Far Eastern Series. Sheet N-54 (Nikolaevsk-on-Amur)], St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2016.
 14. Bodnar R. J. and Vityk M. O. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions, In Fluid inclusions in minerals: methods and applications, IMA short course volume, Virginia Polytechnic Institute and State University Press, 1994, pp. 117–130.
 15. Brown P. E. FLINCOR: a microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data, *American Mineralogist*, 1989, V. 74, pp. 1390–1393.
 16. Hart C. J. R. Reduced intrusion-related gold systems, In Mineral deposits of Canada: a synthesis of major deposit types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods, Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, 2007, No 5, pp. 95–112.
 17. Ishihara S. The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks, *Mining Geology*, 1977, No 27, pp. 293–305.



18. Logan J. M. Prospective areas for intrusion-related gold-quartz veins in Southern British Columbia, *Geological Fieldwork 2000*, Paper 2001–1. pp. 113–134.
19. Thompson J. F. H., Sillitoe R. H., Baker T., Lang J. R., Mortensen J. K. Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces, *Mineral Deposita*, 1999, V. 34, pp. 323–334.
20. Van den Kerkhof A. M., Hein U. F. Fluid inclusion petrography, *Lithos*, 2001, V. 55 (1). pp. 27–47.
21. Zhang Y. G. and Frantz J. D. Determination of the homogenisation temperatures and densities of superficial fluids in the system NaCl-KCl-CaCl₂-H₂O using synthetic fluids inclusions, *Chemical Geology*, 1987, V. 64, pp. 335–345.

Писарев Пётр Анатольевич (pisarev.peter@gmail.com)
начальник отдела геологоразведочных работ ¹

Куприянова Таисия Николаевна
ресурсный геолог ¹

Козлов Дмитрий Сергеевич
старший геолог ¹

Власов Евгений Алексеевич
кандидат геолого-минералогических наук, доцент ²

Колова Елена Евгеньевна
кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник ³

¹ ООО «Удинск Золото» (ПАО «Полюс»), г. Хабаровск, Россия;

² Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия;

³ ФГБУН Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило ДВО РАН, г. Магадан, Россия

Piotr Anatolievich Pisarev
Head of Geological Exploration Department ¹

Taisiya Nikolaevna Kupriyanova
Resource Geologist ¹

Dmitry Sergeevich Kozlov
Senior Geologist ¹

Evgeniy Alekseevich Vlasov
Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor ²

Elena Evgenevna Kolova
Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher ³

¹ LLC «Udinsk Zoloto» (PJSC Polyus), Khabarovsk, Russia;

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;

³ N. A. Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute (NEISRI), FEB RAS, Magadan, Russia

Микровключения и элементы-примеси в деревянистом олове месторождения Хета, Магаданская область

Петроченков Д. А.¹, Фомина М. И.², Чижова И. А.³

¹ МГРИ, г. Москва, Россия; ² ЦНИГРИ, г. Москва, Россия; ³ ИГЕМ РАН, г. Москва, Россия

Аннотация. Изучены микровключения и элементы-примеси в деревянистом олове месторождения Хета Магаданской области. Месторождение расположено в Хетинской вулкано-тектонической депрессии на пересечении крупных зон региональных глубинных разломов и относится к олово-сульфидному промышленному типу железисто-полиметалльно-оловянной формации. Электронно-микроскопическими исследованиями (РЭМ) в деревянистом олове установлены, предположительно, микровключения рутила, ильменита, кварца, алюмосиликатов, вольфрамита. Методом ЛА-ИСП-МС в деревянистом олове установлено 25 элементов-примесей с содержанием выше 1 мг/кг. Большинство элементов фиксируются в отдельных измерениях с содержанием меньше 10 мг/кг. В интервале 10–100 мг/кг установлены средние содержания К, Sc, Mn, Cu, Zn, Ga, Zr, Pb, Bi; в интервале 100–1000 мг/кг – Ti, Y, Sb; > 1000 мг/кг – Al, Fe, W. Математическими методами выявлены особенности распределения содержаний, корреляционные связи элементов-примесей; сделаны предположения о вхождении их в структуру касситерита и возможных микровключениях.

Ключевые слова: месторождения олова, деревянистое олово, касситерит, элементы-примеси, микровключения, Магаданская область.

Для цитирования: Петроченков Д. А., Фомина М. И., Чижова И. А. Микровключения и элементы-примеси в деревянистом олове месторождения Хета, Магаданская область. Руды и металлы. 2026. № 1. С. 71–85. DOI: 10.47765/0869-5997-2026-10005.

Microinclusions and impurity elements in woody tin from the Kheta deposit, Magadan Oblast

Petrochenkov D. A.¹, Fomina M. I.², Chizhova I. A.³

¹ Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia;

² Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow, Russia;

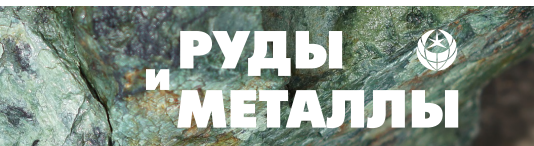
³ Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Annotation. Microinclusions and impurity elements were studied in woody tin from the Kheta deposit in the Magadan Region. The ore deposit is situated within the Kheta volcanic-tectonic depression at an intersection of large zones of regional deep-seated faults and belongs to the tin-sulfide industrial type of the ferruginous-polymetallic-tin ore formation. Electron microscopic studies (SEM) of the woody tin revealed microinclusions of rutile, ilmenite, quartz, aluminosilicates, and wolframite. By the LA-ICP-MS technique, 25 impurity elements with the contents above 1 mg/kg were found in the woody tin. Most of the elements were recorded in rare measurements with the contents less than 10 mg/kg. In the range of 10–100 mg/kg, the average concentrations of K, Sc, Mn, Cu, Zn, Ga, Zr, Pb, and Bi were established; in the range of 100–1000 mg/kg, the Ti, Y, and Sb concentrations; and above 1000 mg/kg, the Al, Fe, and W ones. The concentration distribution features and correlations of the impurity elements were determined mathematically. Assumptions are made on the entry of these impurities into the cassiterite structure and on possible mineral microinclusions.

Keywords: tin deposits, woody tin, cassiterite, impurity elements, microinclusions, Magadan Region.

For citation: Petrochenkov D. A., Fomina M. I., Chizhova I. A. Microinclusions and impurity elements in woody tin from the Kheta deposit, Magadan Oblast. Rudy i metally (Ores and metals). 2026. No. 1. pp. 71–85. DOI: 10.47765/0869-5997-2026-10005.





Общие сведения

К деревянистому олову относятся кристаллические, скрытокристаллические радиально-лучистые, почковидные агрегаты касситерита. Месторождения с деревянистым оловом связаны с риолитовым типом редкометалльно-вольфрам-оловянной формации, силикатным и сульфидным типами железисто-полиметалльно-оловянной формации. Деревянистое олово достаточно широко представлено на месторождениях этих типов, а на ряде из них является основным источником олова. Ранее было изучено деревянистое олово месторождений Джалиндинское (Хабаровский край), Тыноокен (Чукотский АО), Доминион-Крик (Канада), относящихся к риолитовому типу [10]. На месторождении Хета также установлено значительное количество деревянистого олова. Месторождения образованы в жерловых фациях вулканов при низком давлении, высоких температурах рудных флюидов, насыщенных газами.

Месторождение Хета открыто Т. А. Боровским в 1939 г. (рис. 1, а). Оно расположено в Хетинской вулcano-тектонической депрессии, выполненной преимущественно кислыми вулканитами, прорванными крупными телами субвулканических гранитоидов верхнемелового возраста, на пересечении крупных зон региональных глубинных разломов СВ и СЗ направлений. Породы интенсивно каолинизированы, гидрослюдизированы, серицитизированы, метасоматически окварцованы и участками хлоритизированы. Хетинское месторождение представляет собой трубообразные залежи типа вулканических некков, сложенных взрывными брекчиями. Горизонтальное сечение месторождения 60×120 м, по вертикали оно прослежено на 150–200 м. Выделяются руды вкрапленные, прожилково-вкрапленные, прожилково-жилвные, в виде коротких жилок и бананцы – касситеритовые столбы до 36×12 м с содержанием олова до 60 %, добывавшиеся штучами. Богатое оруднение приурочено к верхним горизонтам и с глубиной затухает [3].

Руды сложены несколькими минеральными ассоциациями, сформированными в три стадии: кварц-касситеритовую с хлоритом, суль-

фидную и карбонатно-флюоритовую. Минеральный состав руд следующий: главные – хлорит, кварц, пирит, сфалерит, станнин, касситерит, халькопирит, пирротин, карбонаты; второстепенные – галенит, арсенипирит, вольфрамит, серицит, марказит, шамозит, флюорит; редкие – фаматинит, самородные висмут и серебро, пираргирит, аргентит, полибазит, алуниит. На горизонте 874 м (в расщелке 46) отмечено необычное скопление самородной меди. Основная масса олова связана с касситеритом, в том числе и в виде деревянистого олова (рис. 2). С глубиной увеличивается количество станнина. Предполагается, что значительная часть касситерита образовалась в результате гидротермального разложения станнина. Месторождение относится к олово-сульфидному промышленному типу железисто-полиметалльно-оловянной формации. Аналогом ему может быть месторождение Ллаллагуа в Боливии [3, 8, 10].

Месторождение Хета отрабатывалось до 1953 г., в настоящее время законсервировано. Содержание Sn в добытых рудах составляло 0,82 %. В качестве попутных компонентов в рудах присутствуют: Zn 0,1–0,7 %; Cu 0,1–10 %; Pb 0,1–3,4 %; Bi до 0,5 %; Ag 33–134 г/т; In, Cd – 0,02–0,17 %; единичные пробы содержат W до 0,26 % и Au 0,2–1,4 г/т. С кислыми вулканитами месторождения Хета связаны сферолитовые образования халцедонов и агатов, которые используются в качестве декоративных образцов и ювелирно-поделочного материала (рис. 3).

На базе месторождения Хета и рудопроявлений Ирэганджа, Обзорное, Разведочное сформировались россыпи р. Правая Хета, протянувшейся с перерывами на 9 км, и её притоков – руч. Правого, Эташа, Белокаменного, Развилочного. Россыпи отработаны до 1952 г. (рис. 1, б–д), из них добыто 522 т олова. При отработке россыпей встречались самородки серебра до 30 г и висмута до 1560 г.

Несмотря на то, что на месторождении Хета деревянистое олово составляет существенный процент оловянных руд, а в россыпях является определяющим, оно остаётся практически не изученным. С помощью проведённых авторами исследований были определены ми-

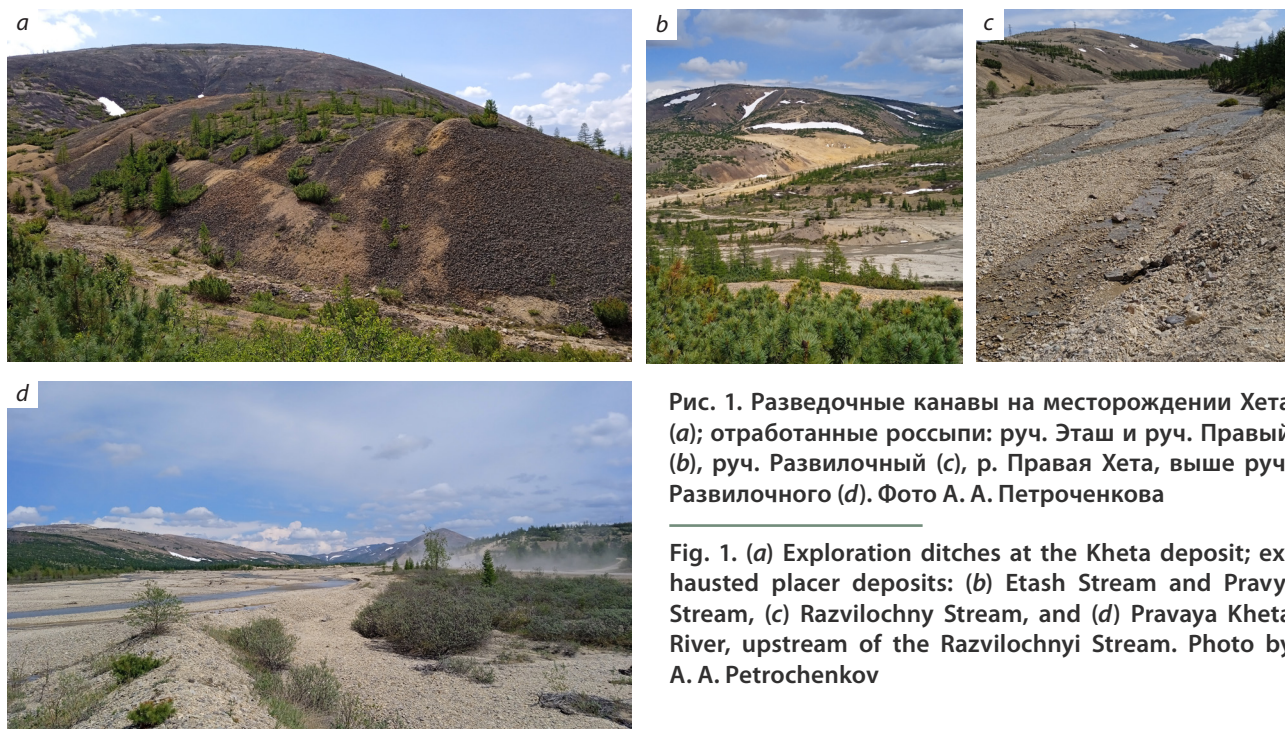


Рис. 1. Разведочные канавы на месторождении Хета (а); отработанные россыпи: руч. Эташ и руч. Правый (b), руч. Развилочный (c), р. Правая Хета, выше руч. Развилочного (d). Фото А. А. Петроченкова

Fig. 1. (a) Exploration ditches at the Kheta deposit; exhausted placer deposits: (b) Etash Stream and Pravyy Stream, (c) Razvilochny Stream, and (d) Pravaya Kheta River, upstream of the Razvilochny Stream. Photo by A. A. Petrochenkov

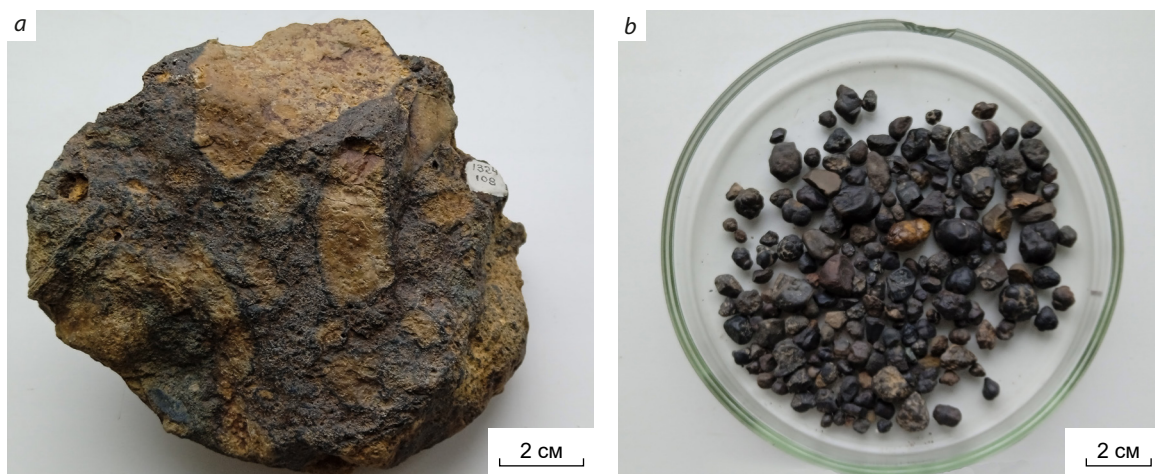


Рис. 2. Кварцевая брекчия с касситеритовым цементом (а), деревянистое олово (b). Месторождение Хета. Геологический музей Магаданского филиала ФГУ ТФГИ по ДВФО. Фото А. А. Петроченкова

Fig. 2. (a) Quartz breccia with cassiterite cement, (b) woody tin. Kheta deposit. Geological Museum of the Magadan Branch of the FSU TFGI in the Far Eastern Federal District. Photo by A. A. Petrochenkov

неральные микровключения, элементы-примеси в деревянистом олове месторождения, его структурные особенности. Полученные данные способствуют установлению типоморфных признаков, условий образования деревянистого олова оловорудных месторождений.

Методы исследования

Изучены девять небольших (8–10 мм) образцов деревянистого олова, найденные в россыпи р. Правая Хета. Комплекс исследований, проведённый в лабораториях МГРИ, ВИМС, ИРЕА НИЦ «Курчатовский институт»,

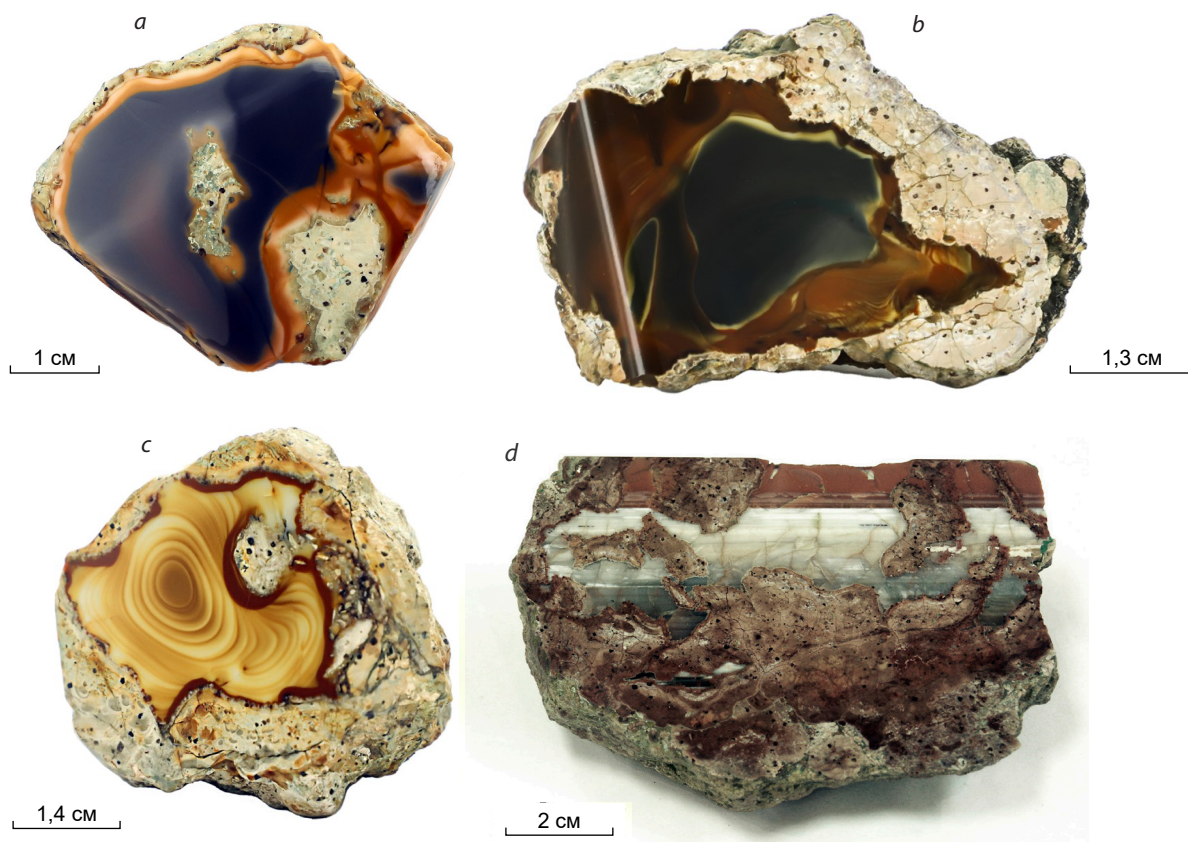


Рис. 3. Агаты, халцедоны (а–d). Месторождение Хета, Магаданский областной краеведческий музей

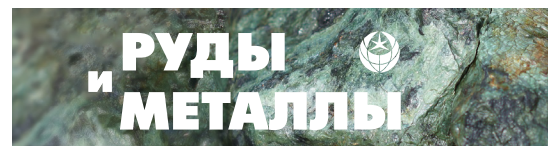
Fig. 3. (a–d) Agates, chalcedony. The Kheta deposit. Magadan Regional Local Natural and Historical Museum

включал определение микротвёрдости, плотности, люминесценции (по 6 определений), оптико-минераграфический анализ (2 прозрачных шлифа), количественное определение элементов-примесей в касситерите (15 измерений), электронно-микроскопические исследования (2 образца).

Оптико-минераграфический анализ выполнен с использованием микроскопа Leica DMRX. Микротвёрдость определялась на микротвердомере ПМТ-3 с нагрузкой массой 200 г и экспозицией 15 секунд с использованием методики С. И. Лебедевой (1977 г.). Плотность образцов установлена гидростатическим методом на электронных весах Sartorius Gem G-150D. Люминесценция изучалась под ультрафиолетовой лампой Multispec System Eickhorst с длиной волны 254 и 365 нм. Исследование микровключений в касситерите проведено на

растровом электронном микроскопе SM-32 с вольфрамовым катодом (Китай), детектор ЭДС Ultim Max 65, диаметр зонда 3–5 мкм. Программное обеспечение Aztec ЭДС компании Oxford Instruments Nano Analysis (Великобритания). Анализ образцов проведён в обратно-рассеянных электронах (ОРЭ), вторичных электронах, в характеристическом рентгеновском излучении, химический состав получен по данным рентгеноспектрального микроанализа (РСМА), содержание кислорода рассчитывалось по стехиометрии (аналитик Н. Н. Кривощёков).

Определение содержания элементов-примесей осуществлялось методом масс-спектрометрии с приставкой лазерной абляции (ЛА-ИСП-МС). Измерения проводились на приборах: квадрупольный масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой ELAN DCR-e



(Perkin Elmer, США). Для лазерного проботбора применялась приставка NWR 213 (New Wave Research). Диаметр пятна лазерного луча составил 80 мкм. В каждой намеченной точке наблюдения (~ 500 мкм) проводилось три измерения. Градуировку проводили по твёрдому стандартному образцу NIST SRM 610.

Чувствительность метода на элементы-примеси в касситерите, мг/кг: Si, Ca – 1000; S, Cl – 500; P – 60; Na – 50; Be, Se – 20; B, Al, Fe – 10; K, Sc, Ti, V, Cr, Ge, As – 5; Li, Mg, Mn – 2; Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Sb, Cs – 1; Ba, Hf, Ta, W, Pb, Bi, Th, U – 0,1. По большинству примесных компонентов среднеквадратичное отклонение определяемых концентраций находится в пределах 2–6 % в зависимости от элемента. Ошибка анализа для большинства элементов составляет до 10 % и зависит от содержания. Содержания Co, Ni, In и редкоземельных элементов измерить с удовлетворительным пределом обнаружения невозможно. Из-за наличия микровключений касситерит неоднороден, поэтому внутри некоторых определений отмечается изменение содержаний ряда элементов на величину одного-двух порядков.

Значения содержаний элементов-примесей в кристаллах касситерита обработаны математическими методами, используемыми в геологии [6, 11]. Были определены следующие математические показатели, характеризующие геохимическую выборку: среднее – $C_{\text{ср.}}$, минимальное – $C_{\text{мин.}}$, максимальное – $C_{\text{мак.}}$, содержания элемента; среднеквадратичное отклонение – СКО; коэффициент вариации – КВ; коэффициент асимметрии, отнесённый к его ошибке, – А/ош; коэффициент эксцесса, отнесённый к его ошибке, – Э/ош; установлено соответствие распределения значений содержаний нормальному закону – Норм. $C_{\text{ср.}}$, $C_{\text{мин.}}$, $C_{\text{мак.}}$, СКО – измерялись в мг/кг, КВ – в %, А/ош и Э/ош – безразмерные показатели. Параметр Норм принимал два значения: соответствует нормальному закону (да) и не соответствует (нет).

Значения $C_{\text{ср.}}$ условно разделены, мг/кг: очень низкие – n , низкие – $n0$, невысокие – $n00$, высокие – $n000$, очень высокие – $n0000$. Еди-

ничные значения содержаний, превышающие $3 \cdot \text{СКО}$, отнесены к «ураганным», но из математической обработки они не исключались. «Ураганные» значения указывают на минеральные микровключения. В соответствии со значениями КВ выборка разделяется: КВ < 100 % – однородная; 101–200 % – неоднородная; > 201 % – очень неоднородная.

Значения А/ош и Э/ош характеризуют степень отклонения распределения содержаний элементов выборки от нормального закона. При значениях < 3 (критическое значение согласно критерию нормальности по асимметрии и эксцессу [11]) выборка подчиняется нормальному закону распределения, при значениях ≥ 3 – не подчиняется. При положительном значении А/ош в выборке преобладают содержания ниже среднего; при отрицательном – выше среднего. При положительном значении А/ош содержания выше среднего отличаются от него более значительно, чем содержания ниже среднего; при отрицательном значении А/ош большее отличие характерно для содержаний ниже среднего. При положительном значении Э/ош содержания концентрируются около среднего; при отрицательном значении Э/ош распределение значений более равномерное. Чем выше значения А/ош, Э/ош, тем больше отклоняется распределение выборки от нормального закона. Установлены корреляционные связи элементов (парная корреляция) положительные и отрицательные при значениях выше критического или равных ему. При значениях 0,7 и выше корреляционные связи считались сильными, при значениях ниже 0,7 – слабыми.

С учётом значений содержаний элементов-примесей, однородности распределения их в пределах кристалла, близости строения атомов с атомом Sn сделаны предположения о форме нахождения элемента в касситерите (вхождение в структуру или в состав микровключений). Также сделаны предположения о минеральном составе микровключений, исходя из значений содержаний, корреляционных связей элементов, минерального состава руд и данных ранее опубликованных работ по этой тематике.

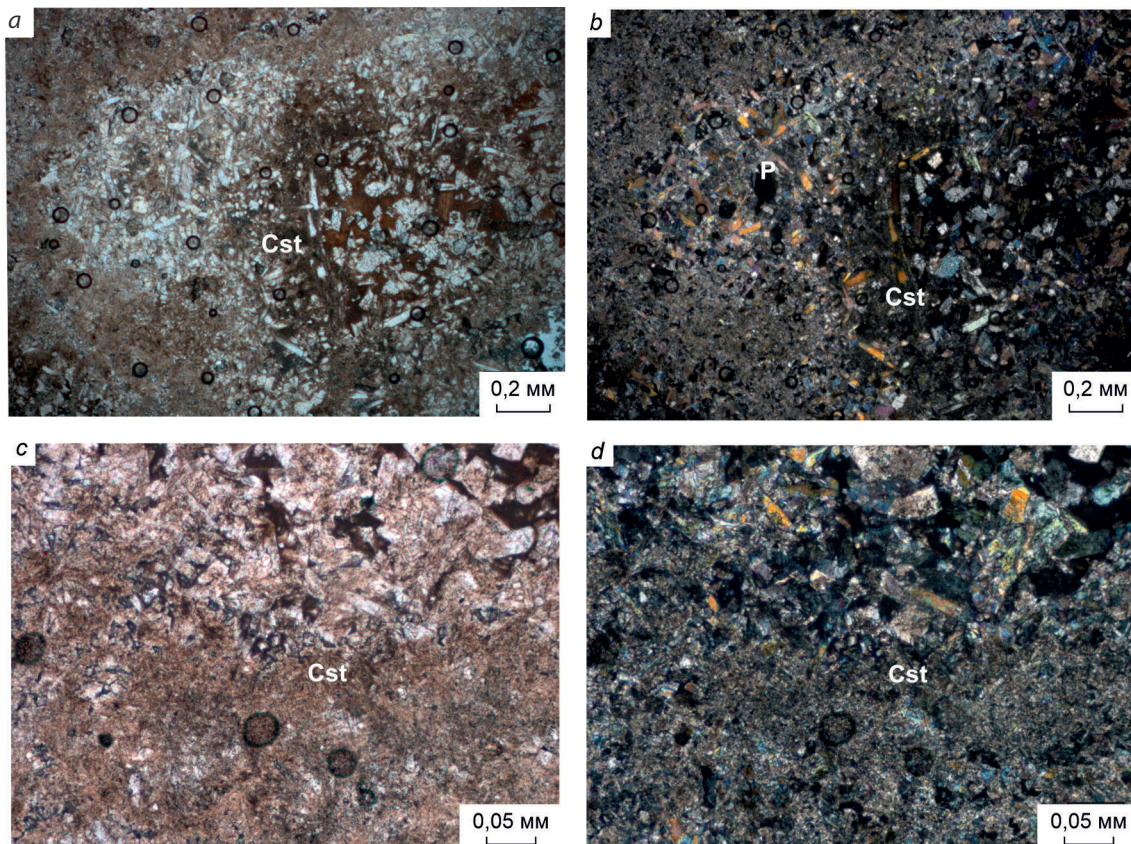


Рис. 4. Прозрачные шлифы фрагментов деревянистого олова месторождения Хета в центральной (*a, b*) и краевой (*c, d*) зонах:

николи || – *a, c*; николи X – *b, d*. Cst – касситерит, P – поры

Fig. 4. Transparent thin sections of woody tin fragments from the Kheta deposit in the central (*a, b*) and marginal (*c, d*) zones:

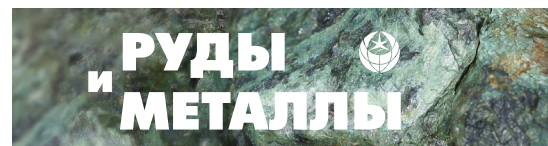
a, c – Nicols ||; *b, d* – Nicols X. Cst – cassiterite, P – pores

Результаты исследований

Деревянистое олово – плотное, непрозрачное, раскалывается с трудом, имеет раковистый излом. Цвет – чёрный, тёмно-серый, с небольшими зонами светло-серого цвета, иногда присутствует коричневая вкрапленность. Сферолитовая текстура, характерная для деревянистого олова, в большинстве образцов проявлена слабо, что, возможно, связано с их небольшими размерами. Встречаются образцы, образованные мелкими почками, в которых наблюдается чередование концентрических тонких слоёв серого, тёмно-серого и коричневого цвета. Плотность деревянистого олова от 6,26 до 6,80 г/см³, что ниже, чем для кристаллов (от 6,7 до 7,1 г/см³). Более низкая плотность связана

с большим числом пор. Блеск естественной поверхности деревянистого олова стеклянный, матовый, обусловленный неровностью и шероховатостью, блеск хорошо полированной поверхности – алмазный. Люминесценция не наблюдается. Микротвёрдость различных образцов и зон существенно различается и колеблется от 1050 до 1450 кг/мм², в среднем составляя 1120 кг/мм².

В прозрачных шлифах (рис. 4) деревянистое олово при параллельных николях серого, тёмно-серого цвета; слабо проявлена радиально-концентрическая структура; центральная и краевые части имеют близкий размер и форму кристаллов. Распределение окраски пятнистое. Кристаллы касситерита плотно срос-



шиеся, разноориентированные, изометрической, удлинённо-призматической, копьевидной формы. Их размеры от 0,005 до 0,2 мм. Кристаллы изометрической формы наиболее мелкие. Присутствуют полисинтетические двойники, размер которых возрастает до 0,4 мм. Между более крупными кристаллами часто расположены агрегаты мелких. Форма кристаллов может быть обусловлена их различной ориентировкой к плоскости шлифа. В одних случаях наблюдаются поперечные срезы, в других – косые и продольные.

Можно выделить фрагменты с различной морфологической разновидностью касситерита: мелкокристаллические, тонкокристаллические, скрытокристаллические. Тёмноокрашенные зоны образованы тонкокристаллическим и скрытокристаллическим касситеритом. Минеральные включения в прозрачном шлифе деревянистого олова не установлены.

В деревянистом олове присутствуют трещинки, пустотки, мелкие поры. Трещинки шириной 0,01–0,1 мм занимают радиальное положение. Пустотки часто имеют вытянутую форму, размеры их 0,01–0,2 мм. Поры размером ~ 0,01 мм и менее распределены неравномерно. В результате обработки поверхности деревянистого олова происходит скалывание краёв трещин, пустоток и пор, что приводит к увеличению их размера.

Микровключения в деревянистом олове

В касситерите разными исследователями с помощью различных методов установлено около 60 минеральных микровключений, а в деревянистом олове менее 20 [1–5, 7, 9, 10, 12, 13]. Существенно меньшее число установленных минеральных включений в деревянистом олове связано, в первую очередь, с его меньшей изученностью.

В одном из образцов деревянистого олова месторождения Хета (рис. 5, а) присутствуют многочисленные минерализованные микропоры размером до 100 мкм преимущественно изометрической формы. В касситерите (3 спектра) элементы-примеси не фиксируются. В двух микровключениях размером ~ 100

и 50 мкм изометрической формы с чёткими контурами определены содержания, мас. %: О – 32,75 и 41,58 соответственно; Al – 0,45 и 0,59; Si – 0,55 и 0,65; Ti – 13,52 и 4,39; Sn – 52,72 и 52,79. Содержания элементов могут соответствовать микровключениям алюмосиликата и рутила (TiO_2). Ещё в одном микровключении размером 30 × 120 мкм удлинённой призматической формы с чёткими контурами выявлены содержания, мас. %: О – 18,81; Al – 0,34; Si – 0,41; Ti – 3,59; Fe – 3,22; Sn – 73,63, что указывает на ильменит (FeTiO_2) и алюмосиликат. В микровключении размером 30 × 100 мкм удлинённой конусообразной формы с чёткими контурами, чёрного цвета в ОРЭ определены содержания, мас. %: О – 52,07; Al – 21,30; Si – 25,07; K – 1,56, что может указывать на алюмосиликат (серицит).

Во втором образце (рис. 5, б) присутствует большое число минерализованных микропор различных размеров и форм. В микровключении размером 100 × 300 мкм призматической формы с чётко выраженным контуром, чёрного цвета в ОРЭ фиксируются содержания (два спектра), мас. %: О – 63,50, 59,93; Al – 11,58, 5,37; Si – 9,55, 4,80; Sn – 15,37, 29,89, что позволяет предположить алюмосиликат. В других мелких (до 50 мкм) микровключениях встречены содержания (три спектра), мас. %: О – 33,72, 26,37, 32,46; Al – 0,62, 0,48, 0,93; Si – 1,04, 0,65, 1,37; Ti – 12,55, 8,78, 9,52; Sn – 52,06, 63,72, 55,71. По содержаниям элементов можно предположить, что это микровключения алюмосиликатов, рутила. В микровключении размером 50 × 100 мкм призматической формы установлены содержания, мас. %: О – 36,54; Al – 1,12; Si – 1,18; Ti – 5,28; Fe – 9,25; Sn – 46,63. Можно предположить, что это микровключения ильменита, алюмосиликата. Высокие содержания Fe, превышающие содержания Ti почти в два раза, могут свидетельствовать о присутствии железосодержащего минерала. Как показали исследования [1, 2, 4, 5], лишь небольшая часть железа (< 0,5 мас. %) в виде Fe^{3+} входит в касситерит изоморфно и в виде нерегулярных гематитовых структурных встроек. Характерны магнетит ($\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_4$), гематит (Fe_2O_3),

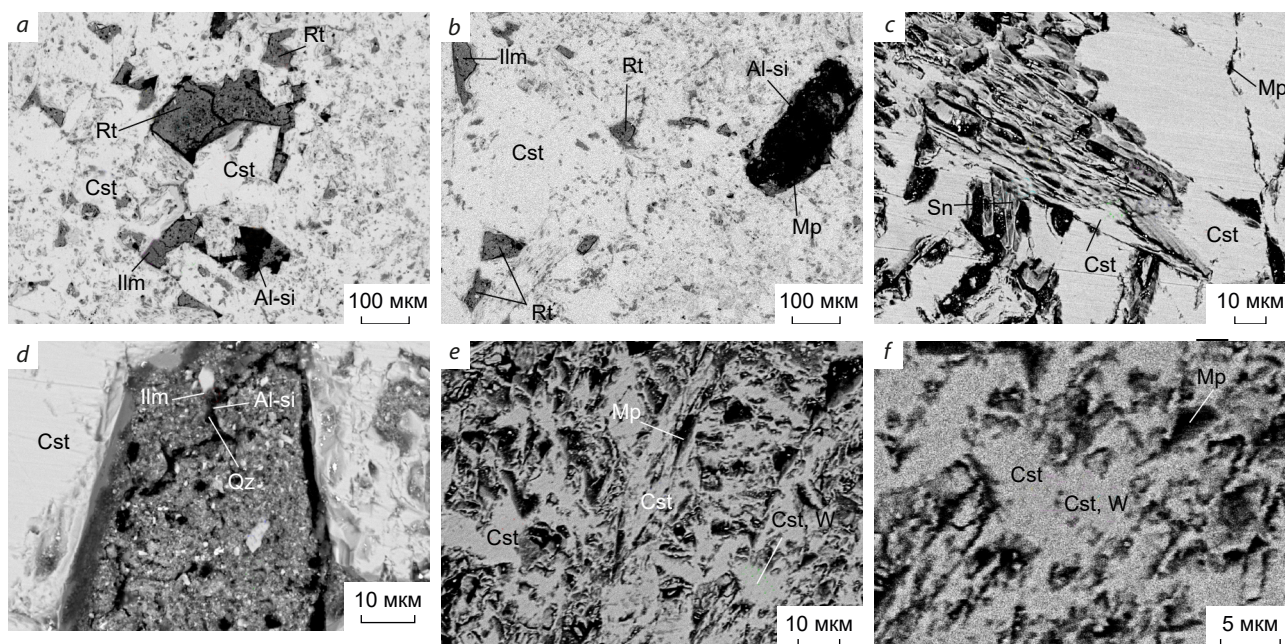


Рис. 5. Образцы деревянистого олова месторождения Хета в ОРЭ с микровключениями рутила (Rt), ильменита (Ilm), алюмосиликата (Al-si), кварца (Qz), самородного олова (Sn), вольфрамита (W). РЭМ. Cst – касситерит, Mp – микропоры

Fig. 5. Specimens of woody tin from the Kheta deposit with microinclusions of rutile (Rt), ilmenite (Ilm), aluminosilicate (Al-si), quartz (Qz), native tin (Sn), and wolframite (W). BSE image, REM. Cst – cassiterite, Mp – micropores

гётит ($\text{FeO} \cdot \text{OH}$), станнаты (FeSnO_3 , FeSn_2O_4), гидростаннаты ($\text{FeSn}(\text{OH})_6$). Преобладают более поздние эпигенетические микровключения, отлагающиеся в микротрещинах кристаллов.

Третий образец деревянистого олова (рис. 5, c) насыщен микропорами, ориентированными в двух направлениях, также присутствуют микротрещины. Для микропор характерны овальная удлиненная форма, размер до 25 мкм. В касситерите элементы-примеси не фиксируются. В одном микровключении размером ~ 3 мкм определены содержания, мас. %: O – 5,75; Al – 0,11; Si – 0,19; Fe – 0,77; Sn – 93,17. Очень высокое содержание Sn может указывать на присутствие самородного олова, Al и Si – на алюмосиликат, Fe – на минералы железа. В настоящее время самородное олово как минеральный вид установлено в россыпях золота, в гранитах и кварцевых жилах [2], встречается крайне редко, и его присутствие

в деревянистом олове требует дальнейшего детального изучения.

В четвертом образце (рис. 5, d) присутствует минерализованная микропора, в которой установлены микровключения. В одном микровключении размером ~ 3 мкм, светло-серого цвета в ОРЭ, удлиненно-призматической формы с четкими контурами фиксируются содержания, мас. %: O – 6,74; Si – 0,21; Ti – 1,98; Fe – 2,03; Sn – 88,94. Исходя из содержаний элементов можно предположить, что это микровключения ильменита, кварца. В другом микровключении выявлены содержания, мас. %: O – 20,04; Si – 0,26; Sn – 79,59, что указывает на присутствие в касситерите кварца. В третьем микровключении обнаружены содержания, мас. %: O – 34,30; Al – 0,50; Si – 0,56; Ti – 5,27; Sn – 59,35, что может свидетельствовать о микровключениях алюмосиликата и рутила.

В пятом образце (рис. 5, e, f) выявлено большое число микропор, часть из которых ми-

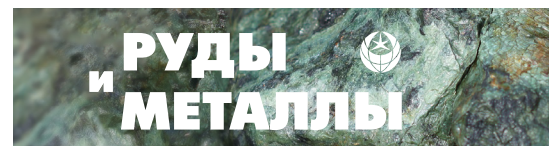


Таблица 1. Характеристики распределения содержаний элементов-примесей в деревянистом олове месторождения Хета

Table 1. Characteristics of distribution of the impurity elements contents in woody tin from the Kheta deposit

Элемент	Характеристики							
	С _{ср.}	С _{мин.}	С _{мак.}	СКО	КВ	А/ош	Э/ош	Норм
Al	1127	479	1950	445	40	0,3	-0,9	да
K	16	0	96	24	153	3,7	4,0	нет
Sc	18	0	50	17	90	1,6	-0,5	да
Ti	391	39	1570	522	133	1,8	-0,3	да
Mn	97	0	294	112	116	1,1	-1,1	да
Fe	5267	1450	9840	3013	57	0,4	-1,3	да
Cu	24	0	208	54	224	4,0	4,5	нет
Zn	29	5	179	48	167	3,4	3,0	нет
Ga	12	8	16	3	24	0,0	-1,5	да
Zr	10	0	42	13	134	1,9	0,0	да
Sb	521	40	1490	594	114	0,9	-1,3	да
W	1757	688	3610	850	48	1,4	-0,3	да
Pb	24	3	106	26	108	3,1	2,9	нет
Bi	14	0	151	39	271	4,5	5,6	нет

Примечание. Число измерений – 15.

нерализована. В одной из них установлены, мас. %: O – 25,04; Sn – 72,80; W – 1,86. При детализации фрагмента (рис. 5, f) содержания элементов составили (три спектра), мас. %: O – 25,64, 24,88, 25,68; Sn – 72,87, 72,97, 74,17; W – 1,49, 2,16, 0,14. Повышенные содержания W позволяют предположить присутствие минералов вольфрама, из которых вероятен вольфрамит (Fe, MnWO₄). Вольфрамит присутствует в рудах месторождения и часто встречается в кристаллах касситерита в виде микровключений.

Таким образом, в деревянистом олове месторождения Хета по данным РСМА встречено восемь элементов: O, Al, Si, K, Ti, Fe, Sn, W. В касситерите элементы-примеси не фиксируются. Исходя из содержаний элементов можно предположить микровключения рутила, ильменита, алюмосиликата, минералов железа, вольфрамита, кварца. Минералы, предположительно представленные микровключениями в деревянистом олове, входят в состав руд, ассоциируя с касситеритом. Они могли образоваться в рудную стадию и в последующий этап в микротрещинах деревянистого олова благодаря циркуляции гидротермальных растворов.

Элементы-примеси в деревянистом олове

Изучены четыре аншлифа деревянистого олова размером 8–10 мм, в которых методом ЛА-ИСП-МС проведено 15 измерений в пяти точках наблюдения, расположенных в зонах серого и тёмно-серого цвета. В деревянистом олове установлено 25 элементов-примесей с содержанием выше 1 мг/кг. Содержания Sn находятся в диапазоне от 770 000 до 783 000 мг/кг. Элементы Mg, Si, V, As, Nb, Mo, Ag, Ba, Hf, U фиксируются в отдельных измерениях с содержаниями, близкими к порогу чувствительности метода. Высокое содержание иттрия (2150 мг/кг) установлено в одном измерении, содержание от 2 до 9 мг/кг – в четырёх. Одиннадцать перечисленных элементов преимущественно входят в состав единичных микровключений, а V, Nb, Hf, U – могут входить и в структуру касситерита [2]. Математическими методами, с учётом результатов изучения элементов-примесей в деревянистом олове других месторождений [10], были обработаны содержания Al, K, Sc, Ti, Mn, Fe, Cu, Zn, Ga, Zr, Sb, W, Pb, Bi.

Содержания алюминия высокие, в среднем 1127 мг/кг, находятся в диапазоне от 479

Таблица 2. Корреляционные связи элементов-примесей в древеснистом олове месторождения Хета

Table 2. Correlations of impurity elements in woody tin from the Kheta deposit

Элемент	Al	K	Sc	Ti	Mn	Fe	Cu	Zn	Ga	Zr	Sb	W	Pb	Bi
Al	1	0,56	-0,15	-0,26	0,19	-0,23	-0,47	-0,43	-0,05	-0,11	0,15	-0,27	-0,15	-0,45
K	0,56	1	0,06	0,05	-0,10	-0,34	-0,07	-0,14	-0,07	0,21	-0,15	-0,17	0,11	-0,12
Sc	-0,15	-0,06	1	0,80	-0,11	-0,11	-0,14	0,03	0,46	0,82	-0,15	0,19	-0,32	-0,23
Ti	-0,26	0,05	0,80	1	-0,48	-0,37	0,10	0,12	0,08	0,88	-0,51	-0,07	-0,37	-0,07
Mn	0,19	-0,10	-0,11	-0,48	1	0,82	-0,36	-0,23	0,74	-0,58	0,99	0,48	0,19	-0,30
Fe	-0,23	-0,34	-0,11	-0,37	0,82	1	-0,26	0,23	0,60	-0,54	0,86	0,40	0,16	-0,21
Cu	-0,47	-0,07	-0,14	0,10	-0,36	-0,26	1	0,23	-0,30	0,13	-0,36	0,41	0,76	0,97
Zn	-0,43	-0,14	0,03	0,12	-0,23	0,23	0,23	1	-0,18	0,05	-0,17	-0,06	0,13	0,18
Ga	-0,05	-0,07	0,46	0,08	0,74	0,60	-0,30	-0,18	1	-0,04	0,72	0,37	0,04	-0,33
Zr	-0,11	0,21	0,82	0,88	-0,58	-0,54	0,13	0,05	-0,04	1	-0,61	-0,02	-0,24	0,05
Sb	0,15	-0,15	-0,15	-0,51	0,99	0,86	-0,38	-0,17	0,72	-0,61	1	0,42	0,17	-0,32
W	-0,27	-0,17	0,19	-0,07	0,48	0,40	0,41	-0,06	0,37	-0,02	0,42	1	0,59	0,46
Pb	-0,15	0,11	-0,32	-0,37	0,19	0,16	0,76	0,13	0,04	-0,24	0,18	0,59	1	0,81
Bi	-0,45	-0,12	-0,23	-0,07	-0,30	-0,21	0,97	0,18	-0,33	0,05	-0,32	0,46	0,81	1

Примечание. Критическое значение коэффициента парной корреляции 0,51.

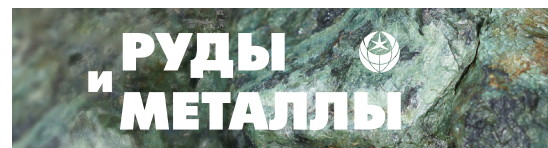
до 1950 мг/кг, распределение однородное (КВ – 40 %). Значения содержаний в пределах точек наблюдения могут отличаться в 1,1 раза или более существенно – в 2 раза. Значение А/ош (0,3) очень низкое положительное, Э/ош (-0,9) очень низкое отрицательное, распределение содержаний подчиняется нормальному закону (табл. 1). Число значений выше и ниже среднего совпадают, и они отличаются от него на близкую величину. Корреляционные связи Al положительные слабые с K (0,56) (табл. 2). Алюминий входит в состав микровключений (алюмосиликатов) и ассоциирует с K.

Содержания калия низкие, находятся в диапазоне от 0 до 96 мг/кг (среднее 16 мг/кг). Распределение содержаний неоднородное (КВ – 153 %). В пределах точек наблюдения значения содержаний также существенно различаются. В пяти измерениях калий не фиксируется. Можно выделить одно «ураганное» содержание – 96 мг/кг. Значения А/ош (3,7) и Э/ош (4,0) высокие положительные, распределение содержаний не подчиняется нормальному закону (табл. 1). Резко преобладают значения ниже среднего, значения выше среднего существенно от него отличаются в большую сторону. Корреляционные связи K слабые с Al (0,56) (табл. 2). Калий входит в состав

микровключений (алюмосиликаты), ассоциирует с Al.

Содержания скандия также низкие, в среднем 18 мг/кг, находятся в диапазоне от 0 до 50 мг/кг. Распределение содержаний однородное (КВ – 90 %). В пределах точек наблюдения значения могут быть близкими, отличаться в 1,1 раза или в 2 раза. В одном измерении содержание Sc не фиксировалось. Значение А/ош (1,6) низкое положительное, Э/ош (-0,5) очень низкое отрицательное, распределение содержаний подчиняется нормальному закону (табл. 1). Преобладают значения ниже среднего, и они отличаются от него незначительно, в отличие от содержаний выше среднего. Корреляционные связи Sc положительные сильные с Ti (0,80), Zr (0,82), слабые с Ga (0,46) (табл. 2). Скандий может входить в состав микровключений и в структуру касситерита, ассоциирует с Ti, Zr.

Содержания титана невысокие, в среднем 391 мг/кг, находятся в диапазоне от 39 до 1570 мг/кг, распределение неоднородное (КВ – 133 %). В пределах точек наблюдения значения содержаний также значительно различаются от 1,5 до 15,7 раза. Значение А/ош (1,8) низкое положительное, Э/ош (-0,3) очень низкое отрицательное, распределение содержа-



ний подчиняется нормальному закону (табл. 1). Преобладают значения ниже среднего, и они близки к нему по величине, в отличие от значений выше среднего. Корреляционные связи Ti положительные сильные с Sc (0,80), Zr (0,88), отрицательные слабые с Sb (-0,51) (табл. 2). Титан, вероятно, преимущественно входит в состав микровключений (рутил), частично в структуру касситерита, ассоциирует с Sc, Zr.

Содержания *марганца* низкие, в среднем 97 мг/кг, находятся в диапазоне от 0 до 294 мг/кг. Распределение содержаний неоднородное (КВ – 116 %). В пределах точек наблюдения значения содержаний различаются от 1,2 до 3,3 раза. В одном измерении содержание марганца не установлено. Значение А/ош (1,1) очень низкое положительное, Э/ош (-1,1) очень низкое отрицательное, распределение содержаний подчиняется нормальному закону (табл. 1). Преобладают значения ниже среднего, и они близки к нему по величине, в отличие от значений выше среднего. Корреляционные связи Mn положительные сильные с Fe (0,82), Ga (0,74), Sb (0,99), отрицательные слабые с Zr (-0,58) (табл. 2). Марганец входит в состав микровключений, ассоциирует с Fe, Ga, Sb.

Содержания *железа* высокие, в среднем 5267 мг/кг, находятся в диапазоне от 1450 до 9840 мг/кг. Распределение содержаний однородное (КВ – 57 %). В пределах точек наблюдения содержания отличаются максимум в 1,3 раза. А/ош (0,4) очень низкий положительный, Э/ош (-1,3) очень низкий отрицательный, распределение содержаний подчиняется нормальному закону (табл. 1). Незначительно преобладают значения ниже среднего, значения выше среднего отличаются на большую величину. Корреляционные связи Fe положительные сильные с Mn (0,82), Sb (0,86), слабые с Ga (0,60), отрицательные слабые с Zr (-0,54) (табл. 2). Железо входит в состав микровключений (минералы железа) и в структуру касситерита, ассоциирует с Mn, Ga, Sb.

Содержания *меди* низкие, находятся в диапазоне от 0 до 208 мг/кг (в среднем 24 мг/кг). Распределение содержаний очень неоднород-

ное (КВ – 224 %). В двух точках наблюдения содержания меди не фиксируются. В одной точке содержания достигают «ураганного» значения, которое отличается от среднего в 13 раз. Значения А/ош (4,0) и Э/ош (4,5) высокие положительные, распределение содержаний не подчиняется нормальному закону (табл. 1). Только три значения выше среднего, и они существенно от него отличаются. Корреляционные связи Cu положительные сильные с Pb (0,76), Bi (0,97) (табл. 2). Медь входит в состав микровключений (сульфиды, станнин), ассоциирует с Pb и Bi. Возможны микровключения самородной меди, станната меди.

Содержания *цинка* также низкие, в среднем 29 мг/кг и находятся в диапазоне от 5 до 179 мг/кг. Распределение содержаний неоднородное (КВ – 167 %). В пределах точек наблюдения содержания могут быть близкими и существенно различаться. Обнаруженное «ураганное» значение (179 мг/кг) отличается от соседнего измерения в 35,8 раза. Значения А/ош (3,4) и Э/ош (3,0) высокие положительные, распределение содержаний не подчиняется нормальному закону (табл. 1). Только три значения выше среднего, и они существенно от него отличаются. Корреляционные связи Zn с другими элементами не установлены (табл. 2). Цинк может входить в состав микровключений, возможно, в сфалерит.

Содержания *галлия* низкие, в среднем 12 мг/кг, находятся в диапазоне от 8 до 16 мг/кг. Распределение содержаний однородное (КВ – 24 %). Значения содержаний в пределах точек наблюдения близкие и отличаются менее чем в 1,4 раза. Значение А/ош (0,0) близко к нулю, Э/ош (-1,5) очень низкое отрицательное, распределение содержаний подчиняется нормальному закону (табл. 1). Значения выше и ниже среднего и их отличие от него близки. Корреляционные связи Ga положительные сильные с Mn (0,74), Sb (0,72), слабые с Fe (0,60) (табл. 2). Галлий, вероятно, входит в структуру касситерита и в состав микровключений, ассоциирует с Mn, Fe, Sb.

Содержания *циркония* низкие, в среднем 10 мг/кг и колеблются в диапазоне от 0 до

Таблица 3. Средние содержания элементов-примесей в деревянистом олове различных месторождений, мг/кг

Table 3. Average concentrations of impurity elements in woody tin from various deposits, mg/kg

Элемент	Среднее содержание элемента			
	Хета	Джалиндинское	Тыноокен	Доминион-Крик
Be	н/о	н/о	40	209
B	н/о	81	193	94
Na	н/о	422	155	104
Al	1127	96	2398	3834
Si	н/о	5157	4088	3852
K	16	318	336	303
Sc	18	н/о	н/о	н/о
Ti	391	204	18	7
Mn	97	39	318	131
Fe	5267	1803	21 488	24 591
Cu	24	47	н/о	н/о
Zn	29	10 843	3858	140
Ga	12	н/о	н/о	н/о
As	н/о	14 112	14 215	126
Y	144	н/о	н/о	н/о
Zr	10	15	н/о	н/о
Sb	521	212	467	206
Ba	4	н/о	н/о	229
W	1757	250	684	624
Pb	24	552	61	658
Bi	14	220	79	н/о
U	1	2	1	23

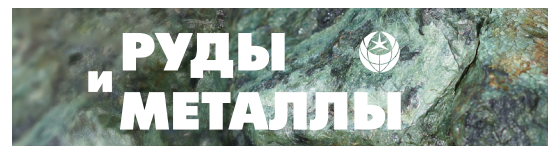
Примечание. н/о – содержание ниже чувствительности метода.

42 мг/кг. Распределение содержаний неоднородное (КВ – 134 %). В двух точках наблюдения Zr не фиксируется, в остальных значения содержаний отличаются от 1,5 до 2,5 раз. Значение A/ош (1,9) низкое положительное, Э/ош (0,0) близко к нулю, распределение содержаний подчиняется нормальному закону (табл. 1). Преобладают значения ниже среднего, они отличаются от него на меньшую величину. Корреляционные связи Zr положительные сильные с Sc (0,82), Ti (0,88), отрицательные слабые с Mn (-0,58), Fe (-0,54), Sb (-0,61) (табл. 2). Цирконий может входить в структуру касситерита и в состав микровключений, ассоциирует с Sc, Ti.

Содержания сурьмы невысокие, в среднем 521 мг/кг, колеблются от 40 до 1490 мг/кг. Распределение содержаний неоднородное (КВ –

114 %). Значения содержаний в пределах точек наблюдения отличаются максимум в 2,3 раза. Значение A/ош (0,9) очень низкое положительное, Э/ош (-1,3) очень низкое отрицательное, распределение содержаний подчиняется нормальному закону (табл. 1). Преобладают значения ниже среднего, они отличаются от него на меньшую величину по сравнению со значениями выше среднего. Корреляционные связи Sb положительные сильные с Mn (0,99), Fe (0,86), Ga (0,72), отрицательные слабые с Ti (-0,51), Zr (-0,61) (табл. 2). Сурьма может входить в структуру касситерита и в состав микровключений, ассоциирует с Mn, Fe, Ga.

Содержания вольфрама высокие, в среднем 1757 мг/кг, находятся в диапазоне от 688 до 3610 мг/кг. Распределение содержаний однородное (КВ – 48 %). В пределах точек на-



блюдения значения содержаний различаются от 1,6 до 2,3 раза. Значение $A/ош$ (1,4) очень низкое положительное, $\mathcal{E}/ош$ (-0,3) очень низкое отрицательное, распределение содержаний подчиняется нормальному закону (табл. 1). Незначительно преобладают значения ниже среднего, они отличаются от него на большую величину. Корреляционные связи W положительные слабые с Pb (0,59) (табл. 2). Вольфрам преимущественно входит в состав микровключений (вольфрамит) и частично в структуру касситерита.

Содержания *свинца* низкие, в среднем 24 мг/кг и находятся в диапазоне от 3 до 106 мг/кг. Распределение содержаний неоднородное ($KB - 108 \%$). В пределах точек наблюдения содержания могут быть близкими, отличаться в 1,3 раза или даже в 35,3 раза. Значение $A/ош$ (3,1) высокое положительное, $\mathcal{E}/ош$ (2,9) низкое положительное, распределение содержаний не подчиняется нормальному закону (табл. 1). По сравнению со значениями выше среднего преобладают значения ниже среднего, и они близки к нему по величине. Можно выделить одно «ураганное» значение – 106 мг/кг. Корреляционные связи Pb положительные сильные с Cu (0,76), Bi (0,81), слабые с W (0,59) (табл. 4). Свинец входит в состав микровключений (галенит) и ассоциирует с Cu , Bi , W .

Содержания *висмута* низкие, в среднем 14 мг/кг и находятся в диапазоне от 0 до 151 мг/кг. Распределение содержаний очень неоднородное ($KB - 271 \%$). Висмут не фиксируется в двух точках наблюдения. Значение 151 мг/кг является «ураганным». Значения $A/ош$ (4,5) и $\mathcal{E}/ош$ (5,6) высокие положительные, распределение содержаний не подчиняется нормальному закону (табл. 1). Корреляционные связи Bi положительные сильные с Cu (0,97), Pb (0,81) (табл. 2). Висмут входит в состав микровключений – сульфидов, ассоциирует с Cu , Pb .

В деревянистом олове изученных месторождений в целом установлено 25 элементов-примесей, средние содержания которых находятся в широком диапазоне (табл. 3). Во всех образцах деревянистого олова фиксируются

содержания Al , Si , K , Ti , Mn , Fe , Zn , Sb , W , Pb , U . Наиболее высокие содержания характерны для Al , Si , K , Fe , Sb и W , а наиболее низкие для U . Деревянистое олово месторождения Хета отличается присутствием Sc , Ga , Y , более высокими содержаниями W , отсутствием B , Na , As , более низкими содержаниями Si , K , Zn , Pb .

Выводы

В деревянистом олове месторождения Хета электронно-микроскопическими исследованиями предположительно установлены микровключения рутила, ильменита, алюмосиликатов, кварца, вольфрамита. Микровключения расположены в микропорах, микротрещинах и образованы как сингенетично с образованием деревянистого олова в рудный этап минералообразования, так и в результате привноса химических элементов растворами в пострудный период.

Методом ЛА-ИСП-МС в деревянистом олове выявлены 25 элементов-примесей с содержанием выше 1 мг/кг. Из них Mg , Si , V , As , Mo , Ag , Ba , Hf фиксировались в отдельных измерениях с очень низкими содержаниями. Средние значения Nb и U менее 5 мг/кг. В интервале 10–100 мг/кг находятся средние содержания K , Sc , Mn , Cu , Zn , Ga , Zr , Pb , Bi , в интервале 100–1000 мг/кг – Ti , Y , Sb , а в интервале выше 1000 мг/кг – Al , Fe , W . Для большинства элементов характерен нормальный закон распределения содержаний, для K , Cu , Zn , Pb , Bi распределение содержаний не подчиняется нормальному закону.

Установлены положительные корреляционные связи элементов: Al и K ; Sc с Ti , Zr ; Ti с Sc , Zr ; Mn с Fe , Ga , Sb ; Fe с Mn , Ga , Sb ; Cu с Pb , Bi ; Ga с Mn , Fe , Sb ; Zr с Sc , Ti ; Sb с Mn , Fe , Ga ; W с Pb ; Pb с Cu , W , Bi ; Bi с Cu , Pb . Отрицательные корреляционные связи между элементами немногочисленны: Ti с Sb ; Mn с Zr ; Fe с Zr ; Zr с Fe , Sb ; Sb с Ti , Zr .

Большое количество элементов-примесей, в том числе и с высокими содержаниями, свидетельствует о присутствии в деревянистом олове разнообразных микровключений. Ряд элементов (Sc , Ti , V , Fe , Zr , Nb , W , U) могут

входить и в структуру касситерита. Диагностика минеральных микровключений требует дальнейших исследований.

Месторождение Хета расположено в экономически развитом районе с высокими перспективами наращивания запасов, в том числе и на прилегающих площадях, с комплексным

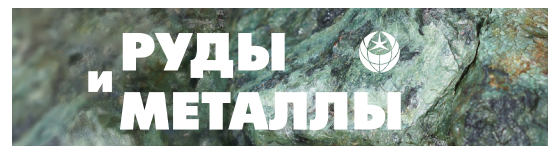
составом руд. Это позволяет считать месторождение перспективным для освоения, а его дальнейшее изучение – актуальным. Отметим, что наряду с рудными минералами агаты и халцедоны, генетически связанные с месторождением, могут использоваться в качестве ювелирно-поделочного материала.

Список литературы

1. Воронина Л. В., Гайдукова В. С., Добровольская Н. В. и др. О формах вхождения железа в состав касситерита // Геохимия. – 1978. – № 10. – С. 1474–1491.
2. Геология оловорудных месторождений СССР / Под. ред. С. Ф. Лугова. – Т. 1. Геологические основы прогноза, поисков и оценки оловорудных месторождений. – М.: Недра, 1986 – 332 с.
3. Геология оловорудных месторождений СССР / Под. ред. С. Ф. Лугова. – Т. 2. Кн. 1. Оловорудные месторождения СССР. – М.: Недра, 1986. – 429 с.
4. Доломанова Е. И., Боярская Р. В., Ракчеева А. Д. и др. Касситерит и типоморфные особенности / Типоморфизм минералов. – М.: Наука, 1969. – С. 128–184.
5. Доломанова Е. И., Подольский А. М., Добровольская Н. В. и др. К вопросу об изоморфизме в касситерите / Изоморфизм в минералах. – М.: Наука, 1974. – С. 61–79.
6. Каждан А. Б., Гуськов О. И., Шиманский А. А. Математические методы в геологии. Учебник для вузов. – М.: Недра, 2010. – 251 с.
7. Кривоконова Г. К., Сирина Т. Н. Рентгенографические признаки формационной принадлежности касситерита // Разведка и охрана недр. – 2005. – № 4. – С. 40–46.
8. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твёрдых полезных ископаемых. Олово. – М.: НП НАЭП, 2002. – 48 с.
9. Микронеоднородность касситерита. Атлас электронно-микроскопических фотографий и микродифракционных картин / Под. ред. А. И. Гинзбурга. – М.: Недра, 1981. – 219 с.
10. Петроченков Д. А. Коллекционные и ювелирные касситериты. – М.: Горная книга, 2019. – 280 с.
11. Руководство по предварительной математической обработке геохимической информации при поисковых работах. – М.: Недра, 1965. – 120 с.
12. Kolin J. H. Cassiterite from Viloko, Bolivia // Gems & Gemology. Summer. – 2002. – pp. 175–176.
13. Wenging H., Jungui Z., Ting Sh. et al. Gemological and Trace Element Characteristics of Cassiterite from Yunling, China // Gems & Gemology. Summer. – 2024. – pp. 168–193.

References

1. Voronina L. V., Gaidukova V. S., Dobrovol'skaya N. V. et al. O formakh vkhozhdeniya zheleza v sostav kassiterita [On the forms of iron in cassiterite], Geokhimiya [Geochemistry], 1978, No 10, pp. 1474–1491. (In Russ.)
2. Geologiya olovorudnykh mestorozhdenii SSSR / Pod. red. S. F. Lugova [Geology of tin ore deposits of the USSR / Ed. S. F. Lugov], T. 1. Geologicheskie osnovy prognoza, poiskov i otsenki olovorudnykh mestorozhdenii [Vol. 1. Geological foundations of forecasting, prospecting and evaluation of tin ore deposits], Moscow, Nedra Publ., 1986, 332 p.
3. Geologiya olovorudnykh mestorozhdenii SSSR / Pod. red. S. F. Lugova [Geology of tin ore deposits of the USSR / Ed. S. F. Lugov], T. 2. Kn. 1. Olovorudnye mestorozhdeniya SSSR [Vol. 2. Book 1. Tin ore deposits of the USSR], Moscow, Nedra Publ., 1986, 429 p.
4. Dolomanova E. I., Boyarskaya R. V., Rakcheeva A. D. et al. Kassiterit i tipomorfnye osobennosti [Cassiterite and typomorphic features]. In: Tipomorfizm mineralov [Typomorphism of minerals], Moscow, Nauka Publ., 1969, pp. 128–184.
5. Dolomanova E. I., Podol'skii A. M., Dobrovol'skaya N. V. et al. K voprosu ob izomorfizme v kassiterite [On the issue of isomorphism in cassiterite]. In: Izomorfizm v mineralakh [Isomorphism in minerals], Moscow, Nauka Publ., 1974, pp. 61–79.



6. Kazhdan A. B., Gus'kov O. I., Shimanskii A. A. Matematicheskie metody v geologii. Uchebnik dlya vuzov [Mathematical methods in geology. Textbook for universities], Moscow, Nedra Publ., 2010, 251 p.
7. Krivokoneva G. K., Sirina T. N. Rentgenograficheskie priznaki formatsionnoi prinadlezhnosti kassiterita [X-ray features of the formational affiliation of cassiterite], Razvedka i okhrana neдр [Exploration and protection of subsoil], 2005, No 4, pp. 40–46. (In Russ.)
8. Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu Klassifikatsii zapasov mestorozhdenii i prognoznykh resursov tverdykh poleznykh iskopaemykh. Olovo [Methodological recommendations for the application of the Classification of deposit reserves and forecast resources of solid minerals. Tin], Moscow, NP NAEP Publ., 2002, 48 p.
9. Mikroneodnorodnost' kassiterita. Atlas elektronno-mikroskopicheskikh fotografii i mikrodifraktsionnykh kartin / Pod. red. A. I. Ginzburga [Microheterogeneity of cassiterite. Atlas of electron microscopic photographs and microdiffraction patterns / Ed. A. I. Ginzburg], Moscow, Nedra Publ., 1981, 219 p.
10. Petrochenkov D. A. Kollekttsionnye i yuvelirnye kassiterity [Collection and jewelry cassiterites], Moscow, Gornaya Kniga Publ., 2019, 280 p.
11. Rukovodstvo po predvaritel'noi matematicheskoi obrabotke geokhimicheskoi informatsii pri poiskovykh rabotakh [Guide to preliminary mathematical processing of geochemical information in prospecting operations], Moscow, Nedra Publ., 1965, 120 p.
12. Kolin J. H. Cassiterite from Viloko, Bolivia, Gems & Gemology, 2002, Summer, pp. 175–176.
13. Wenging H., Jungui Z., Ting Sh. et al. Gemological and Trace Element Characteristics of Cassiterite from Yunling, China, Gems & Gemology, 2024, Summer, pp. 168–193.

Петроченков Дмитрий Александрович (p-d-a@mail.ru)
кандидат геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой¹

Фомина Марина Ивановна
кандидат геолого-минералогических наук, учёный секретарь²

Чижова Ирина Александровна
доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник³

¹ ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе» (МГРИ), г. Москва, Россия;

² ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва, Россия;

³ ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, г. Москва, Россия

Dmitry Aleksandrovich Petrochenkov
Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Department¹

Marina Ivanovna Fomina
Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Academic Secretary²

Irina Aleksandrovna Chizhova
Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher³

¹ Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia;

² Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow, Russia;

³ Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia



ПОЗДРАВЛЯЕМ С ЮБИЛЕЕМ



17 февраля 2026 года отметил 75-летие крупный специалист в сфере геологической съёмки, поисков и оценки месторождений рудных и неметаллических полезных ископаемых, исполняющий обязанности генерального директора ЦНИГРИ, доктор геолого-минералогических наук **Анатолий Иннокентьевич Иванов**.

За полвека в профессии Анатолий Иннокентьевич внёс ощутимый вклад в укрепление минерально-сырьевой базы России. Витимский железорудный узел и Тонодский олово-вольфрамовый район, месторождения рудного золота Ожерелье, Ыканское, Аройское, месторождение гипса Усть-Куретское, месторождение талька Камчадал, ряд перспективных рудопроявлений золота, олова, вольфрама, молибдена были выявлены на основе составленных А. И. Ивановым прогнозных оценок и при его непосредственном

участии. Многократно были апробированы методические и технологические приёмы поисков золоторудных месторождений, в том числе в сложных горно-таёжных ландшафтах и в условиях вечной мерзлоты, созданные Анатолием Иннокентьевичем. Он автор более 80 научных трудов, трёх монографий; его исследования в области научно-методических основ прогноза, поисков и оценки крупнообъёмных месторождений золота в черносланцевых толщах хорошо известны в России и в мире.

А. И. Иванов – заслуженный геолог РФ, почётный разведчик недр, первооткрыватель трёх месторождений золота и двух месторождений неметаллических полезных ископаемых, он награждён медалями «За заслуги в разведке недр» (1984), «За трудовую доблесть» (1985), Почётной грамотой Президента Российской Федерации с нагрудным знаком (2019), медалью «Геолог Игорь Грамберг» (2020), удостоен звания «Человек года: ветеран-геологоразведчик России – 2019 г.». Славный путь, на котором были достигнуты отмеченные этими наградами успехи, начался для выпускника Иркутского государственного университета с исследований на Патомском нагорье, в Западном Прибайкалье, в Восточном Саяне. За восемнадцать лет работы в ПГО «Иркутскгеология» А. И. Иванов достиг должности ведущего геолога, в новую эпоху – с 1992 года – занимал пост генерального директора ЗАО «Офит» и ЗАО «Сибирская геологическая компания».

В 2012 году Анатолий Иннокентьевич начал работать в ЦНИГРИ в должности первого заместителя директора, в 2015 году возглавил институт. Он успешно руководил крупными проектами по государственным контрактам и сумел в короткие сроки обеспечить преобразование института из унитарного предприятия в бюджетное учреждение. ФГБУ «ЦНИГРИ» сохранил научный коллектив и по сей день остаётся одним из ведущих учреждений Роснедр. В 2026 году Анатолий Иннокентьевич Иванов продолжает исполнять обязанности директора ЦНИГРИ и осуществляет научное руководство исследованиями нашего института. Особое внимание он уде-



ляет одному из наиболее важных направлений деятельности – научно-методическому сопровождению геологоразведочных работ, проводимых за счёт средств федерального бюджета. Также А. И. Иванов руководит рядом важных проектов, призванных обеспечить прирост прогнозных ресурсов золота РФ. В комплексе с другими научными направлениями работы ЦНИГРИ эта деятельность предопределяет взаимодействие института с широким кругом производственных и академических организаций, а также заметную роль, которую он играет в сфере международного сотрудничества.

Анатолий Иннокентьевич курирует проведение Международной научно-практической конференции «Геология, прогноз, поиски и оценка месторождений алмазов, благородных и цветных металлов», которую ежегодно организует ЦНИГРИ, – важнейшей площадки для развития взаимодействия между отраслевой, академической наукой и производственными организациями. А. И. Иванов возглавляет диссертационный совет института, руководит работой ряда соискателей учёной степени кандидата наук, выступает научным консультантом по подготовке докторских диссертаций. Он определяет редакционную политику двух уникальных научных журналов, выходящих в ЦНИГРИ, – «Отечественная геология» и «Руды и металлы». При поддержке и под руководством А. И. Иванова в 2022 году запущена книжная серия «Учёные ЦНИГРИ», издания которой высоко оценило жюри Всероссийского конкурса на премию имени А. В. Сидоренко «За лучшую популяризацию профессии геолога».

Обладая огромным опытом полевых работ, Анатолий Иннокентьевич прекрасно понимает их значение для роста молодых специалистов, для формирования научных воззрений геолога: он и сегодня лично принимает участие в полевых работах вместе с молодыми специалистами, а также делает всё возможное, чтобы расширить географию экспедиций института. По его инициативе в ЦНИГРИ создан Совет молодых учёных и специалистов; в 2019 году он обеспечил создание совместной с геологоразведочным факультетом МГРИ базовой кафедры прогноза, поисков и разведки рудных месторождений.

В 2020 году в стенах ЦНИГРИ впервые прошла Молодёжная научно-образовательная конференция «МСБ алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче», впоследствии ставшая ежегодной и преобразованная в Рудную школу ЦНИГРИ. Вдохновителем этого нового проекта – площадки для диалога геологов разных поколений – также стал Анатолий Иннокентьевич Иванов. Сегодня он как научный руководитель ФГБУ «ЦНИГРИ» и один из лидеров отечественной геологической отрасли прилагает много сил для того, чтобы наш институт успешно работал и развивался.

В пору юбилея мы желаем Анатолию Иннокентьевичу новых находок на увлекательных маршрутах, одарённых учеников, крепкого здоровья и неисчерпаемой энергии!

*Учёный совет ЦНИГРИ,
Редколлегия журнала*



ПОЗДРАВЛЯЕМ С ЮБИЛЕЕМ



13 марта 2026 года заслуженный деятель науки Российской Федерации, почётный разведчик недр, доктор геолого-минералогических наук **Борис Игоревич Беневольский** отметил 90-летие.

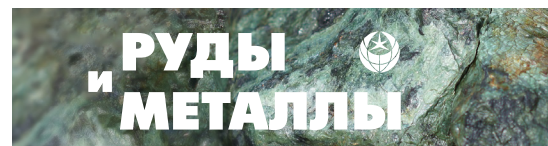
Борис Игоревич Беневольский – уникальный специалист, совмещающий значительный опыт полевых исследований и многолетней аналитической работы в Министерстве геологии СССР, эксперт высочайшего уровня в области геолого-экономического мониторинга и конъюнктуры минерального сырья. В числе важнейших достижений Бориса Игоревича – создание методических основ для актуализации стратегии развития отечественной геологоразведочной отрасли на рубеже XX и XXI веков.

Альма-матер Бориса Игоревича – геологический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова. По окончании университета в 1958 г. он приступил к работе в Геологическом управлении «Севостгеология» в

Центрально-Колымском районе и за четырнадцать лет прошёл путь от горного мастера круглогодичной партии до главного инженера крупной экспедиции, которая вела поиски коренных и разведку россыпных месторождений золота. При непосредственном участии Б. И. Беневольского разведаны крупные россыпи верховья р. Колыма (Валунный, Болотный и др.). В те годы он занимался оценкой ресурсного потенциала коренного и россыпного золота этой перспективной территории и внёс свой вклад в укрепление сырьевой базы золотодобывающих предприятий региона.

С 1972 по 1989 г. Борис Игоревич Беневольский работал в Министерстве геологии СССР главным специалистом по алмазам и благородным металлам, внося огромный вклад в открытие и промышленную оценку многих коренных и россыпных месторождений золота (Олимпиадинское, Дукатское, Кубакинское, Покровское, Мужиевское, Большой Канимансур и др.), создание сырьевой базы золота в Камчатской области, Корякском автономном округе, Республике Коми и других регионах России. При его участии разработаны эффективные государственные программы ГРР в перспективных районах, в результате которых создана одна из крупнейших в мире минерально-сырьевых баз золото- и серебродобывающей промышленности России и стран СНГ, обеспечивающая в начале XXI века стабильную высокую добычу золота и серебра и дальнейшую перспективу её увеличения. Борис Игоревич активно участвовал в создании современных методических руководств по поискам, разведке и геолого-экономической оценке коренных и россыпных месторождений, что оказало влияние на развитие сырьевой базы и формирование отечественной школы геологоразведчиков.

В 1989 году Б. И. Беневольский перешёл на работу в ЦНИГРИ. В условиях рыночной экономики его научно-аналитические и прикладные разработки способствовали эффективному недропользованию. Наиболее важное значение имели крупные проекты ЦНИГРИ, реализованные при активном участии Бориса Игоревича: разработка средне-долгосрочной государственной программы развития минерально-сырьевой базы золотодобывающей промышленности, создание концепции национальной минерально-сырьевой безопасности в условиях динамично развивающихся процессов глобализации минерально-сырьевого комплекса, написание монографий «Ми-



нерально-сырьевая база благородных и цветных металлов к 2025 году. Мир и Россия», «Золото России», «Проблемы использования и воспроизводства МСБ», создание комплекта карт золотоносности федеральных округов и субъектов Российской Федерации. Авторы концепции национальной минерально-сырьевой безопасности РФ, и в их числе Борис Игоревич Беневольский, удостоены звания лауреата премии им. А. Н. Косыгина. В трудах Б. И. Беневольского и его соавторов обоснована идеология государственной стратегии по развитию сырьевой базы золотодобычи, её использованию и воспроизводству, стабилизации добычи золота.

Следуя велениям времени, ощущая необходимость модернизации отрасли, Борис Игоревич в начале 90-х годов совместно с другими учёными института занимался разработкой, обоснованием, а в дальнейшем и внедрением системы мониторинга использования и воспроизводства минерально-сырьевой базы твёрдых полезных ископаемых как управляющей и регулирующей основы развития отечественной сырьевой базы, созданием единой информационной системы «Минерально-сырьевые ресурсы России». Также он является одним из авторов исследований по переоценке прогнозных ресурсов благородных и цветных металлов и соответствующих методических руководств.

В этот же период Борис Игоревич много внимания уделял проблеме создания правовой основы системы недропользования, участвовал в составе экспертных групп Государственной Думы в разработке проектов законов о недрах, соглашении о разделе продукции, драгоценных металлах и драгоценных камнях и др. По результатам этих работ коллективом авторов подготовлены специализированные словари-справочники, дающие определения новой терминологии.

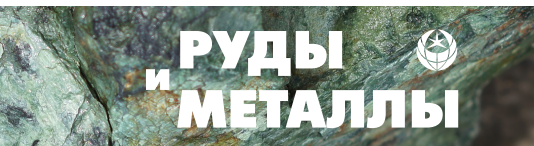
Под руководством и при участии Б. И. Беневольского проводилась геолого-экономическая оценка и разработка технико-экономических обоснований промышленного освоения месторождений цветных и благородных металлов (Озерновского, Каменского, Покровского, Павловского, Сейнавского узла, Фёдоровой тундры и др.) в новых условиях недропользования.

Вместе с коллегами Б. И. Беневольским проведена актуализация классификации запасов и прогнозных ресурсов твёрдых полезных ископаемых и стадийности геологоразведочных работ в части их адаптации к международному регламенту, принятому в основных сырьевых странах мира, актуализированы методические рекомендации по оценке прогнозных ресурсов твёрдых полезных ископаемых, впервые в отечественной геологии разработана и успешно внедрена не знающая аналогов система кадастрового учёта прогнозных ресурсов твёрдых полезных ископаемых.

Рекомендации, сформулированные в работах Б. И. Беневольского, реализованы в промышленном освоении ряда крупных коренных и россыпных месторождений благородных и цветных металлов, в привлечении внимания инвесторов, внесли весьма ощутимый вклад в увеличение добычи рудного золота, сдерживание темпов падения производства россыпного золота в стране.

В течение многих лет Б. И. Беневольский выполнял научно-организационную работу, являясь заместителем председателя секции Учёного совета ЦНИГРИ, председателем секции конъюнктуры минерального сырья Межведомственного экспертного научно-методического совета МПР России по геологии алмазов, благородных и цветных металлов, членом секции россыпей Межведомственного комитета по рудообразованию и металлогении РАН, главным научным экспертом МПР России по благородным металлам, экспертом, а впоследствии и членом комиссии ГКЗ, членом редколлегии научно-технического журнала «Руды и металлы», членом совета редакции журнала «Минеральные ресурсы России. Экономика и управление».

Продолжая научную работу, Б. И. Беневольский неоднократно участвовал в деятельности международных геологических конгрессов, отечественных и международных симпозиумов



и конференций по проблематике минерально-сырьевого обеспечения в условиях глобализации мировой экономики. Он автор 150 научных трудов, в том числе 10 монографий.

Многолетняя и плодотворная деятельность Б. И. Беневольского, направленная на развитие и укрепление минерально-сырьевой базы твёрдых полезных ископаемых, высоко оценена государством и геологическим сообществом России. Борис Игоревич Беневольский – лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники и премии имени А. Н. Косыгина, почётный разведчик недр, действительный член Академии горных наук и Международной академии информатизации. В 2015 г. решением правления Ассоциации Геологических Организаций он награждён нагрудным знаком «Звезда геолога» № 2.

Поздравляем Бориса Игоревича с 90-летием! Желаем надёжного здоровья и хорошего настроения!

*Учёный совет ЦНИГРИ,
Редколлегия журнала*