

ISSN 0869-5997

И РУДЫ 
и МЕТАЛЛЫ
ORES AND METALS

2 / 2021

РУДЫ И МЕТАЛЛЫ 2 / 2021

Учредитель

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

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

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

Москва, ЦНИГРИ, 2021

Журнал издаётся при поддержке
Международной ассоциации по генезису
рудных месторождений



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Черных Александр Иванович

главный редактор
генеральный директор ФГБУ «ЦНИГРИ»
кандидат геолого-минералогических наук

Иванов Анатолий Иннокентьевич

заместитель главного редактора
научный руководитель ФГБУ «ЦНИГРИ»
доктор геолого-минералогических наук

Пирайно Франко

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

Наумов Евгений Анатольевич

заместитель главного редактора по общим вопросам
заместитель генерального директора
по научной работе ФГБУ «ЦНИГРИ»
кандидат геолого-минералогических наук

Жаркова Вера Сергеевна

заместитель главного редактора
по редакционно-издательской деятельности
заведующая редакционно-оформительским
отделом ФГБУ «ЦНИГРИ»

Аракчеев Дмитрий Борисович

генеральный директор ФГБУ «Росгеолфонд»
кандидат технических наук

Волчков Алексей Гордеевич

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

Вымазалова Анна

руководитель департамента геохимии
Чешской геологической службы

Голубев Юрий Конкордьевич

заведующий отделом алмазов ФГБУ «ЦНИГРИ»
кандидат геолого-минералогических наук

Горячев Николай Анатольевич

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

Дементьев Владимир Евгеньевич

генеральный директор АО «Иргиредмет»
кандидат технических наук

Звездов Вадим Станиславович

заведующий отделом металлогении ФГБУ «ЦНИГРИ»
кандидат геолого-минералогических наук

Калинин Юрий Александрович

главный научный сотрудник ИГМ СО РАН
доктор геолого-минералогических наук

Кременецкий Александр Александрович

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

Кряжев Сергей Гаврилович

заведующий отделом минералогии
и изотопной геохимии ФГБУ «ЦНИГРИ»
доктор геолого-минералогических наук

Кузнецов Владимир Вениаминович

заведующий отделом цветных металлов ФГБУ «ЦНИГРИ»
кандидат геолого-минералогических наук

Ленц Дэвид

профессор, Университет Нью Брунсуик, Канада

Мишенин Сергей Григорьевич

заведующий отделом геофизики ФГБУ «ЦНИГРИ»
кандидат геолого-минералогических наук

Похиленко Николай Петрович

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

Проскурнин Василий Фёдорович

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

Зельтманн Реймар

профессор, Музей естественной истории,
г. Лондон, Великобритания

Толстов Александр Васильевич

директор НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО)
доктор геолого-минералогических наук

Третьякова Ирина Геннадьевна

учёный секретарь ФГБУ «ЦНИГРИ»
кандидат геолого-минералогических наук

Фридовский Валерий Юрьевич

директор ИГАБМ СО РАН
доктор геолого-минералогических наук, профессор

ORES AND METALS 2/2021

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, 2021

The Journal is published with the support of the IAGOD
(International Association on the Genesis of Ore Deposits)



EDITORIAL BOARD

Alexander I. Chernykh

Editor-in-chief
FSBI TsNIGRI, General Director
PhD

Anatoly I. Ivanov

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

Franco Pirajno

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

Evgeniy A. Naumov

Deputy Editor-in-chief
FSBI TsNIGRI, Deputy Director for Research
PhD

Vera S. Zharkova

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

Dmitry B. Arakcheev

FSBI Rosgeofond, General Director
PhD

Alexey G. Volchkov

Head of scientific and methodical department, FSBI TsNIGRI
PhD

Anna Vymazalova

Head of Dept. Rock Geochemistry, Czech Republic

Yuri K. Golubev

Head of diamond department, FSBI TsNIGRI
PhD

Nikolay A. Goryachev

Chief researcher, NEISRI FEB RAS
Corr. Member of RAS

Vladimir E. Dementiev

General Director, JSC Irgiredmet
PhD

Vadim S. Zvezdov

Head of metallogeny department, FSBI TsNIGRI
PhD

Yuri A. Kalinin

Chief researcher, IGM SB RAS
PhD

Alexander A. Kremenetsky

Advisor to General Director, FSBI IMGRE
PhD

Sergey G. Kryazhev

Head of mineralogy and isotope geochemistry
department, FSBI TsNIGRI
PhD

Vladimir V. Kuznetsov

Head of base metals department, FSBI TsNIGRI
PhD

David Lentz

Dr., Professor, University of New Brunswick, Canada

Sergey G. Mishenin

Head of geophysics department, FSBI TsNIGRI
PhD

Nikolay P. Pokhilenko

Scientific Director, IGM SB RAS
Academician of RAS

Vasily F. Proskurnin

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

Reimar Seltmann

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

Alexander V. Tolstov

Director, JSC ALROSA (PJSC)
PhD

Irina G. Tretiakova

Science secretary, FSBI TsNIGRI
PhD

Valery Yu. Fridovsky

Director, IGABM SB RAS
PhD, Professor

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ПРИКЛАДНАЯ МЕТАЛЛОГЕНИЯ

Андреев А. В.

Прогнозно-поисковая модель золоторудных объектов Топугол-Ханмейшорского рудного узла как основа для выделения перспективных площадей в пределах Малоуральского вулcano-плутонического пояса Полярного Урала и обоснования постановки на них поисковых работ

06

APPLIED METALLOGENY

Andreev A. V.

Forecast-exploration model of gold deposits of the Toupugol-Khanmeishor ore cluster as a basis for identification of promising areas for geological exploration within the Malyi Ural volcano-plutonic belt in the Polar Urals

**Молчанов А. В., Терехов А. В.,
Козлов Г. А., Лебедев И. О.,
Хорохорина Е. И., Гусев В. Е.**

Алдано-Вилуйская рудно-россыпная золотоносная провинция (Россия)

25

**Molchanov A. V., Terekhov A. V.,
Kozlov G. A., Lebedev I. O.,
Horochorina E. I., Gusev V. E.**

Aldan-Vilyui ore-placer gold-bearing province, Russia

**Черных А. И., Ширококов А. Ю.,
Арсентьева И. В.**

Металлогения золота Восточно-Таннуольского рудного района (Республика Тыва)

40

**Chernykh A. I., Shirobokov A. Yu.,
Arsentieva I. V.**

Gold metallogeny of the East Tannu-Ola ore region, Tyva Republic

МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА, ПОИСКОВ, ОЦЕНКИ И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

**Пачерский Н. В., Кряжев С. Г.,
Наумов Е. А., Десятова Д. Ю.,
Двуреченская С. С., Самойленко М. В.**

Новые данные по золото-редкометалльному
оруденению Центрально-Колымского
золотоносного района: возраст,
условия образования, состав,
рудоконтролирующие факторы

68

PROGNOSIS, PROSPECTING AND EXPLORATION: TECHNIQUES AND METHODS

**Pachersky N. V., Kryazhev S. G.,
Naumov E. A., Desyatova D. Yu.,
Dvurechenskaya S. S., Samoilenko M. V.**

New data on the reduced intrusion-related
Au mineralization of Central Kolyma
gold region: age, formation conditions,
composition, ore-controlling factors

СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

**Мотов А. П., Малах Ю. Е.,
Воропаев И. С.**

Никелевые аномалии
и золото кварцевая минерализация
в дунит-гарцбургитовых массивах
Первомайско-Верхотуринской
площади (Центральный Урал)

90

GEOLOGY OF ORE DEPOSITS

**Motov A. P., Malakh Yu. E.,
Voropaev I. S.**

Nickel anomalies and gold-quartz
mineralization in dunite-harzburgite
massifs of the Pervomayskaya-
Verkhoturinskaya area, Central Urals

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

**Эскобар А. Г., Зельтманн Р.,
Бродбент К., Робинсон П.**

Флотационное обогащение
свинцово-флюоритовой руды:
влияние характеристик руды
и кинетики флотации

99

COMPREHENSIVE USE OF MINERALS

**Escobar A. G., Seltmann R.,
Broadbent C., Robinson P.**

Upgrading of a lead-fluorspar
ore by flotation: effects
of ore characteristics
and kinetics of flotation

Прогнозно-поисковая модель золоторудных объектов Тоупугол-Ханмейшорского рудного узла как основа для выделения перспективных площадей в пределах Малоуральского вулcano-плутонического пояса Полярного Урала и обоснования постановки на них поисковых работ

Forecast-exploration model of gold deposits of the Toupugol-Khanmeishor ore cluster as a basis for identification of promising areas for geological exploration within the Malyi Ural volcano-plutonic belt in the Polar Urals

Андреев А. В.

Andreev A. V.

Разработана и актуализирована прогнозно-поисковая модель золоторудных объектов Тоупугол-Ханмейшорского рудного узла, которая использована для обоснования постановки поисковых работ в пределах перспективных площадей Малоуральского вулcano-плутонического пояса (ВПП) Полярного Урала. В результате проведённых исследований, наиболее перспективными для дальнейших поисковых работ на рудное золото различных структурно-вещественных типов (субформаций) золото-сульфидно-кварцевой формации считаются Манюкюуский и Кокпельский потенциальные рудные узлы в составе комплексного Таньюско-Лагортинского рудного района южной части Малоуральского ВПП.

Ключевые слова: Полярный Урал, Малоуральский вулcano-плутонический пояс, Тоупугол-Ханмейшорский рудный узел, Таньюско-Лагортинский рудный район, золото-сульфидно-кварцевая формация, структурно-вещественные типы – золото-скарновый, золото-сульфидно-кварцевый, золото-порфировый, прогнозно-поисковая модель.

A forecast-exploration model of gold deposits of the Toupugol-Khanmeishor ore cluster was developed, which made it possible to recommend geological exploration within other promising areas of the Malyi Ural volcano-plutonic belt (VPB) in the Polar Urals. The studies have demonstrated that the Manyukuyu and Kokpela potential ore clusters of the Tan'yu-Lagorta complex ore district in the southern Malyi Ural VPB represent the most promising targets for the further prospecting for lode gold mineralization assigned to various structural-compositional subtypes of the gold-sulfide-quartz mineral type.

Keywords: Polar Urals, Malyi Ural volcano-plutonic belt, Toupugol-Khanmeishor ore cluster, Tan'yu-Lagorta ore district, gold-sulfide-quartz formation, structural-compositional types of gold mineralization (skarn-related gold, gold-sulfide-quartz, and porphyry gold types), forecast-exploration model.

Для цитирования: Андреев А. В. Прогнозно-поисковая модель золоторудных объектов Тоупугол-Ханмейшорского рудного узла как основа для выделения перспективных площадей в пределах Малоуральского вулcano-плутонического пояса Полярного Урала и обоснования постановки на них поисковых работ. Руды и металлы. 2021. № 2. С. 6–24. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10008.

For citation: Andreev A. V. Forecast-exploration model of gold deposits of the Toupugol-Khanmeishor ore cluster as a basis for identification of promising areas for geological exploration within the Malyi Ural volcano-plutonic belt in the Polar Urals. Ores and metals, 2021, № 2, pp. 6–24. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10008.



Пик интереса к изучению коренной золотоносности Полярного Урала пришёлся на конец 1990-х – 2000-е годы в связи с планами по реализации социально-экономического проекта «Урал Промышленный – Урал Полярный» («УПУП»). За полтора десятилетия на территории региона был проведён существенный объём работ по геологическому изучению перспективных площадей и поискам коренных месторождений меди и золота. Наибольшие успехи в отношении выявления коренных золоторудных объектов достигнуты в пределах Малоуральской структурно-формационной подзоны (СФЗП) Войкарской структурно-формационной (металлогенической) зоны (СФЗ) восточного склона Полярного Урала (Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО)). В пределах Малоуральской СФЗП с участием автора был оконтурен и в разной степени изучен ряд перспективных площадей, приуроченных к образованиям вулкано-плутонической ассоциации (ВПА) силурийско-девонского Малоуральского вулкано-плутонического пояса (рис. 1).

В ходе этих работ наиболее исследован Тоупугол-Ханмейшорский золоторудный узел на северном замыкании Малоуральского ВПП (работы ОАО «ПУГГП», АО «Ямалзолото», ОАО «ЯГК», ООО «Ямалгео», ЦНИГРИ, ИМГРЭ, ООО «НПП Геосфера» и др.), где были обнаружены и разведаны месторождения золото-сульфидно-кварцевой рудной формации Новогоднее-Монто и Петропавловское с суммарными запасами золота кат. $C_1 + C_2$ – 20,2 т и прогнозными ресурсами кат. P_1 – 24 т (Peter Hambro Mining Plc. Annual Report and Accounts, 2008). Особенность выявленных золоторудных объектов – пространственное сочетание в пределах каждого из них в различных соотношениях нескольких структурно-вещественных типов (субформаций) золото-сульфидно-кварцевой формации [7]: золото-скарнового, золото-порфирового и золото-сульфидно-кварцевого, подробно охарактеризованных в предыдущих публикациях [1 и др.].

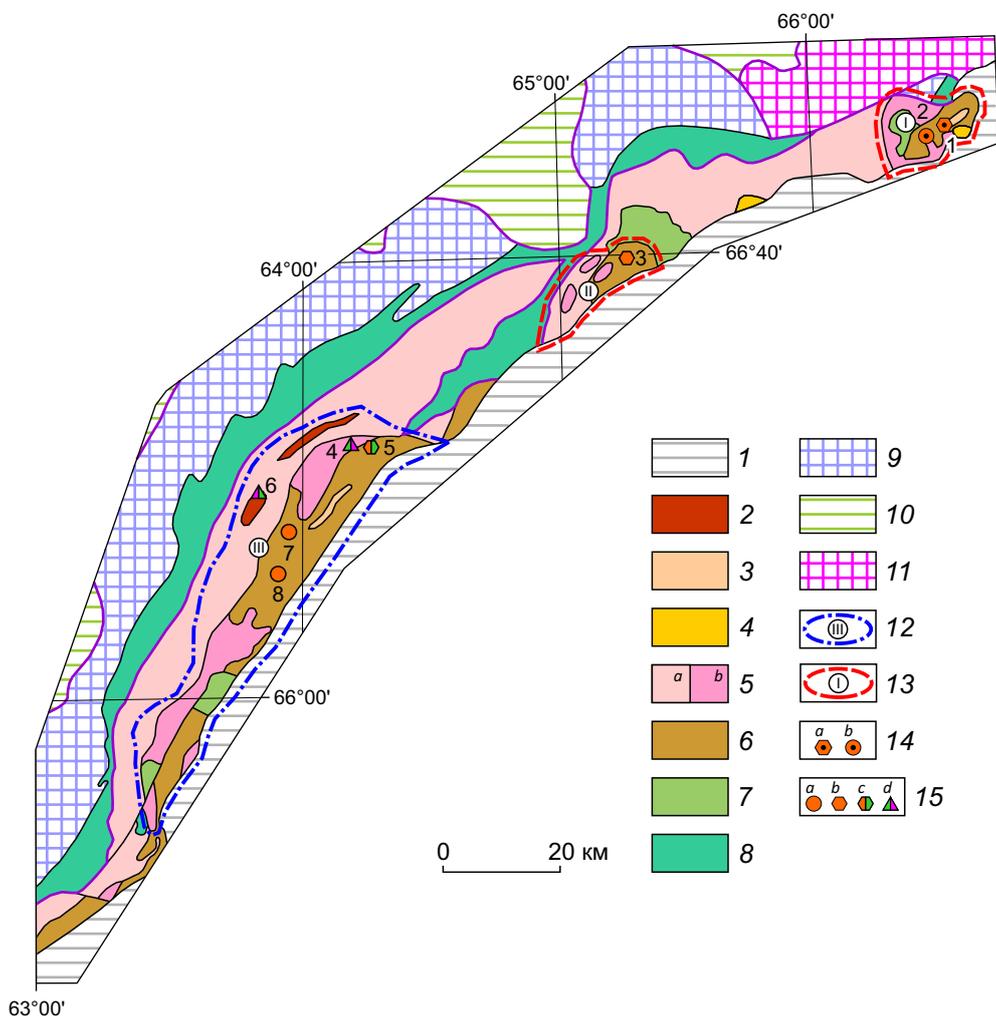
Разработанные ранее в ЦНИГРИ предварительные геолого-поисковые модели месторождений Новогоднее-Монто и Петропавловское, основанные на результатах работ различного

профиля вышеназванных организаций, применялись как при поисковых работах в пределах Тоупугол-Ханмейшорского рудного узла (А. Н. Бординов и др., 2005 г.), так и при тематических и поисковых работах в южных районах Малоуральского ВПП: ЦНИГРИ (А. Г. Волчков и др., 2004 г., 2007 г.; Н. М. Риндзюнская и др., 2004 г.), ООО «Ямалгео» (А. Е. Степанов и др., 2007 г.), ОАО «ПУГГП» (И. З. Галиуллин и др., 2009 г.), ИМГРЭ (Р. А. Терентьев и др., 2009 г., 2012 г.), ОАО «ЯГК» (А. А. Шлома и др., 2011 г.). Проведённые работы позволили установить новые золоторудные проявления и высоко оценить потенциал всего Малоуральского ВПП на возможность обнаружения промышленно значимых золоторудных объектов [2–5 и др.].

В начале 2010-х гг. интерес к рудным объектам Полярно-Уральского региона резко снизился, месторождения Новогоднее-Монто и Петропавловское были заморожены на стадии подготовки к освоению, а дальнейшее изучение перспектив выявления новых золоторудных объектов Полярного Урала было практически прекращено.

Необходимость возобновления поисков и освоения коренных месторождений полезных ископаемых и, в первую очередь, развития минерально-сырьевой базы золота на Полярном Урале вновь была обозначена государственной программой «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации» (постановление Правительства РФ от 21 апреля 2014 г. № 366) и Указом Президента РФ № 164 от 5 марта 2020 г. «Об основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года». Указанные документы предполагают наращивание за счёт государственного и частного финансирования объёмов геологоразведочных работ (ГРР), которые будут способствовать развитию ресурсной базы полезных ископаемых Арктической зоны и, соответственно, повышению инвестиционной привлекательности расположенных в её пределах регионов, к которым относятся и ЯНАО.

Несмотря на огромное стратегическое значение Ямальского региона в отношении природного газа и нефти, задача по «воспроизвод-



ству и использованию природных ресурсов», обозначенная указанными документами, определяет целесообразность постановки новых поисковых работ на твёрдые полезные ископаемые, прежде всего, на коренное золото. В связи с этим возникла необходимость уточнения и актуализации ранее созданных геолого-поисковых (прогнозно-поисковых) моделей золоторудных объектов для современных требований и условий проведения ГРР.

Обширный материал, полученный автором при изучении объектов Тоупугол-Ханмейшорского рудного узла и других районов Полярного Урала, послужил основой для разработки актуализированной прогнозно-поисковой модели золоторудных объектов Малоуральского ВПП, которая позволяет выделять новые перспектив-

ные площади для постановки поисковых работ, повышать эффективность их проведения и достоверность оценки выявляемых объектов.

В качестве основных элементов прогнозно-поисковой модели в соответствии с принятыми методическими требованиями [7] автором определены поисковые критерии и признаки, сгруппированные в следующий ряд.

Формационные. Рудообразование в пределах Малоуральского ВПП тесно связано со становлением интрузивных массивов собского комплекса (D_{1-2}) габбро-диорит-тоналит-плагиогранитовой формации, образующей с базальт-андезитовой вулканогенно-терригенно-карбонатной формацией (S_2-D_1) продуктивную ВПА рассматриваемого ВПП. Породы ВПА в свою очередь являются и основными рудовме-

Рис. 1. Схема расположения перспективных площадей в пределах Малоуральского ВПП:

1 – осадочный чехол Западно-Сибирской плиты (MZ–KZ); интрузивные и стратифицированные комплексы Войкарской СФЗ: Малоуральской СФПЗ (2 – гранодиорит-гранитовый D_3 (янаслорский комплекс), 3 – терригенно-карбонатные (D_{2-3}), 4 – монцогаббро-монцодиоритовый (D_{2-3}) (конгорский комплекс), продуктивной ВПА Малоуральского ВПП (5 – а – габбро-диорит-тоналит-плагиогранитовый (D_{1-2}) (собский комплекс), б – то же – потенциально рудоносные гипабиссальные фации, 6 – базальт-андезибазальтовые вулканогенно-осадочные (S_2 – D_2) с рифогенными известняками в разрезе), 7 – базальтоидные и флишоидные (O_3 – S_1) основания ВПП) Райизско-Войкарской СФПЗ (8 – габбро-гипербазитовый (O_{2-3}) (кэршорский комплекс), 9 – гипербазитовый (O_{1-2}) (райизско-войкарский комплекс)), 10 – разновозрастные (R–C) сланцевые и вулканогенно-осадочные комплексы Зилаиро-Лемвинской СФЗ; 11 – метаморфические комплексы (PR–C) Харбейско-Марункеуской СФЗ; контуры золоторудных и потенциально-золоторудных районов (12) и уз-лов (13): Топугол-Ханмейшорский (I), Нижнехараматолоуский (II), Таньюско-Лагортинский (III); 14 – золоторудные месторождения с ведущей ролью золото-скарнового (а), золото-порфирирового и золото-сульфидно-кварцевого (б) типов оруденения; 15 – значимые рудопроявления золото-сульфидно-кварцевого (а), золото-скарнового (б), золото-медно-скарнового (с), молибден-медно-порфирирового (д) типов; цифрами отмечены месторождения и рудопроявления: 1 – Новогоднее-Монто, 2 – Петропавловское, 3 – 1-я Рудная Горка, 4 – Осеннее, 5 – 3-я Рудная Горка, 6 – Янаслоское, 7 – уч. 1-й Колчеданный, 8 – Полярная Надежда

Fig. 1. Schematic map showing distribution of promising areas within the Malyy Ural VPB:

1 – sedimentary cover of the West Siberian plate (MZ–KZ); 2–9 – intrusive and stratified sequences of the Voikar structural-formational zone (SFZ): 2–7 – of the Malyy Ural structural-formational subzone (SFSZ): 2 – granodiorite-granite D_3 (Yanaslor complex), 3 – terrigenous-carbonate D_{2-3} , 4 – monzogabbro-monzodiorite D_{2-3} (Kongor complex), 5, 6 – productive VPA of Malyy Ural volcano-plutonic belt (VPB): 5 – gabbro-diorite-tonalite-plagiogranite D_{1-2} (Sob' complex) (a – undivided, b – potentially ore-bearing hypabyssal facies), 6 – basalt-andesibasalt volcanosedimentary S_2 – D_2 , interbedded with reef limestones, 7 – basaltoid and flyschoid formations O_3 – S_1 of the VPB basement, 8, 9 – of the Rayiz-Voikar SFSZ: 8 – gabbro-ultrabasic O_{2-3} (Kershor complex), 9 – ultrabasic O_{1-2} (Rayiz-Voikar complex), 10 – schistose and volcanosedimentary sequences various in age (R–C) of the Zilair-Lemva SFZ; 11 – metamorphic sequences (PR–C) of the Kharbei-Marunkeu SFZ; contours of the gold-bearing and potentially gold-bearing ore districts (12) and clusters (13): (I) Toupugol-Khanmeishor, (II) Lower Kharamatolou, and (III) Tan'yu-Lagorta; 14 – lode gold deposits dominated by (a) skarn-related gold and (b) porphyry gold and gold-sulfide-quartz mineralization types; 15 – significant gold occurrences of the (a) gold-sulfide-quartz, (b) skarn-related gold, (c) gold-copper skarn, and (d) porphyry molybdenum-copper types; the figures indicate the gold deposits and occurrences: 1 – Novogodnee-Monto, 2 – Petropavlovskoe, 3 – 1st Rudnaya Gorka, 4 – Osennee, 5 – 3rd Rudnaya Gorka, 6 – Yanaslorskoe, 7 – 1st Kolchedannyi, 8 – Polyarnaya Nadezhda

щающими образованиями. Перекрывающими могут выступать образования трахиандезит-трахириолитовой (D_{1-2}) и терригенно-карбонатной (D_{2-3}) формаций, прорывающими – габбро-монцодиоритовой (D_{2-3}) и габбро-долеритовой (D_3 –Т), подстилающими – недифференцированной базальтовой (O_{2-3}) и флишоидной (O_3 – S_1). Наличие и масштабы проявленности тех или иных перечисленных образований в пределах прогнозных площадей могут указывать в том числе на степень эродированности продуктивных рудно-магматических систем.

Литолого-петрологические. Формирование золотого оруденения связано с этапом станов-

ления гипабиссальных фаз собского комплекса. Для рудных объектов характерно присутствие штоков и поясов даек диоритов, кварцевых диоритов и их порфирировых разностей, сопровождающих и контролирующих оруденение.

Структурные. В масштабе рудного узла данная группа критериев и признаков отражена интрузивно-купольным поднятием гранитоидов собского комплекса, осложнённым локальными тектоно-магматическими депрессиями, выполненными среднепалеозойскими вулканогенно-осадочными породами. Депрессии, в свою очередь, осложнены локальными плутогенными поднятиями, которые соот-

ветствуют золоторудным полям и выражены сериями штокообразных выступов гранитоидов, телами гипабиссальных пород порфировых фаз, а также разновозрастными пострудными интрузивными штоками и дайками. Золоторудные объекты располагаются в интенсивно тектонически дислоцированных экзоконтактовых и надынтрузивных частях локальных выступов гранитоидов, осложнённых апофизами, поясами разновозрастных даек, флексуорообразными складками, субвертикальными зонами трещиноватости и рассланцевания.

Метасоматические. Разнотипное золотое оруденение сопровождается полями гидротермальных изменений пород различной интенсивности – известковыми скарнами с магнетитовыми залежами, хлорит-альбитовыми и альбитовыми метасоматитами, зонами кварц-хлорит-кальцит-серицитовых метасоматитов (березитов) с кварцевыми прожилками и жилами.

Рудно-минералогические. Характерно пространственное сочетание в пределах единого месторождения в различных соотношениях нескольких структурно-вещественных типов золотого оруденения: «ранних» – золото-сульфидно-магнетитового в ассоциации со скарнами, золото-сульфидного штокверкового (порфирового) в хлорит-альбитовых метасоматитах и «позднего» – золото-сульфидно-кварцевого жильно-прожилкового в зонах березитов. Масштабы проявления названных типов на конкретных объектах обусловлены как особенностями геологического строения, так и закономерностями формирования золотого оруденения во времени. Так, в пределах месторождения Новогоднее-Монто (новогодненский тип золотого оруденения) на ранней стадии рудообразования сформированы золото-сульфидно-магнетитовые руды (золото-скарновый тип), возникновение которых обусловлено наличием карбонатных и карбонатсодержащих пород, вовлечённых в рудный процесс, на поздней стадии – зоны березитов с золото-сульфидно-кварцевыми рудами. В пределах месторождения Петропавловское (петропавловский тип) ранняя стадия рудообразования представлена прожилково-вкрапленными золото-сульфидными рудами в хлорит-альбитовых метасомати-

тах, образованными в связи с формированием порфировых интрузий (золото-порфировый тип), а поздняя стадия – также зонами березитов с минерализацией золото-сульфидно-кварцевого типа. Выделенные типы руд отличаются, в первую очередь, набором минеральных ассоциаций и условиями образования золотой минерализации [1]. Совмещение в пространстве «ранних» и «поздних» типов оруденения может обеспечить большую продуктивность золоторудных объектов, что обусловлено более длительным развитием рудного процесса. При этом оруденение «ранних» стадий для рассматриваемых месторождений является основным концентратором золота (до 80 % запасов). В масштабе рудного узла или района может быть проявлена пространственная ассоциация золоторудного и, как правило, непромышленного медно-порфирового оруденения, что характерно для комплексных рудных районов Урала, расположенных в пределах вулканоплутонических поясов (А. Н. Барышев и др., 1991 г.).

Минералогические и изотопно-геохимические критерии и признаки приведены по результатам исследований специалистов ФГБУ «ЦНИГРИ» при участии автора (А. Г. Волчков и др., 2008 г.), а также [1, 6].

Минералогические. Для золото-скарнового типа главные рудные минералы – магнетит, пирит, кобальтин и халькопирит, редкие – гематит, пирротин, арсенопирит, сфалерит, марказит. Содержание сульфидов в рудах меняется от 5–10 до 80–90 %. Золото свободное, представлено двумя разновидностями – относительно низкопробным (760–880 ‰), ассоциирующим с халькопиритом, пиритом и жильными минералами, и высокопробным (900–990 ‰), присутствующим преимущественно в кобальтине и магнетите.

Для золото-порфирового типа руд главным рудным минералом и основным носителем золота является пирит. Содержание пирита – от первых процентов до 15–20, реже до 50 %. Помимо пирита присутствуют магнетит (~1 %), халькопирит, пирротин. Золотоносность данного типа руд определяется количеством пиритовой минерализации. Пробность золота достаточно высокая – 830–870 ‰.



Доля сульфидов в золото-сульфидно-кварцевых рудах зон березитов составляет не более 10 % (на Петропавловском месторождении – 1–1,5 %). Главный рудный минерал – пирит, достаточно характерен для руд галенит, встречаются сфалерит, гематит, арсенопирит. Для месторождения Петропавловское характерен халькопирит. Самородное золото локализовано в пирите, галените, редко в халькопирите и жильных минералах, относительно низкопробное (730–800 ‰) с существенной примесью серебра. В составе этого типа руд отмечена также золото-теллуридная минеральная ассоциация, проявленная в аномально обогащённых золотом (до первых сотен г/т) участках кварцевых жил и прожилках. В ней наряду с типовыми рудными минералами березитов – пиритом и галенитом – проявлены алтаит, петцит и гессит. Пробность золота данной ассоциации колеблется в пределах 830–870 ‰. Стволовая мощность таких богатых участков составляет 1–2 м, реже 3–5 м, масштабы распространения их и доля в балансе месторождений не определены.

Изотопно-геохимические. Сульфидам «ранних» типов золотых руд свойственны положительные значения $\delta^{34}\text{S}$, золотоносный пирит «поздних» зон березитов заметно обогащён лёгким изотопом серы, а пирит золото-теллуридной минеральной ассоциации имеет аномально отрицательные значения $\delta^{34}\text{S}$ (от -2,5 до -4,5 ‰).

Магнетит золотосодержащих объектов (проанализирован магнетит месторождения Новогоднее-Монто, скарновых проявлений Тоупугол-Ханмейшорского рудного узла и ряда проявлений более южных районов Малоуральского ВПП) характеризуется интервалом $\delta^{18}\text{O}$ от -1,4 до -7 ‰, магнетит непродуктивных залежей – резко пониженными значениями $\delta^{18}\text{O}$.

Морфологические. Рудные тела представлены субпластовыми сульфидно-магнетитовыми гнездо- и пластообразными залежами в скарнированной вулканогенно-карбонатной толще, крупнообъёмными линейно-изометрическими штокверкоподобными телами сульфидной (преимущественно пиритовой) минерализации в эндо-экзоконтактах порфировых

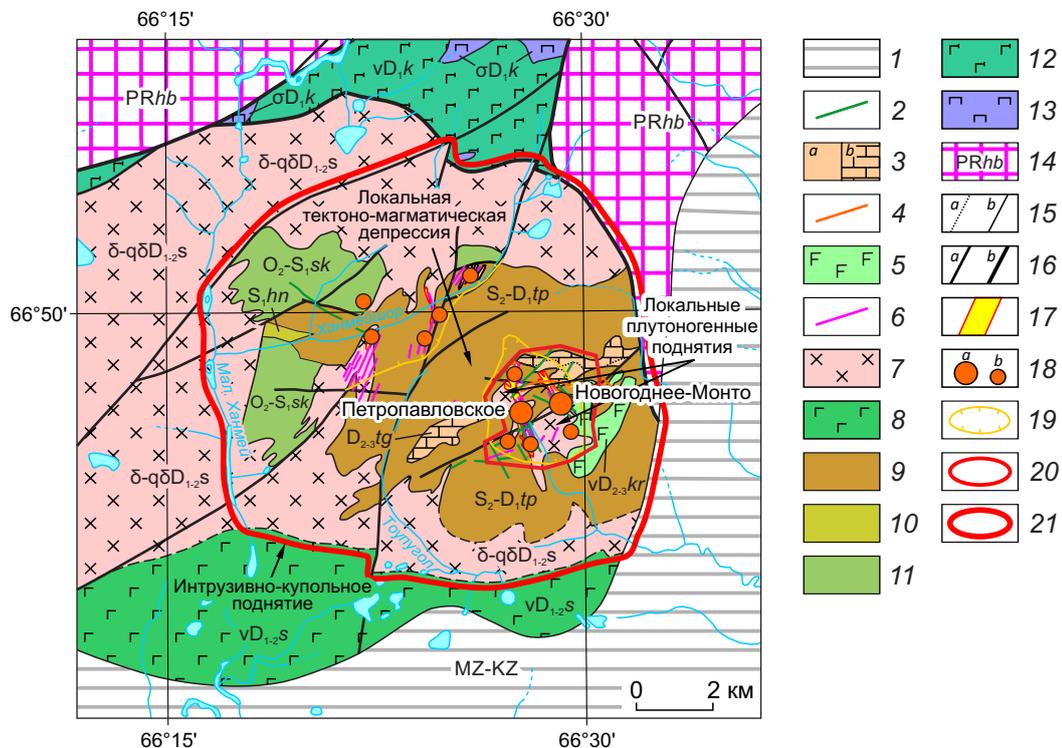
интрузий, крутопадающими жильно-прожилковыми сульфидно-кварцевыми зонами с осевыми золотоносными малосульфидными кварцевыми жилами.

Геохимические. Рудные поля выражены крупными слабоконтрастными комплексными геохимическими аномалиями Au (2–300 мг/т) и его спутников – Cu (50–100 г/т), Mo (1500–4000 г/т), Ag (60–1000 мг/т), Hg (40–97 г/т), а также As, B, Pb, W, Ba во вторичных ореолах рассеяния (по данным геохимических работ ИМГРЭ, Н. А. Юшко и др., 2007 г.). Максимумы концентраций Au, Ag и Cu фиксируют близповерхностное золотое оруденение, зональные ореолы Cu и Mo – выступы интрузивных массивов, проявления медно-порфировой минерализации. Для оруденения петропавловского типа, в меньшей мере для золото-сульфидно-кварцевого оруденения месторождения Новогоднее-Монто характерны локальные ореолы ртути. Россыпи и шлиховые потоки золота проявлены незначительно.

Геофизические. Контрастные локальные положительные аномалии магнитного поля (> 500–1000 нТл) соответствуют скарново-магнетитовым телам. Минимумы магнитного поля (< 0 нТл) отвечают зонам потенциально золотоносных березитов. Аномалии дифференциальной поляризуемости (1,5–3 %) отчётливо отражают зоны сульфидной минерализации всех трёх структурно-вещественных типов золотого оруденения (по данным геофизических работ АО «СУГРЭ», М. К. Ястребов и др., 2008 г.).

Визуально элементы разработанной модели, выраженные в масштабе рудного узла, наиболее наглядно отражаются на геологической карте (рис. 2), а в масштабе рудного поля и золоторудных объектов новогодненского и петропавловского типов – на сводном геологическом разрезе с комплексной рудно-метасоматической, геохимической и геофизической нагрузкой (рис. 3).

На основе совокупности элементов разработанной прогнозно-поисковой модели автором проанализирован и обобщён большой объём информации, полученной за достаточно длительную историю изучения площадей, расположенных в пределах Малоуральского ВПП.



Использованы материалы съёмочных и поисковых работ разных лет, в том числе последних исследований ООО «Ямалгео», ОАО «ПУГТП», ОАО «ЯГК», ИМГРЭ 2000–2010-х гг., а также составленные при участии автора прогнозно-металлогенические карты различных масштабов (П. Г. Кучеревский и др., 2002 г.; Н. М. Риндзюнская и др., 2004 г.; А. Г. Волчков и др., 2007 г.). В результате в качестве наиболее перспективной площади для выявления новых промышленных золоторудных объектов автором определён Таныуско-Лагортинский молибден-медно-золоторудный район (1140 км²) южной части ВПП с характерным для рудных районов и узлов восточной части Урала (Ауэрбаховский, Варваринский и др.) комплексным золотым и медным оруденением различных рудно-формационных типов.

Детальный металлогенический анализ Таныуско-Лагортинского рудного района позволяет оконтурить в его пределах пять площадей в ранге потенциальных рудных узлов (ПРУ) (рис. 4): Элькошорский – специализированный на оруденение (молибден)-медно-порфирового

(рудопроявление Осеннее) и золото-медно-железо-скарнового (рудопроявление 3-я Рудная Горка) типов; Янаслорский – специализированный на оруденение медно-молибден-порфирового типа (рудопроявление Янаслорское); Манюкуюский – с известными проявлениями золото-сульфидно-кварцевого линейно-штокерного типа (участки-рудопоявления Полярная Надежда, 1-й Колчеданный, Геохимическое и др.) и с перспективами выявления сопряжённой минерализации золото-порфирового и золото-скарнового типов; Погурейский и Кокпельский (практически не изучены в поисковом отношении) – по геологическому строению и ряду установленных при предшествующих ГРП признаков, отвечающих разработанной модели, сходны с Манюкуюским ПРУ и обладают перспективами на дальнейшее обнаружение золотого оруденения рассматриваемых в данной статье структурно-вещественных типов.

Ранее проведённые поисковые работы на медно-порфировое оруденение в пределах Элькошорского и Янаслорского ПРУ (П. М. Куче-



Рис. 2. Схематическая геологическая карта Топугол-Ханмейшорского рудного узла, отражающая элементы прогнозно-поисковой модели (составлена автором с использованием материалов ГДП-200 (А. П. Прямоносов и др., 2004 г.), поисковых и разведочных работ ОАО «ЯГК» и ОАО «Ямалзолото», тематических работ ЦНИГРИ):

комплексы, перекрывающие и прорывающие ВПА Малоуральского ВПП: 1 – рыхлые мезозойские и кайнозойские отложения (MZ–KZ), 2 – малоханмейский габбродолеритовый комплекс ($D_3-T?mh$), дайки основного состава, 3 – топуголегартская толща ($D_{2-3}tg$) (*a* – вулканогенно-терригенные породы, *b* – рифогенные известняки), конгорский габбро-монцодиоритовый комплекс ($D_{2-3}kn$) (4 – монцодиориты и их порфировые разновидности, 5 – габбродолериты); продуктивная ВПА Малоуральского ВПП: собский габбро-диорит-тоналит-плагиогранитовый комплекс ($D_{1-2}s$), продуктивный на золото-сульфидно-кварцевое оруденение (6 – диорит-порфиры, кварцевые диорит-порфиры, тоналит-порфиры, плагиогранит-порфиры, 7 – диориты, кварцевые диориты, тоналиты ($\delta-q\delta$), 8 – габбро, габбродиориты (v)), 9 – топугольская толща (S_2-D_1tp), лавы и туфы базальтов, андезитбазальтов, вулканогенно-осадочные породы, рифогенные известняки; комплексы основания и рамы Малоуральского ВПП: 10 – ханмейшорская толща (S_1hs), флишшюиды, 11 – соколинская толща (O_3-S_1sk), лавы толеитовых базальтов, кэршорский гипербазит-габбровый комплекс (O_{2-3}) (12 – габброиды (v), 13 – гипербазиты (σ), 14 – харбейский метаморфический комплекс (PRhb), высокометаморфизованные породы; 15 – геологические границы (*a* – разновозрастных подразделений, *b* – фациальные); 16 – разрывные нарушения (*a* – главные (составляющие Главного Уральского глубинного разлома), *b* – прочие); 17 – зоны хлорит-альбит-серцит-кварцевых метасоматитов с сульфидной минерализацией; 18 – золоторудные объекты (*a* – месторождения, *b* – рудопроявления); 19 – Au + Ag + Cu + Hg комплексные геохимические ореолы (ВОР); 20 – контур Новогодненского рудного поля; 21 – контур Топугол-Ханмейшорского рудного узла

Fig. 2. Schematic geological map of the Toupugol-Khanmeishor ore cluster, highlighting elements of the forecast-exploration model (compiled by the author using materials of GDP-200 (A. P. Pryamonosov et al., 2004), prospecting and exploration works by OJSC YaGK and OJSC Yamalzoloto, thematic works by TsNIGRI):

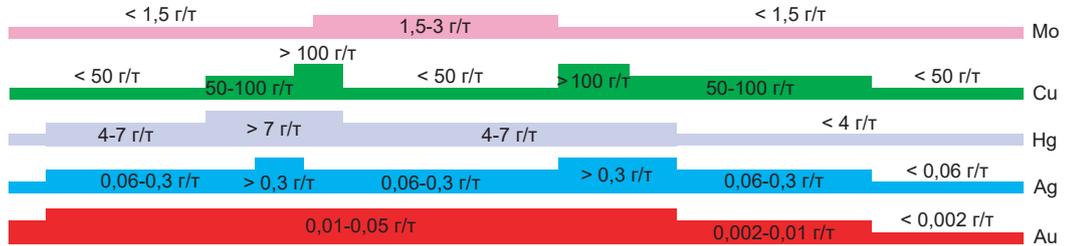
1–5 – rock complexes overlying and cutting the volcano-plutonic association (VPA) of the Malyi Ural VPB: 1 – loose Mesozoic and Cenozoic sediments (MZ–KZ), 2 – Malyi Khanmei gabbro-dolerite complex ($D_3-T?mh$), basic dikes, 3 – Toupugolegart sequence ($D_{2-3}tg$): *a* – volcanogenic-terrigenous rocks, *b* – reef limestones; 4, 5 – Kongor gabbro-monzodiorite complex ($D_{2-3}kn$): 4 – monzodiorites and their porphyritic varieties, 5 – gabbro-dolerites; 6–10 – productive VPA of the Malyi Ural VPB: Sob' gabbro-diorite-tonalite-plagiogranite complex ($D_{1-2}s$) productive for sulfide-quartz mineralization (6 – diorite porphyrites, quartz diorite porphyrites, tonalite porphyries, plagiogranite porphyries, 7 – diorites, quartz diorites, tonalities ($\delta-q\delta$), 8 – gabbro, gabbro-diorites (v)), 9 – Toupugol sequence (S_2-D_1tp): basaltic, andesibasaltic lavas and tuffs, volcanosedimentary rocks, reef limestones; 10–14 – complexes of the Malyi Ural VPB basement and frame: 10 – Khanmeishor sequence (S_1hs), flyschoids, 11 – Sokolinyi sequence, tholeiite basalt lavas, 12, 13 – Kershor gabbro-ultrabasic complex (O_{2-3}) (12 – gabbroids (v), 13 – ultrabasic rocks (σ), 14 – Kharbei metamorphic complex (PRhb), high-grade metamorphosed rocks; 15 – geological boundaries: *a* – geological units, *b* – facial; 16 – faults: *a* – major (constituents of the Main Ural Deep-seated Fault), *b* – other; 17 – zones of chlorite-albite-sericite-quartz metasomatites containing sulfide mineralization; 18 – gold objects: *a* – economic-grade deposits, *b* – occurrences; 19 – Au + Ag + Cu + Hg complex secondary dispersion halos (SDH); 20 – contour of the Novogodnee ore field; 21 – contour of the Toupugol-Khanmeishor ore cluster

рина и др., 1991 г., В. С. Звездов и др., 2010 г., А. А. Шлома и др., 2011 г.) до настоящего времени не позволили выявить промышленно значимых медно- и молибден-медно-порфировых руд. Несмотря на то, что перспективы для последующего выявления промышленных месторождений медно-порфирового семейства со-

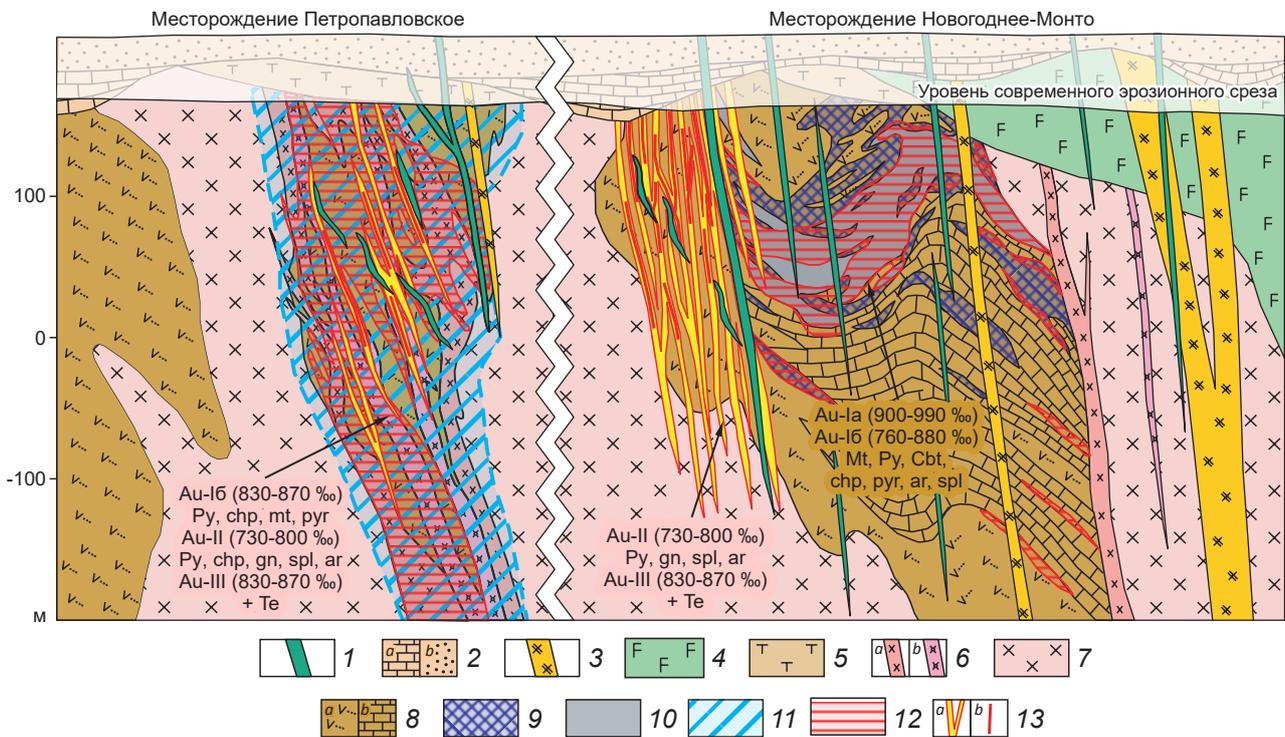
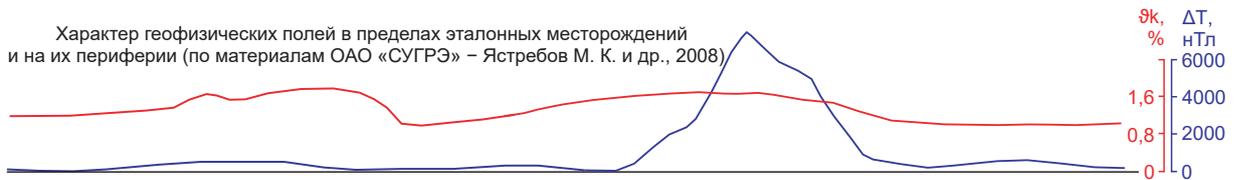
храняются, сейчас в качестве первоочерёдных объектов постановки новых поисковых работ данные площади не рассматриваются.

По-другому выглядит ситуация с перспективами на выявление в пределах Таньюско-Лагортинского рудного района месторождений структурно-вещественных типов золото-

Характер распределения основных элементов-индикаторов во вторичных ореолах рассеяния
(по материалам ИМГРЭ – Юшко Н. А. и др., 2007)



Характер геофизических полей в пределах эталонных месторождений
и на их периферии (по материалам ОАО «СУГРЭ» – Ястребов М. К. и др., 2008)



сульфидно-кварцевой формации, характерных для эталонного Тоупугол-Ханмейшорского рудного узла. По совокупности геолого-поисковых признаков, отвечающих разработанной прогнозно-поисковой модели, как наиболее перспективные рассматриваются Манюкуюский и Кокпельский ПРУ (см. рис. 4). Площади этих узлов отличаются благоприятным умеренным эрозионным срезом, о чём говорит сохранность вулканогенно-осадочной составляющей про-

дуктивной ВПА (основные рудовмещающие образования в пределах эталонной площади); наличием тел потенциально-продуктивных порфирировых фаз собского интрузивного комплекса (диорит- и кварцевые диорит-порфириды), зон метасоматитов хлорит-альбит-серцит-кварцевого состава с сульфидной (существенно пиритовой) минерализацией, комплексных геохимических ореолов Cu + Mo и Au + Ag + As, дифференцированного магнитного поля, ха-

Рис. 3. Сводный геологический разрез месторождений Новогоднее-Монто и Петропавловское, отражающий элементы прогнозно-поисковой модели:

1 – малоханмейский габбро-долеритовый комплекс ($D_3-T?mh$), дайки основного состава; 2 – тоупуголе-гартская толща ($D_{2-3}tg$) (*a* – известняки рифогенные, *b* – вулканогенно-терригенные породы); конгорский габбро-монцодиоритовый комплекс ($D_{2-3}kn$) (3 – монцодиориты и их порфировые разновидности, 4 – габбро-долериты); 5 – кевсоимская толща ($D_{1-2}kv$), лавы и туфы трахибазальтов, трахиандезитов, трахириолитов (эродирована в пределах узла); собский габбро-диорит-тоналит-плагиогранитовый комплекс ($D_{1-2}s$): (6 – *a* – диорит-порфириды, кварцевые диорит-порфириды, *b* – тоналит-порфиры, плагиогранит-порфиры, 7 – диориты, кварцевые диориты, тоналиты); 8 – тоупугольская толща (S_2-D_1tp) (*a* – лавы и туфы базальтов, андезибазальтов, вулканогенно-осадочные породы, *b* – рифогенные известняки); 9 – гранат-пироксеновые скарны; 10 – магнетитовые тела; 11 – хлорит-альбитовые метасоматиты; 12 – минерализованные зоны золото-скарнового и золото-порфирового типов, оконтуренные по бортовому содержанию Au 0,3 г/т; 13 – зоны березитов с минерализацией золото-сульфидно-кварцевого типа (*a*), осевые золотоносные малосульфидные кварцевые жилы (*b*)

Fig. 3. Generalized geological section of the Novogodnee-Monto and Petropavlovskoye ore deposits, highlighting elements of the forecast-exploration model:

1 – Malyi Khanmei gabbro-dolerite complex ($D_3-T?mh$), basic dikes; 2 – Toupugolegart sequence ($D_{2-3}tg$) (*a* – reef limestones, *b* – volcanogenic-terrigenous rocks); Kongor gabbro-monzodiorite complex ($D_{2-3}kn$) (3 – monzodiorites and their porphyritic varieties, 4 – gabbro-dolerites); 5 – Kevsoim sequence ($D_{1-2}kv$), trachybasalt, trachyandesite, trachyrhyolite lavas and tuffs (eroded within the cluster); Sob' gabbro-diorite-tonalite-plagiogranite complex ($D_{1-2}s$) (6 – *a* – diorite-porphyrates, quartz diorite-porphyrates; *b* – tonalite-porphyrates, plagiogranite-porphyrates, 7 – diorites, quartz diorites, tonalities); 8 – Toupugol sequence (S_2-D_1tp) (*a* – basalt, andesibasalt lavas and tuffs, volcanosedimentary rocks, *b* – reef limestones); 9 – garnet-pyroxene skarns; 10 – magnetite bodies; 11 – chlorite-albite metasomatites; 12 – mineralized zones of the skarn-related gold and porphyry gold types, outlined by the Au cutoff grade of 0.3 g/t; 13 – berezite zones (*a* – sections with gold-sulfide-quartz type mineralization, *b* – axial low-sulfide quartz gold-bearing veins)

рактир которого указывает на возможность обнаружения как новых минерализованных зон золото-сульфидной прожилково-вкрапленной минерализации, так и золотоносных скарново-магнетитовых тел.

Первостепенны для опоискования на золото в пределах указанных ПРУ участки развития зон линейных и площадных метасоматитов хлорит-альбит-серицит-кварцевого состава с прожилково-вкрапленной сульфидной минерализацией, получившие при геологосъёмочных и поисковых работах 1960-х годов (Б. Ф. Костюк и др., 1964 г.; Н. И. Литовченко и др., 1964 г.; Б. М. Овчинников и др., 1964 г.) название «колчеданные», так как изначально изучались на предмет выявления медно-колчеданного оруденения. Информация о потенциальной золотоносности этих участков появилась в конце 1980-х годов при проведении

ГДП-50 (П. А. Шапорев и др., 1986 г.; П. М. Кучерина и др., 1991 г.). Однако специализированные работы на золото с применением горных выработок и бурения в пределах таких участков выполнялись в небольших объёмах только в период 2000-х – начала 2010-х годов (А. Е. Степанов и др., 2007 г.; И. З. Галиуллин и др., 2009 г., Р. А. Терентьев и др., 2009 г., 2012 г.; А. А. Шлома и др., 2011 г.).

Манюкуюский ПРУ – 160 км² (рис. 5, *a*). При проведении ГДП-50 и позднее в ходе поисково-ревизионных работ ЦНИГРИ с участием автора (Н. М. Риндзюнская и др., 2004 г.) в пределах Манюкуюского ПРУ установлены повышенные содержания золота в штучных пробах и потоках рассеяния; далее ОАО «ПУГГП» (И. З. Галиуллин и др., 2009 г.), а затем ИМРГЭ (Р. А. Терентьев и др., 2009 г.) выявлены геохимические аномалии золота и рудные пересече-

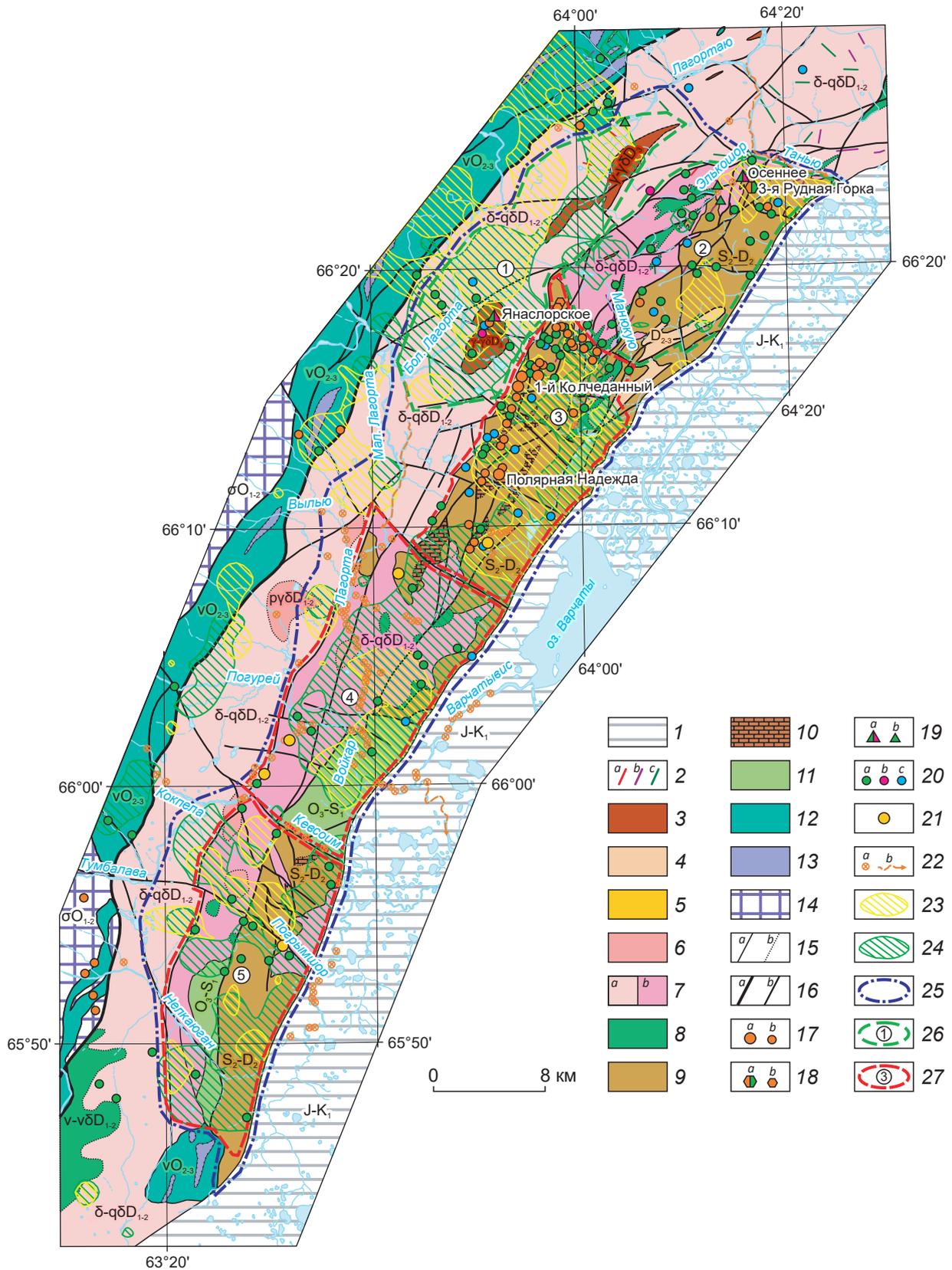


Рис. 4. Геологическая карта Таньюско-Лагортинского рудного района с элементами прогноза золото-сульфидно-кварцевого и молибден-медно-порфирового оруденения (составлена автором с использованием материалов ГГК-200, листы Q-41-XVI, XVII, XXI–XXII (ВСЕГЕИ, 2009-2014 г.) и прогнозно-металлогенической карты ООО «Ямалгео» (А. Е. Степанов и др., 2011 гг.):

комплексы, перекрывающие и прорывающие ВПА Малоуральского ВПП: 1 – осадочный чехол Западно-Сибирской плиты (J–K₁), 2 – дайки нерасчленённые (a – кислого, b – среднего, c – основного составов), 3 – Янаслорский гранитовый комплекс (γ-γδD₃) (граниты, гранодиориты, потенциально продуктивен на медно-молибден-порфировое оруденение), 4 – дзеля-варчатинская свита (D₂₋₃) (вулканогенно-терригенные породы, известняки (аналог тоупуголегартской толщи эталонного рудного узла)), 5 – конгорский монцогаббро-монцодиоритовый комплекс (μδD₂₋₃), штоки монцодиоритов; продуктивная ВПА Малоуральского ВПП: собский габбро-диорит-тоналит-плагиогранитовый комплекс (D₁₋₂), продуктивный на золото-сульфидно-кварцевое и молибден-медно-порфировое оруденение (6 – плагиограниты, тоналиты (pγδ), 7 – диориты, кварцевые диориты (δ-qδ) (a), то же, потенциально рудоносные гипабиссальные фации (b), 8 – габбро, габбро-диориты (v-vδ)), 9 – малоуральская свита (S₂–D₂) (верхняя подсвита – лавы и туфы трахибазальтов, трахиандезитов, трахидацитов (аналог кевсоимской толщи), нижняя подсвита – лавы и туфы базальтов, андезибазальтов, вулканогенно-осадочные породы (аналог тоупугольской толщи) – основные стратифицированные образования вмещающие золото-сульфидно-кварцевое оруденение), 10 – рифогенные известняки; комплексы основания и рамы Малоуральского ВПП: 11 – войкарская свита (O₃–S₁), базальты, яшмоиды (аналог соколинской толщи), кэршорский гипербазит-габбровый комплекс (O₂₋₃) (12 – габброиды (v), 13 – гипербазиты (vσ)), 14 – райизско-войкарский гипербазитовый комплекс (σO₁₋₂); 15 – геологические границы: a – разновозрастных подразделений, b – фациальные; 16 – разрывные нарушения: a – главные (Хулгинско-Пятиреченский глубинный разлом), b – прочие разломы; 17 – золото-сульфидно-кварцевый тип: a – рудопроявления, b – пункты минерализации; 18 – (медно)-золото-магнетитовый тип в скарнах: a – рудопроявления, b – пункты минерализации; 19 – молибден-медно-порфировый тип: a – рудопроявления, b – пункты минерализации; 20 – прочие пункты минерализации: a – меди, b – молибдена, c – полиметаллов; 21 – проявления интенсивной сульфидной минерализации, ранее не опробованные на золото; 22 – проявления россыпного золота: a – отдельные шлиховые и шлихогеохимические пробы, b – потоки рассеяния; 23 – геохимические поля Au + Ag + As с коэффициентом концентрации > 5; 24 – геохимические поля Cu + Mo с коэффициентом концентрации > 3; 25 – контур Таньюско-Лагортинского рудного района; контуры потенциальных рудных узлов: 26 – специализированных на молибден-медно-порфировое оруденение: Янаслорский (1), Элькошорский (2), 27 – специализированных на золото-сульфидно-кварцевое оруденение: Манюкуюский (3), Кевсоимский (4), Кокпельский (5)

Fig. 4. Geological map of the Tan'yu-Lagorta ore district with a preliminary forecast for the gold-sulfide-quartz and porphyry molybdenum-copper mineralization (compiled by the author using materials of SGM-200, sheets Q-41-XVI, XVII, XXI–XXII (VSEGEI, 2009–2014) and forecast-metallogenic map by OJSC Yamalgeo (A. E. Stepanov et al., 2011)):

1–5 – complexes overlying and cutting the VPA of the Malyi Ural VPB: 1 – sedimentary cover of the West Siberian plate (J–K₁), 2 – undifferentiated dikes: a – silicic, b – intermediate, c – basic, 3 – Yanaslor granite complex (γ-γδD₃): granites, granodiorites potentially productive for porphyry copper-molybdenum mineralization, 4 – Dzeilya-Varchato formation (D₂₋₃): volcanogenic-terrigenous rocks, limestones (equivalent of the Toupugolegart sequence of the reference Toupugol-Novogodnee ore cluster), 5 – Kongor monzogabbro-monzodiorite complex (μδD₂₋₃), monzodiorite stocks; 6–10 – productive VPA of the Malyi Ural VPB: 6–8 – Sob' gabbro-diorite-tonalite-plagiogranite complex (D₁₋₂) productive for the gold-sulfide-quartz and porphyry molybdenum-copper mineralization: 6 – plagiogranites, tonalites (pγδ), 7 – diorites, quartz diorites (δ-qδ): (a) undivided, (b) potentially ore-bearing hypabyssal facies, 8 – gabbro, gabbro-diorites (v-vδ); 9 – Malyi Ural formation (S₂–D₂), upper subformation – trachybasalt, trachyandesite lavas and tuffs (equivalent of the Kevsoim sequence), lower subformation – basalt, andesibasalt lavas and tuffs, volcanosedimentary rocks (equivalent of the Toupugol sequence), the principal stratified units hosting the gold-sulfide-quartz mineralization, 10 – reef limestones; 11–14 – basement and frame complexes of the Malyi Ural VPB: 11 – Voikar formation (O₃–S₁): basalts, jasperoids (equivalent of the Sokolinyi sequence);

Kershor gabbro-ultrabasic complex (O_{2-3}): 12 – gabbroids (v), 13 – ultrabasites (vo); 14 – Rayiz-Voikar ultrabasic complex (σO_{1-2}); 15 – geological boundaries: a – geological units, b – facial; 16 – faults: a – major (Khulga-Pyatirechie deep fault), b – other faults; 17 – gold-sulfide-quartz type mineralization: (a) ore occurrences, (b) mineral indications, 18 – (copper)-gold-magnetite type mineralization in skarns: (a) ore occurrences, (b) mineral indications; 19 – porphyry molybdenum-copper type mineralization: (a) ore occurrences, (b) mineral indications; 20 – other mineral indications: (a) copper, (b) molybdenum, (c) lead and zinc; 21 – zones of intense sulfide mineralization, that were not previously sampled for gold; 22 – placer gold occurrences: (a) individual heavy-mineral concentrate (HMC) and geochemical HMC samples, (b) – dispersion flows; 23 – geochemical fields (Au + Ag + As) with the concentration ratio > 5; 24 – geochemical fields (Cu + Mo) with the concentration ratio > 3; 25 – contour of the Tan'yu-Lagorta ore district; contours of potential ore clusters: 26 – specialized for porphyry molybdenum-copper mineralization: (1) Yanaslor and (2) Elkoshor, 27 – specialized for gold-sulfide-quartz mineralization: (3) Manyukuyu, (4) Kevsoim, (5) Kokpela

ния в пределах участков 1-й Колчеданный и Южный. В 2009–2012 гг. при продолжении поисково-ревизионных геолого-геохимических работ ИМГРЭ (Р. А. Терентьев и др., 2012 г.) проведены горные работы и бурение в пределах трёх комплексных (Au, Ag, Cu, Mo, Pb, Zn и др.) геохимических аномалий и установлен ряд пересечений с повышенными содержаниями золота; выявленные золоторудные проявления названы Полярная Надежда (наиболее изученное в ходе этих работ), Геохимическое и Благодарное.

Итак, в пределах рассматриваемого ПРУ предшествующими работами выделен широкий комплекс поисковых критериев и признаков золото-сульфидно-кварцевого оруденения, отвечающий элементам разработанной прогнозно-поисковой модели, а самое главное, определены рудные пересечения с поверхности и на глубине с содержаниями золота, сопоставимыми с таковыми на эталонных месторождениях, что указывает на достаточно высокую перспективность узла для продолжения поисковых работ в целях выявления промышленных золоторудных объектов.

Рудопроявление Полярная Надежда на настоящий момент рассматривается как основной, наиболее перспективный объект Манюкюского ПРУ. Работами ИМГРЭ (Р. А. Терентьев и др., 2012 г.) на рудопроявлении канавами ручной проходки и скважинами в зонах (ореолах) распространения пиритовой минерализации в вулканогенных и вулканогенно-терригенных породах, тяготеющих к экзоконтактам дайкообразных тел диорит-порфиритов, обна-

ружено 14 рудных пересечений мощностью от 1,4 до 24 м с содержаниями Au от 1,0 до 5,93 г/т. Среднее прогнозируемое содержание Au по данным этих работ составило 2,44 г/т. Золоторудная минерализация сопровождается повышенными содержаниями Ag (0,5–15,6 г/т) и Hg.

Несмотря на полученные положительные результаты, в ходе этих работ изучена только небольшая часть рудопроявления (комплексного геохимического ореола). Это обстоятельство затруднило определение реальной морфологии, простирания и масштабов минерализованных метасоматических зон и рудных тел в их пределах. В то же время, эти данные позволили существенно уточнить основные критерии и признаки золотого оруденения Манюкюского ПРУ и повысили его перспективность на выявление промышленных золоторудных объектов.

Другие перспективные участки Манюкюского ПРУ к северу от рудопроявления Полярная Надежда изучены слабее и требуют проведения исследований, позволяющих установить или уточнить ряд признаков разработанной прогнозно-поисковой модели, в том числе определить масштабы развития метасоматических изменений и приуроченной к ним потенциально золотоносной сульфидной минерализации. К таким участкам относятся следующие: Геохимическое – подсечение в скважине интервала 7 м со средним содержанием Au 1,44 г/т; Благодарное – комплексная геохимическая аномалия в ВОР площадью 1,3 км², интервалы по поверхности мощностью от 3 до



9 м с содержаниями Au до 1,0–1,54 г/т; 1-й Колчеданный и Южный – рудные пересечения в канавах с содержаниями Au от десятых долей до 3,1 г/т на мощностях 1–3 м, наличие скарнов с содержаниями золота 0,2–0,4 г/т.

Наименее изучена южная часть Манюкююского узла, где поисковые работы практически не проводились. Лишь при ревизионных исследованиях ЦНИГРИ с участием автора (Н. М. Риндзюнская и др., 2004 г.) в ряде штучных проб, отобранных из элювиально-делювиальных развалов минерализованных метасоматитов, схожих с метасоматическими образованиями основных перспективных участков, выявлены повышенные содержания Au от 0,12 до 0,92 г/т. Данные факты могут указывать на наличие потенциального оруденения и в этой части Манюкююского ПРУ.

Учитывая широкое распространение в пределах Манюкююского ПРУ элементов-признаков, отвечающих разработанной прогнозно-поисковой модели, данный узел весьма близок к эталонному Тоупугол-Ханмейшорскому рудному узлу с золоторудными месторождениями Петропавловское и Новогоднее-Монто. Ниже приведены основные из этих элементов:

- формационные – рудоносная габбро-диорит-тоналит-плаггиогранитовая (D_{1-2}) интрузивная формация (собский комплекс), образующая продуктивную ВПА с базальт-андезитовой вулканогенно-терригенной формацией (S_2-D_1);

- литолого-петрологические – штоки и пояса даек диоритов, кварцевых диоритов и их порфириковых разновидностей;

- структурные – интенсивно тектонически дислоцированная экзоконтактовая область массива гранитоидов собского комплекса, осложнённая выступами и апофизами; пояса разновозрастных даек пёстрого состава; субвертикальные зоны трещиноватости и расланцевания в вулканогенно-осадочных породах и на контактах даек пёстрого состава;

- метасоматические – поля гидротермальных изменений пород различной интенсивности, отвечающих полно проявленным (в пределах рудоносных участков) хлорит-альбитовым и альбитовым метасоматитам с наложенными на них зонами кварц-хлорит-кальцит-серици-

товых метасоматитов (березитов) с кварцевыми прожилками и осевыми жилами; локально проявленные биметасоматические известковые скарны;

- рудно-минералогические – перспективные рудопроявления и пункты штокверковой, жильно-прожилковой и вкрапленной золотоносной и потенциально золотоносной сульфидной минерализации, сопровождающиеся широкими ореолами метасоматических изменений кварц-серицит-хлоритового и хлорит-альбитового составов, а также пункты минерализации меди, полиметаллов, тела магнетитовых и сульфидно-магнетитовых потенциально золотоносных руд в ассоциации со скарнами;

- геохимические – комплексные вторичные и первичные литохимические ореолы золота, серебра и их элементов спутников (меди, свинца, цинка и др.)

- геофизические – крупные вытянутые по простиранию метасоматических зон поля аномалий ВП; дифференцированное магнитное поле в пределах рудоносных и потенциально рудоносных участков.

С учётом степени изученности Манюкююского ПРУ в его пределах можно прогнозировать выявление золоторудных объектов, сопоставимых по масштабам с эталонными месторождениями Новогоднее-Монто и Петропавловское.

Кокпельский ПРУ – 190 км² (рис. 5, б). В поисковом отношении, в том числе на золото, степень изученности площади Кокпельского ПРУ существенно ниже по сравнению с Манюкююским ПРУ, также отмечается низкая детальность его геологической изученности. Практически единственными крупномасштабными геологическими работами в пределах узла являются работы ГСР-50 (Б. Ф. Костюк и др., 1964 г.), к тому же, охватывающие лишь её северную часть. В ходе них в пределах Кокпельского ПРУ выделены основные стратиграфические подразделения и крупные интрузивные тела, но в целом составленная геологическая карта достаточно примитивна и не содержит необходимых данных для достоверного прогнозирования какого-либо оруденения. В частности, не отражены потенциально рудоносные

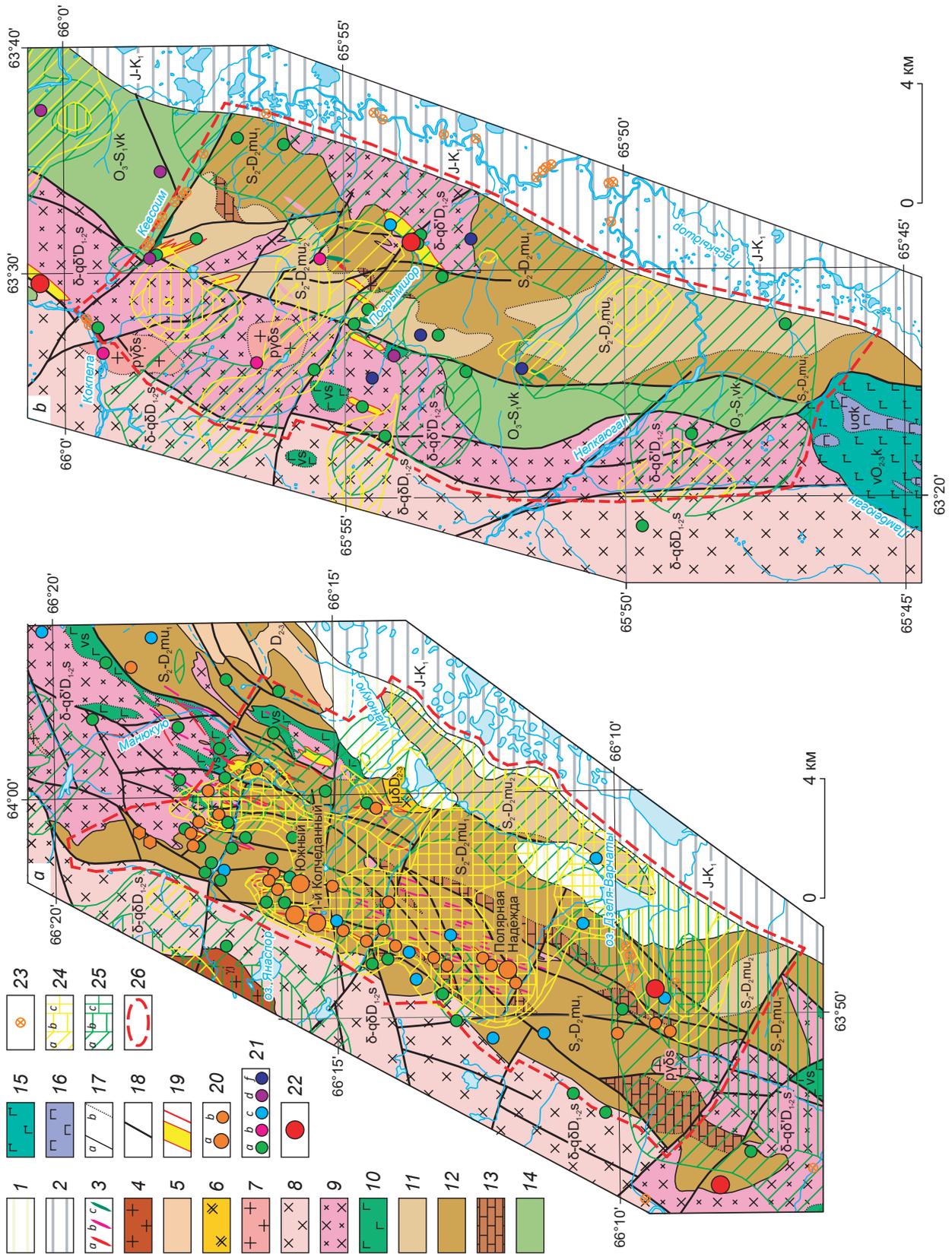




Рис. 5. Геологические карты Манюкюуского (а) и Кокпельского (b) прогнозируемых рудных узлов с элементами прогноза золото-сульфидно-кварцевого оруденения (составлены автором с использованием материалов геолого-съёмочных, поисковых и тематических работ: Б. Ф. Костюк и др., 1964 г.; Н. М. Риндзюнская и др., 2004 г.; А. Е. Степанов и др., 2007 г., 2013; И. З. Галиуллин и др., 2009 г.; Р. А. Терентьев и др., 2009 г., 2012 г.; А. А. Шлома и др., 2011 г.):

комплексы, перекрывающие и прорывающие ВПА Малоуральского ВПП: 1 – четвертичные отложения повышенной мощности, 2 – осадочный чехол Западно-Сибирской плиты (J–K₁), 3 – дайки нерасчленённые (а – кислого, b – среднего, c – основного составов), 4 – янаторский гранитовый комплекс (YD_{3,j}), 5 – дзеля-варчатинская свита (D₂₋₃); вулканогенно-терригенные породы, известняки, 6 – конгорский монзогаббро-монцодиоритовый комплекс (μD₂₋₃); продуктивная ВПА Малоуральского ВПП: собский габбродиорит-тоналит-плагиогранитовый комплекс (D_{1-2s}), продуктивный на золото-сульфидно-кварцевое и молибден-медно-порфировое оруденение (7 – плагиограниты, тоналиты (руδ), 8 – диориты, кварцевые диориты (δ-qb), 9 – то же, потенциально рудоносные гипабиссальные фации, 10 – габбро, габбродиориты (v-vδ)); малоуральская свита (I1 – верхняя подсвита (S₂-D₂mi₂), лавы и туфы трахибазальтов, трахиандезитов, трахидацитов, 12 – нижняя подсвита (S₂-D₂mi₁) – лавы и туфы базальтов, андезитобазальтов, вулканогенно-осадочные породы – основные стратегифицированные образования, вмещающие золото-сульфидно-кварцевое оруденение, 13 – рифогенные известняки); комплексы основания и рамы Малоуральского ВПП: 14 – войкарская свита (O₃-S₁), базальты, яшмоиды, кэршорский гипербазит-габбровый комплекс (O₂₋₃) (15 – габброиды (v), 16 – гипербазиты (vσ)); 17 – геологические границы (а – разновозрастных подразделений, b – фациальные); 18 – разрывные нарушения; 19 – потенциально-злогоносные зоны хлорит-серцит-кварцевых метасоматитов с пиритовой минерализацией (а – площадные, b – линейные); 20 – рудопроявления (а) и пункты минерализации золото-сульфидно-кварцевого типа (b); 21 – пункты минерализации: а – меди, b – молибдена, c – полиметаллов, d – кобальта, e – железа; 22 – проявления интенсивной сульфидной минерализации, ранее не опробованные на золото; 23 – проявления россыпного золота в шлиховых и шлихо-геохимических пробах; 24 – геохимические поля Au + Ag + As с коэффициентами концентрации: 5–6 (a), 6–8 (b), > 8 (c); 25 – геохимические поля Cu + Mo с коэффициентами концентрации: 3–5 (a), 5–8 (b), > 8 (c); 26 – контуры прогнозируемых золоторудных узлов

Fig. 5. Geological maps of the Manyukyu (a) and Kokpela (b) predicted ore clusters with a preliminary forecast for the gold-sulfide-quartz mineralization (compiled by the author using materials of geological surveys, prospecting and thematic works: B. F. Kostyuk et al., 1964; N. M. Rindzюнская et al., 2004; A. E. Stepanov et al., 2007, 2013; I. Z. Galullin et al., 2009, 2012; R. A. Terentiev et al., 2009, 2012; A. A. Shloma et al., 2011):

1–6 – complexes overlying and cutting the VPA of the Malyi Ural VPB: 1 – Quaternary deposits of high thickness, 2 – sedimentary cover of the West Siberian plate (J–K₁), 3 – undifferentiated dikes (a – silicic, b – intermediate, c – basic), 4 – Yanaslor granite complex (YD_{3,j}); 5 – Dzelya-Varcha to formation (D₂₋₃), volcanogenic-terriгенous rocks, limestones, 6 – Kongor monzogabbro-monzodiorite complex (μD₂₋₃); 7–14 – productive VPA of the Malyi Ural VPB: 7–10 – Sob' gabbro-diorite-tonalite-plagiogranite complex (D_{1-2s}) productive for gold-sulfide-quartz and porphyry molybdenum-copper mineralization: 7 – plagiogranites, tonalites (pyδ), 8, 9 – diorites, quartz diorites (δ-qb) (8 – undivided, 9 – potentially ore-bearing hypabyssal facies), 10 – gabbro, gabbro-diorites (v-vδ); 11, 12 – Malyi Ural formation: I1 – upper subformation (S₂-D₂mi₂): trachybasalt, trachyandesite, trachydacite lavas and tufts, 12 – lower subformation (mi₁) – basalt, andesibasalt lavas and tufts, volcanosedimentary rocks, the principal stratified units hosting gold-sulfide-quartz mineralization; 13 – reef limestones; basement and frame complexes of the Malyi Ural VPB: 14 – Voikar formation (O₃-S₁): basalts, jasperoids, 15, 16 – Kershor ultrabasic-gabbro complex (O₂₋₃) (15 – gabbroids (v), 16 – ultrabasites (vσ)); 17 – geological boundaries: (a) geological units, (b) facial; 18 – faults; 19 – potentially gold-bearing zones of chlorite-sericite-quartz metasomatites with pyrite mineralization: (a) – areal, (b) – linear; 20 – gold-sulfide-quartz-type mineralization: (a) ore occurrences and (b) mineral indications, 21 – mineral indications: (a) copper, (b) molybdenum, (c) cobalt, (d) iron; 22 – zones of intense sulfide mineralization, that were not previously sampled for gold; 23 – placer gold manifestations in heavy-mineral concentrate (HMC) and geochemical HMC samples; 24 – geochemical fields (Au + Ag + As) with the concentration ratios: (a) 5–6, (b) 6–8, (c) > 8; 25 – geochemical fields (Cu + Mo) with the concentration ratios: (a) 3–5, (b) 5–8, (c) > 8; 26 – contours of predicted ore clusters

малые интрузии и поля порфировых даек, ореолы метасоматических изменений и сульфидной минерализации, не оконтурены геохимические поля золота и элементов-спутников. В результате неравномерного сколового геохимического опробования выявлен ряд пунктов минерализации потенциальных спутников золота: около 10 пунктов с повышенными содержаниями меди, единичные пункты с повышенными содержаниями молибдена, свинца, цинка, серебра. Проявления кобальта и железа могут указывать на наличие потенциально золотоносной скарново-магнетитовой минерализации. Кроме того, установлено несколько протяжённых (до сотен и первых тысяч метров) зон сульфидной минерализации (не отражены на картах тех лет), которые вскрывались малометражными канавами с отбором единичных металлометрических проб на определение концентраций меди. На золото опробование не проводилось, однако оно отмечено в шлихах по некоторым водотокам.

В соответствии с изложенным результаты ГСР-50 не выявили комплекс критериев и признаков, достаточных для прогноза золото-сульфидно-кварцевого оруденения в пределах Кокпельского ПРУ. Вместе с тем, при последующих среднemasштабных тематических работах (А. Е. Степанов и др., 2011 г.) и подготовке ГГК-200 нового поколения (В. А. Расторгуев и др., 2012 г.) ряд таких критериев и признаков был установлен: отдельные порфировые интрузии, геохимические ореолы, отражающие не только прогнозируемую минерализацию золото-сульфидно-кварцевого типа – ореолы $Au + Ag + As$, но и ореолы $Cu + Mo$, которые могут отвечать проявлениям сопряжённой минерализации (молибден)-медно-порфирового типа. При этом часто наблюдается пространственное совмещение этих двух типов геохимических ореолов, что указывает на возможную комплексность оруденения и необходимость при поисковых работах на золото оценивать промышленную значимость сопутствующего медного оруденения.

Учитывая большое сходство Кокпельского ПРУ в геологическом строении с Манюкюским и присутствие метасоматических образо-

ваний с сульфидной минерализацией, аналогичных золотоносным метасоматитам более изученных площадей, перспективность Кокпельского ПРУ на выявление золото-сульфидно-кварцевого оруденения различных структурно-вещественных типов строится на аналогии геологической позиции и строения с более изученными Манюкюским и Тоупугол-Ханмейшорским узлами. Выявление прямых признаков золотого оруденения в пределах Кокпельского ПРУ предполагается в качестве основной задачи опережающих поисковых работ, и на их основе выделение и оконтуривания перспективных зон (участков) с золото-сульфидно-кварцевым и сопутствующим оруденением для заверки их горно-буровыми методами.

Погурейский ПРУ – 200 км² (см. рис. 4). Ещё одна площадь, в пределах которой предшествующими ГРР выявлен ряд признаков золотого оруденения, соответствующих разработанной геолого-поисковой модели, – Погурейский ПРУ, расположенный между Манюкюским и Кокпельским. Данный ПРУ приурочен к относительно поднятому тектоническому блоку, в строении которого участвуют преимущественно ордовикско-силурийские вулканогенные комплексы основания ВПП и интрузивы собского комплекса, что указывает на значительный эрозионный срез продуктивной ВПА. В связи с этим перспективы Погурейского ПРУ на выявление промышленного золотого оруденения меньше, чем в пределах Манюкюского и Кокпельского ПРУ, и данная площадь не рассматривается в качестве первоочередной в отношении постановки поисковых работ.

Завершая характеристику перспективных на выявление золотого оруденения площадей Таньюско-Лагортинского рудного района, следует отметить, что для успешного проведения дальнейших поисковых работ на изученных площадях необходимо установление или уточнение следующих поисковых признаков, соответствующих геолого-поисковой модели эталонных золоторудных объектов Тоупугол-Ханмейшорского рудного узла: проявлений вкрапленной и прожилково-вкрапленной золотоносной пиритовой минерализации; первичных и вторичных геохимических ореолов,



аномалий золота и элементов-спутников (Ag, Cu, Mo, Hg + As, Bi, Co, W, Pb, Zn, Ba); даек и малых интрузий порфировых диоритов и кварцевых диоритов; зон метасоматических изменений пород – альбитизации, окварцевания, серицитизации, пропицитизации, скарнирования; аномалий ВП, совпадающих с геохимическими аномалиями, – для руд в метасоматических зонах и аномалий магнитного поля, ВП и геохимических – для золото-магнетит-скарнового оруденения.

В практике поисковых работ на рассматриваемые типы золотого оруденения, проводимых в различных странах мира, в том числе в России и странах СНГ, успешно используется устоявшееся оптимальное сочетание методов: наземная электроразведка с определением проводимости и вызванной поляризации, магни-

тометрия (наземная или с применением современных малых летательных аппаратов), геохимические работы различных видов, а также геологическое картирование масштаба 1 : 25 000–1 : 10 000. Совмещение аномалий, обнаруженных этими методами, как правило, фиксирует участки развития золоторудной минерализации, масштабы и значение которой оцениваются традиционными горно-буровыми методами.

Результатом представленных в данной статье исследований и обобщений явились разработанные автором для рассматриваемых перспективных площадей обоснования постановки поисковых работ и включение этих площадей в «Пообъектный план (перечень объектов) геологоразведочных работ на твёрдые полезные ископаемые за счёт средств федерального бюджета на период до 2024 года».

Список литературы

1. Андреев А. В., Мансуров Р. Х. Типы руд золота и обстановки их нахождения на месторождениях Новогодненского рудного поля, Полярный Урал // Руды и металлы. – 2016. – № 3. – С. 23–38.
2. Беневольский Б. И., Волчков А. Г., Процкий А. Г. Перспективы создания сырьевой базы рудного золота в Полярноуральском регионе // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2004. – № 2. – С. 10–15.
3. Беневольский Б. И., Волчков А. Г., Риндзюнская Н. М., Процкий А. Г., Буляков Г. Х. Перспективы эндогенной и экзогенной золотоносности Полярного Урала // Труды II Полярно-Уральской научно-практической конференции. Тюмень – Салехард. – 2004. – С. 109–116.
4. Волчков А. Г., Гирфанов М. М., Новиков В. П. Перспективы развития минерально-сырьевой базы золота Полярного Урала (ЯНАО) // Проблемы освоения минерально-сырьевой базы твёрдых полезных ископаемых на Полярном Урале : сборник тезисов докладов конференции. – Салехард. – 2007. – С. 188–190.
5. Гирфанов М. М., Андреев А. В., Зеликсон Б. С., Мансуров Р. Х., Сапожников В. Г. Перспективы развития минерально-сырьевой базы золота Полярного Урала (ЯНАО) // Прогноз, поиски, оценка рудных и нерудных месторождений – достижения и перспективы : сборник тезисов докладов научно-практической конференции. – М. : ЦНИГРИ, 2008. – С. 55–56.
6. Двуреченская С. С., Кряжев С. Г., Андреев А. В. Условия формирования золото-скарнового месторождения Новогоднее-Монто по минералого-геохимическим данным // Роль минералогии в познании процессов рудообразования : материалы годичной сессии Московского отделения Российского минералогического общества, посвящённой 110-летию со дня рождения академика А. Г. Бетехтина (28–29 мая 2007 г.). – М., 2007. – С. 139–143.
7. Оценка прогнозных ресурсов алмазов, благородных и цветных металлов. Методическое руководство. Выпуск «Золото» / под ред. Б. И. Беневольского. – М. : ЦНИГРИ, 2002. – 182 с.

References

1. Andreev A. V., Mansurov R. Kh. Tipy rud zolota i obstanovki ikh nakhozhdeniya na mestorozhdeniyakh Novogodnenskogo rudnogo polya, Polyarnyi Ural [The types and geological settings of gold ore mineralization in the Novogodnoe ore field, Polar Urals], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2016, No 3, pp. 23–38. (In Russ.)
2. Benevol'skii B. I., Volchkov A. G., Protskii A. G. Perspektivy sozdaniya syr'evoi bazy rudnogo zolota v Polyarnoural'skom regione [Prospects for the creati-

- on of mineral resource base of ore gold in the Polar Urals region], *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [Mineral resources of Russia. Economics and Management], 2004, No 2, pp. 10–15. (In Russ.).
3. Benevol'skii B. I., Volchkov A. G., Rindzyunskaya N. M., Protskii A. G., Bulyakov G. Kh. Perspektivy endogennoi i ekzogennoi zolotonosnosti Polyarnogo Urala [Mineral resources of Russia. Economy and control of the endogenous and exogenous gold relations of the Polar Urals], *Trudy II Polyarno-Ural'skoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Tyumen' – Salekhard* [Proceedings of the II Polar-Ural Scientific and Practical Conference. Tyumen – Salekhard], 2004, pp. 109–116. (In Russ.).
 4. Volchkov A. G., Girfanov M. M., Novikov V. P. Perspektivy razvitiya mineral'no-syr'evoi bazy zolota Polyarnogo Urala (YaNAO) [Prospects for the development of the mineral resource base of the gold of the Polar Urals (YNAO)], *Problemy osvoeniya mineral'no-syr'evoi bazy tverdykh poleznykh iskopaemykh na Polyarnom Urale: sbornik tezisov dokladov konferentsii* [Problems of the development of the mineral resource base of solid minerals in the Polar Urals: Collection of Abstracts of the Conference Reports], Salekhard, 2007, pp. 188–190. (In Russ.).
 5. Girfanov M. M., Andreev A. V., Zelikson B. S., Mansurov R. Kh., Sapozhnikov V. G. Perspektivy razvitiya mineral'no-syr'evoi bazy zolota Polyarnogo Urala (YaNAO) [Prospects for the development of the mineral and resource base of the gold of the Polar Urals (YNAO)], *Prognoz, poiski, otsenka rudnykh i nerudnykh mestorozhdenii – dostizheniya i perspektivy: sbornik tezisov dokladov nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Forecast, searches, assessment of ore and non-metallic deposits – Achievements and prospects: Collection of Abstracts of the reports of the Scientific and Practical Conference], Moscow, TsNIGRI Publ., 2008, pp. 55–56. (In Russ.).
 6. Dvurechenskaya S. S., Kryazhev S. G., Andreev A. V. Usloviya formirovaniya zoloto-skarnovogo mestorozhdeniya Novogodnee-Monto po mineralo-geokhimicheskim dannym [Conditions for the formation of the gold-skarn deposit of Novogodnee Monto in mineral-geochemical data], *Rol' mineralogii v poznanii protsessov rudoobrazovaniya: materialy godichnoi sessii Moskovskogo otdeleniya Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva, posvyashchennoi 110-letiyu so dnya rozhdeniya akademika A. G. Betekhtina (28–29 maya 2007 g.)* [The role of mineralogy in the knowledge of the ore formation processes: materials of the annual session of the Moscow branch of the Russian mineralogical society dedicated to the 110th anniversary of the birth of Academician A. G. Betekhtin (May 28–29, 2007)], Moscow, 2007, pp. 139–143. (In Russ.).
 7. Otsenka prognoznnykh resursov almazov, blagorodnykh i tsvetnykh metallov. Metodicheskoe rukovodstvo. Vypusk “Zoloto” [Evaluation of the forecast resources of diamonds, noble and non-ferrous metals. Methodical manual. Issue “Gold”], Moscow, TsNIGRI Publ., 2002, 182 p.

Автор

Андреев Антон Вадимович

старший научный сотрудник
aandreev@tsnigri.ru

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

Author

Andreev Anton Vadimovich

Senior researcher
aandreev@tsnigri.ru

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



Алдано-Виллюйская рудно-россыпная золотоносная провинция (Россия)

Aldan-Vilyui ore-placer gold-bearing province, Russia

Молчанов А. В., Терехов А. В., Козлов Г. А.,
Лебедев И. О., Хорохорина Е. И., Гузев В. Е.

Molchanov A. V., Terekhov A. V., Kozlov G. A.,
Lebedev I. O., Horochorina E. I., Gusev V. E.

В рамках выполнения работ по созданию прогнозно-минерагенической карты территории Российской Федерации и её континентального шельфа масштаба 1 : 2 500 000, карты закономерностей размещения и прогноза золото-медно-порфировых месторождений, большеобъёмных черносланцевых и эпитеpмальных месторождений золота территории Российской Федерации масштаба 1 : 2 500 000, при анализе материалов комплектов госгеолкарт 1000/3 по территории Южной Якутии авторы настоящей статьи пришли к выводу о необходимости выделения на территории Российской Федерации, в бассейнах рек Лена, Алдан и Виллюй, новой рудно-россыпной золотоносной провинции – Алдано-Виллюйской, общей площадью 450 тыс. км². Металлогенический потенциал провинции оценивается авторами в 5 тыс. т золота, и в недалеком будущем она может стать новой масштабной ресурсной базой золота и сопутствующих элементов Российской Федерации.

Ключевые слова: прогнозно-минерагенический анализ, новая рудно-россыпная золотоносная провинция, Южная Якутия.

Analysis of materials of the State Geological Map 1 : 1 000 000 (3rd generation) for the southern Sakha-Yakutiya territory in the course of compilation of the Minerogenic forecast map of the Russian Federation and its continental shelf, 1 : 2 500 000, and of the Map of the distribution regularities and forecast for porphyry gold-copper, large-tonnage black-shale gold, and epithermal gold deposits of the Russian Federation, 1 : 2 500 000, has allowed the authors to substantiate distinguishing the new Aldan-Vilyui ore-placer gold-bearing province with a total area of 450 000 km² in the basins of the Lena, Aldan, and Vilyui rivers. The authors estimate the metallogenic potential of the province at 5000 t of gold. In the near future, this province may become a new extensive resource base of gold and related elements for the Russian Federation.

Keywords: Forecasting minerogenic analysis, new ore-placer gold-bearing province, Southern Yakutia.

Для цитирования: Молчанов А. В., Терехов А. В., Козлов Г. А., Лебедев И. О., Хорохорина Е. И., Гузев В. Е. Алдано-Виллюйская рудно-россыпная золотоносная провинция (Россия). Руды и металлы. 2021. № 2. С. 25–39. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10009.

For citation: Molchanov A. V., Terekhov A. V., Kozlov G. A., Lebedev I. O., Horochorina E. I., Gusev V. E. Aldan-Vilyui ore-placer gold-bearing province, Russia. Ores and metals, 2021, № 2, pp. 25–39. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10009.

Введение. Первые работы по определению золотоносности бассейнов рек Лена, Алдан, Вилюй и других были проведены в середине 19 века начиная с 1860 г. В это время выполнялась отработка галечных отложений ключа Кемюстээх, а в 1870 г. на реке Сасаабын уже работала шахта по добыче мелкого золота. До 1917 г. в бассейне р. Вилюй Ленским товариществом было застолблено более 400 площадей под добычу россыпного золота.

В советское время в бассейне р. Тонгуо действовало небольшое горное предприятие треста «Якутзолото», подтвердившее золотоносность старательских участков по рекам Табасында, Логлоор, Далыгыр и Тонгуочаан. Аллювиальные отложения имели здесь знаковую золотоносность, но в отдельных пунктах содержания золота достигали 1,95–1,8 г/м³. При этом было установлено, что характерной чертой аллювия древних долин рек Тонгуо и Чыбыда является значительная крупность обломочного материала, исключительно кварцевый состав галек и повышенная золотоносность.

В 1961–1964 гг. геологами ПГО «Якутскгеология» в бассейнах средних течений рек Вилюя и Лены были обнаружены многочисленные проявления золота в коренных породах, содержания которого в кварцево-кремнистых лимонитизированных породах, кварцевых жилах и магнезитовых рудопроявлениях варьировало от 0,1 до 2 г/т. В 1963 г. на реках Намана и Марха были выявлены дайки сиенитов и диоритов, предположительно мезозойского возраста. В брекчированных, окремнённых и лимонитизированных карбонатных породах в бассейне р. Малая Русская были обнаружены аномально высокие содержания золота, варьирующие от 0,1 до 1,8 г/т. При этом золотосодержащие породы района были отнесены к метасоматитам юрского возраста, тяготеющим к карстовым воронкам, что, безусловно, сближает их с рудами месторождений куранахского типа. В эти же годы в бассейнах рек Нюя, Джерба, Кемпендяй, Намана и Бирюк обнаружено золото с содержанием 1,5 г/т, тяготеющее к кварцевым и кальцитовым жилам, лимонитизированным

породам, картируемым по зонам разрывных нарушений. Ю. А. Дукардтом и другими исследователями в середине 60-х гг. прошлого века на участке Чаяндинский в бассейне р. Нюя закартированы развалы брекчированных, окварцованных и лимонитизированных пород, содержащих золото от 1,0 до 24,0 г/т, отмечалось и видимое золото в виде единичных зёрен размером 0,01–0,05 мм. Ю. А. Дукардт связывал выявленное золотое оруденение с линейными корами выветривания. Кроме того, на Чаяндинском участке в 1967 г. Д. В. Блажкун проводил детальные работы, и в 109 образцах содержания золота были максимальными – 1,3 г/т.

Наличие обширных шлиховых ореолов рассеяния золота, а также промышленных, но мелких россыпей в пределах Лена-Вилюйского междуречья при полном отсутствии коренных месторождений стало причиной металлогенических работ в регионе. Как было установлено в итоге и на сегодняшний день не вызывает сомнения, *основным источником золота россыпей стали терригенные породы мезозоя, выполняющие в данном случае роль промежуточных коллекторов.* Однако в ходе работ был установлен целый ряд проявлений коренного золота в карбонатных породах палеозоя, обнажающихся в пределах Алданской моноклизы, Берёзовского и Нюйского прогибов. На тот момент выявленные в рудах содержания в пределах первых граммов на тонну, а также слабо развитая инфраструктура территории не позволяли оценить её как перспективную.

Алдано-Вилюйская рудно-россыпная золотоносная провинция. *Бассейн рек Лена, Алдан, Вилюй никогда не рассматривался как золотоносный, а при металлогеническом районировании золото в качестве попутного компонента включалось в железорудные, полиметаллические и прочие металлогенические таксоны.* В рамках выполнения работ по созданию Прогнозно-минерагенической карты территории Российской Федерации и её континентального шельфа масштаба 1 : 2 500 000, карт закономерностей размещения и прогноза золото-медно-порфириновых месторождений,



большеобъемных черносланцевых и эпитеpmальных месторождений золота территории Российской Федерации масштаба 1 : 2 500 000, при анализе материалов комплектов госгеолкарт 1000/3 по территории Южной Якутии, в том числе листов Р-50, Р-51, Р-52, Р-53, О-51, О-52, по которым работы велись сотрудниками отдела металлогении и геологии месторождений полезных ископаемых ФГБУ «ВСЕГЕИ», а также материалов ГСР-200 и ГДП-200/2, авторы настоящей статьи пришли к выводу о необходимости выделения на территории Российской Федерации, в бассейнах рек Лена, Алдан и Вилюй, *новой рудно-россыпной золотоносной провинции – Алдано-Вилюйской*, общей площадью 450 тыс. км² (рис. 1). *Металлогенический потенциал провинции оценивается нами в 5 тыс. т золота*, и в недалеком будущем она может стать новой масштабной ресурсной базой золота и сопутствующих элементов Российской Федерации.

В настоящее время в пределах выделяемой провинции известны многочисленные проявления коренного и россыпного золота, а также крупные золоторудные месторождения – Северное, Дэлбэ, Порфиоровое, Центральное, Новое, Куранахское и другие, расположенные в Куранахском золоторудном узле, запасы золота в пределах которого составляют более 530 т [3].

Месторождения Куранахского узла, как и большинство проявлений золота выделяемой Алдано-Вилюйской рудно-россыпной провинции, относятся к куранахскому типу, сходному по структурно-тектонической позиции, составу рудовмещающих толщ, типу рудосопровождающих гидротермально-метасоматических образований (джаспероиды) с золоторудными месторождениями карлинского типа, широко развитыми в провинции Бассейнов и Хребтов штата Невада (США).

Здесь уместно подчеркнуть, что в штате Невада в 2018 г. было добыто 173,6 т золота, что составило 78 % добычи золота в США и 5,0 % мировой добычи. Большая часть золота в Неваде добывается открытым способом с использованием кучного выщелачивания. Подавляющая часть золоторудных месторожде-

ний штата относится к так называемому карлинскому типу (золото-полисульфидный геолого-промышленный тип в терригенно-карбонатных породах). Большинство месторождений сосредоточено в силур-девонской доломитовой формации Роберт Маунтинс, испытавшей интенсивное воздействие низкотемпературных гидротермально-метасоматических процессов, вещественно зафиксированных в настоящее время в виде джаспероидов, характеризующихся многоярусным развитием. При этом джаспероиды в пределах провинции повсеместно сопровождают золотое оруденение.

Авторами статьи вслед за предшествующими исследователями [1, 4–6] подчёркивается, что северная часть выделяемой Алдано-Вилюйской провинции, сложенная на современном эрозионном срезе терригенными юрскими и меловыми отложениями, изобилует аллювиальными россыпями золота (см. рис. 1), в том числе представляющими промышленный интерес. Южная часть провинции сложена в основном кембрийскими и венд-кембрийскими отложениями, представленными, главным образом, карбонатными и терригенно-карбонатными отложениями, нередко содержащими углеродистое вещество. Она характеризуется присутствием множества проявлений и точек минерализации коренного золота в джаспероидах, березитах и аргиллизито-березитах.

Анализ результатов полевых работ, выполненных сотрудниками отдела металлогении и геологии месторождений полезных ископаемых ФГБУ «ВСЕГЕИ» в рамках создания ГГК-1000/3 листов Р-50, 51, 52, О-51, 52, а также фондовых и опубликованных материалов [2, 4, 6], позволил переосмыслить современные перспективы выявления промышленной золотоносности региона и обосновать схему минерагенического районирования по золоту изученной территории с выделением как собственно Алдано-Вилюйской рудно-россыпной золотоносной провинции, так и минерагенических зон (золотороссыпная Лена-Вилюйская, потенциально золоторудные Приленская, Ленско-Ньюйская и Амгинская, золото-рудная Чаро-Алданская) с рудными и

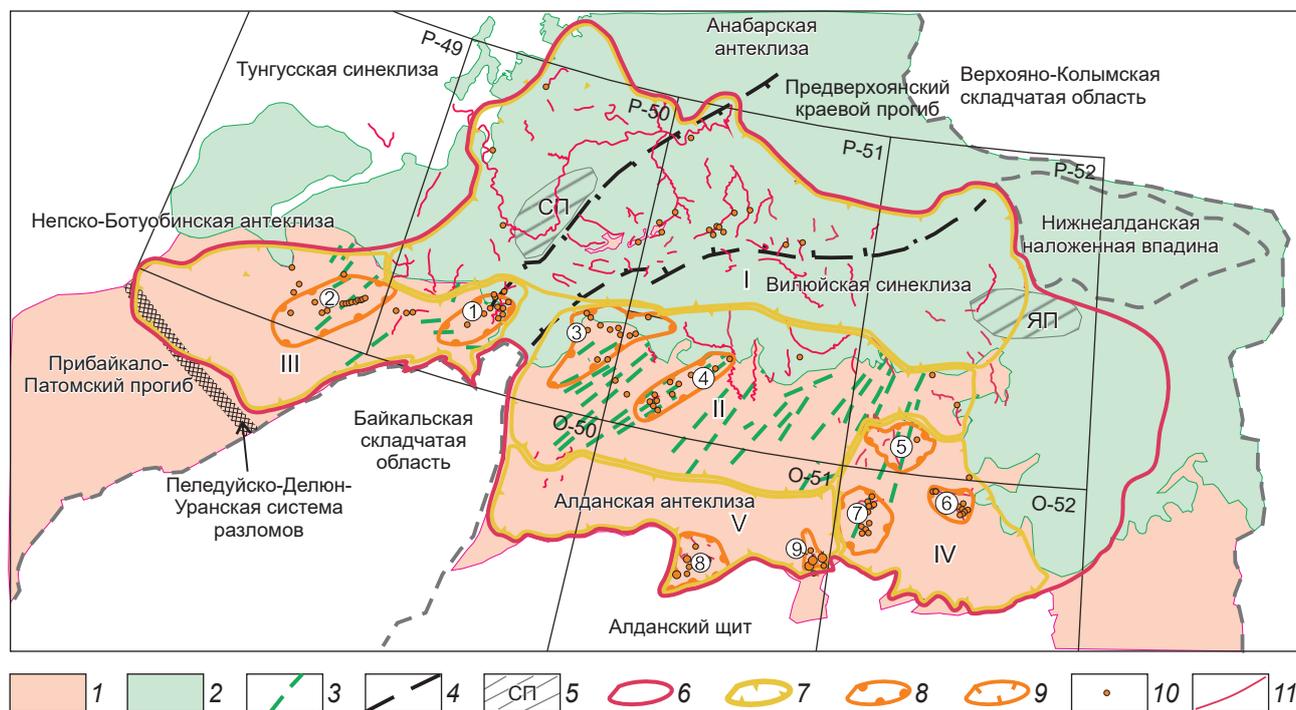


Рис. 1. Геолого-структурная схема Алдано-Вилъюйской рудно-россыпной золотоносной провинции с прогнозируемыми минерагеническими зонами и потенциальными золоторудными районами и узлами:

1 – рифей-палеозойские отложения чехла Сибирской платформы; *2* – юрско-кайнозойские отложения чехла Сибирской платформы; *3* – среднепалеозойские дайковые пояса базитов; *4* – границы Вилъюйского рифта; *5* – погребённые поднятия фундамента Сибирской платформы: СП – Сунтарское, ЯП – Якутское; *6* – Алдано-Вилъюйская рудно-россыпная золотоносная провинция; *7* – минерагенические зоны, выделенные по результатам проводимых и завершённых работ по созданию комплектов ГКК-1000 листов О-51, О-52, Р-50, Р-51, Р-52 (I – Лено-Вилъюйская, II – Приленская, III – Ленско-Нюйская, IV – Амгинская, V – Чаро-Алданская); *8* – потенциально золоторудные районы (1 – Джербинский, 2 – Нюйский, 3 – Намана-Бирюкский, 4 – Олёкминский, 5 – Улуйский, 6 – Междуреченский, 7 – Модутокский, 8 – Верхнеамгинский); *9* – Куранахский золоторудный узел; *10* – коренные рудопроявления и месторождения коренного золота; *11* – шлиховые ореолы и россыпи золота

Fig. 1. Geological-structural scheme of the Aldan-Vilyui ore-placer gold-bearing province, showing forecasted minerogenic zones, potential gold districts, and gold clusters:

1 – Riphean-Paleozoic deposits of the Siberian platform cover; *2* – Jurassic-Cenozoic deposits of the Siberian platform cover; *3* – Middle Paleozoic basic dike belts; *4* – Vilyui rift boundaries; *5* – buried uplifts of the Siberian platform basement: СП – Suntarskoye, ЯП – Yakutskoye; *6* – Aldan-Vilyui ore-placer gold province; *7* – minerogenic zones identified based on results of ongoing and completed works on compilation of the State Geological Map 1 : 1 000 000 (GGK-1000), sheets O-51, O-52, P-50, P-51, and P-52 (I – Lena-Vilyui, II – Prilenskaya, III – Lena-Nyuiskaya, IV – Amga, V – Chara-Aldan); *8* – potential gold regions (1 – Dzherbinsky, 2 – Nyuisky, 3 – Namana-Biryuisky, 4 – Olekminsky, 5 – Uluiskey, 6 – Mezhdurechensky, 7 – Modutoksky, 8 – Verkhneamginsky); *9* – Kuranakh gold cluster; *10* – primary gold occurrences and deposits, *11* – heavy-mineral concentrate haloes and gold placers



потенциальными рудными районами: Джербинским, Нюйским, Намана-Бирюкским, Олёкминским, Улуйским, Модутокским, Междуреченским, Амгинским и Куранахским (см. рис. 1). При этом авторские ресурсы рудного золота категории P_3 в пределах потенциально золоторудных районов (Джербинский, Намано-Бирюкский, Олёкминский) листов Р-50, Р-51 составили 1050 т.

В структурно-тектоническом отношении в состав провинции входят Алданская антеклиза, Вилюйская синеклиза, Вилюйский рифт, Сунтарское и Якутское поднятия (см. рис. 1).

Алдано-Вилюйская рудно-россыпная золотоносная провинция характеризуется отчётливой благороднометалльной (золотой), халькофильной (цветные металлы), сидерофильной (железо-марганцеворудной) геохимической специализацией (рис. 2) осадочных отложений плитного комплекса Сибирской платформы и рвущих их магматических образований основного, кислого и субщелочного составов.

В геофизическом отношении Алдано-Вилюйская рудно-россыпная золотоносная провинция характеризуется дифференцированным аномальным магнитным полем (ΔT_a), указывающим на дифференцированный по вещественному составу фундамент Сибирской платформы, перекрытый здесь карбонатными и терригенными отложениями плитного комплекса палеозой-мезозойского возраста. По характеру аномального магнитного поля в рассматриваемой провинции выделяются относительно узкие линейные тектоно-метасоматические зоны с субмеридиональным, северо-восточным, восточным простиранием. Для этих зон характерны повышенные значения поля. Они рассматриваются авторами статьи как рудоподводящие каналы. Гравитационное поле в пределах провинции также неоднородно и указывает на неоднородности фундамента на более глубоких горизонтах. Разноранговые золоторудные объекты провинции тяготеют в основном к блокам фундамента с пониженными значениями гравитационного поля Δg .

Лено-Вилюйская золото-россыпная минерагеническая зона¹. Россыпная золотонос-

ность Вилюйской синеклизы и её обрамления приурочена главным образом к четвертичным аллювиальным отложениям. Концентрация золота в них сформирована в результате перемива промежуточных коллекторов мезозойского, в меньшей мере позднепалеозойского возраста. Содержание золота в промежуточных коллекторах достигает 30 мг/м³. Частота встречаемости таких концентраций увеличивается от ранних отложений к поздним. Наиболее значительные скопления золота отмечены на реках Вилюй, Кемпендяй, Тонгуо, Табасында, Далыгыр, Чыбыда, Ыгыатта, Марха, Тюкян, Тымтайдах, Синяя, Намана, Намыльдилях, Каменка, Халаманда.

В региональных геохимических полях рассматриваемая зона характеризуется благороднометалльной (Au, Pt) специализацией. В её пределах выделены геохимические районы с сидерофильной и редкометалльной специализацией. Для западной части зоны имеются перспективы россыпной алмазности (см. рис. 2).

С 1903 по 1947 г. более чем на 70 участках велась старательская добыча золота из русловых и, реже, из террасовых образований. На р. Вилюй на 38 участках совместно с золотом добывалась платина. Здесь до 1928 г. за сезон намывали до 50 кг золота, а в 1917 г. – не менее 100 кг. На р. Тонгуо с 1917 по 1924 гг. ежегодно добывали до 32 кг золота. Россыпному золоту в количестве от 5 до 40 % к его весу сопутствует платина.

Несмотря на то, что основным источником золота россыпей являются промежуточные коллекторы, существуют достаточно реальные перспективы выявления коренных объектов в пределах характеризуемой золото-россыпной минерагенической зоны. Один из наиболее перспективных объектов – район р. Кенгкеме. В ходе полевых исследований сотрудниками Алданской партии ФГБУ «ВСЕГЕИ» в рамках работ по составлению государственной геологической карты 1000/3 (лист Р-52) были

¹ Как и все другие нижеописанные минерагенические зоны, входит в состав Алдано-Вилюйской рудно-россыпной золотоносной провинции.

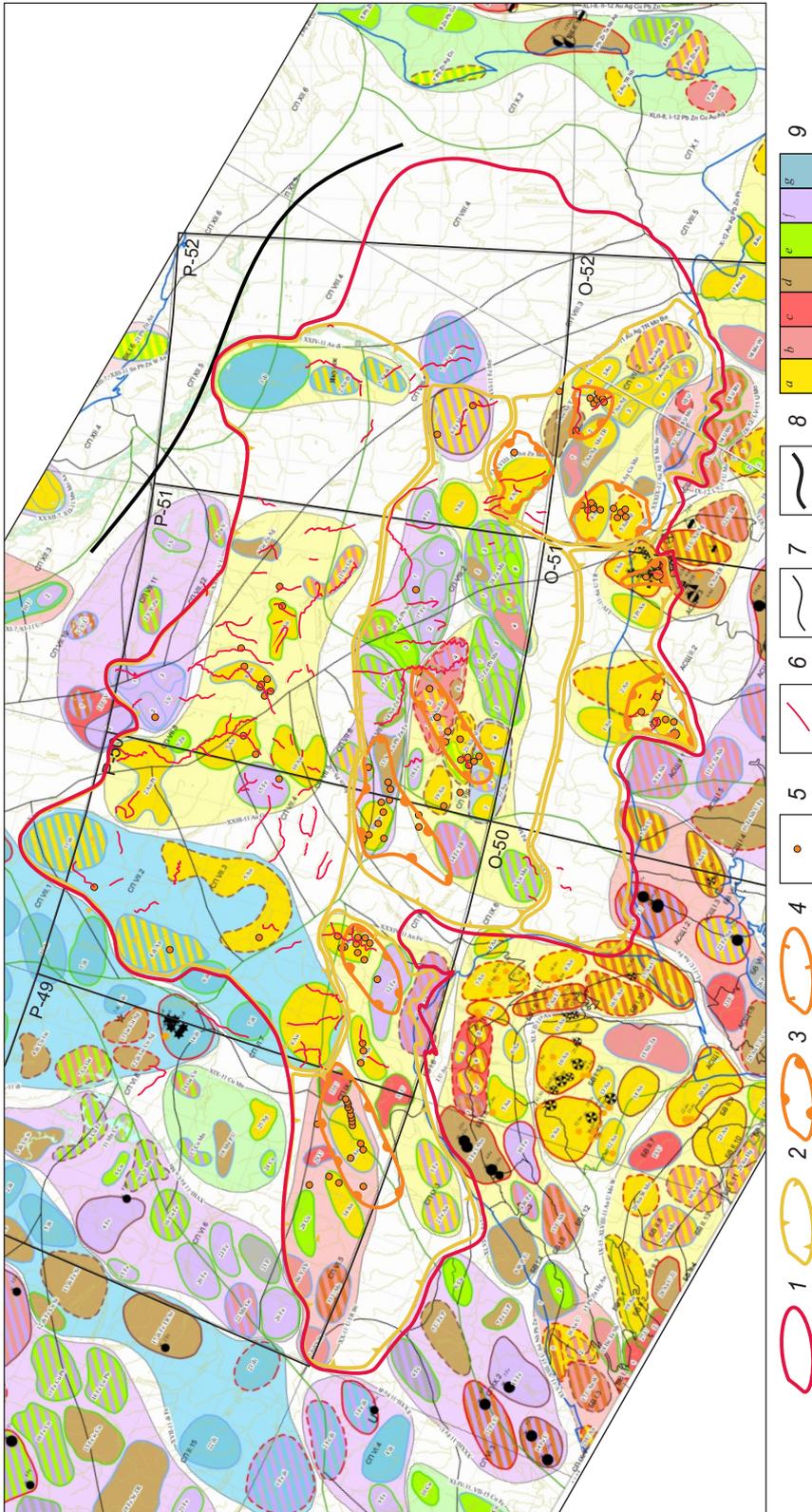


Рис. 2. Положение Алдано-Вилуйской рудно-россыпной золотоносной провинции в региональных геохимических полях. Фрагмент геохимической карты России масштаба 1 : 2 500 000 (по материалам ИМГРЭ, 2020):

контур: 1 – Алдано-Вилуйской рудно-россыпной золотоносной провинции, 2 – золотоносных минерогенических зон, золотоносных и потенциальных золоторудных: 3 – районов, 4 – узлов; 5 – проявления и месторождения коренного золота; 6 – штиховые оросли и россыпи золота; границы: 7 – районы, 8 – районы; 9 – геохимическая специализация рудно-геохимических районов: а – благородные металлы (Au, Ag, Pt), б – редкие металлы (Mo, Sr, TR, Be, Y, Yb), с – радиоактивные металлы (U, Th), d – смешанный тип, e – цветные металлы (Pb, Cu, Zn, Ni, Co), f – чёрные металлы (Cr, Mn, Ti, Fe, V), g – алмазы

Fig. 2. Position of the Aldan-Vilyuyi ore-placer gold-bearing province in regional geochemical fields. A fragment of the Geochemical map of Russia, 1 : 2 500 000 (based on IMGRE materials, 2020):

contours: 1 – Aldan-Vilyuyi ore-placer gold-bearing province, 2 – gold-bearing and potential gold-bearing mineralogenic zones: 3 – regions, 4 – clusters; 5 – primary gold occurrences and deposits; 6 – heavy-mineral concentrate haloes and gold placers; boundaries: 7 – mineral-geochemical regions, 8 – clusters; 9 – geochemical specialization of the mineral-geochemical regions: a – precious metals (Au, Ag, Pt), b – rare metals (Mo, Sr, TR, Be, Y, Yb), c – radioactive metals (U, Th), d – mixed type, e – base metals (Pb, Cu, Zn, Ni, Co), f – ferrous metals (Cr, Mn, Ti, Fe, V), and g – diamonds

исследованы пять шлиховых проб из среднего течения р. Кенгкеме. На основе изучения морфологии и состава были выделены два типа золота. Россыпное золото первого типа не отличается от распространённого в пределах минерагенической зоны и является преотложенным. Золото второго типа (рис. 3) имеет типично рудный облик, однородное внутреннее строение и не несёт механических следов длительного переноса. Все перечисленные признаки свидетельствуют о недолгом нахождении золота данного типа в россыпи и о близости коренного источника, что позволяет предположить наличие в пределах современного водосбора реки коренного про-

явления золоторудной минерализации, зона окисления которого является источником золота второго типа. Так как река эродирует только мезозойские отложения, то и источник золота имеет, вероятнее всего, мезозойский возраст.

Приленская потенциальная золоторудная минерагеническая зона. Данная минерагеническая зона, протягивающаяся в широтном направлении, в качестве потенциальной золоторудной выделяется впервые. В её геологическом строении принимают участие терригенные и терригенно-карбонатные отложения рифей-палеозойского, терригенные отложения юрско-кайнозойского возраста,

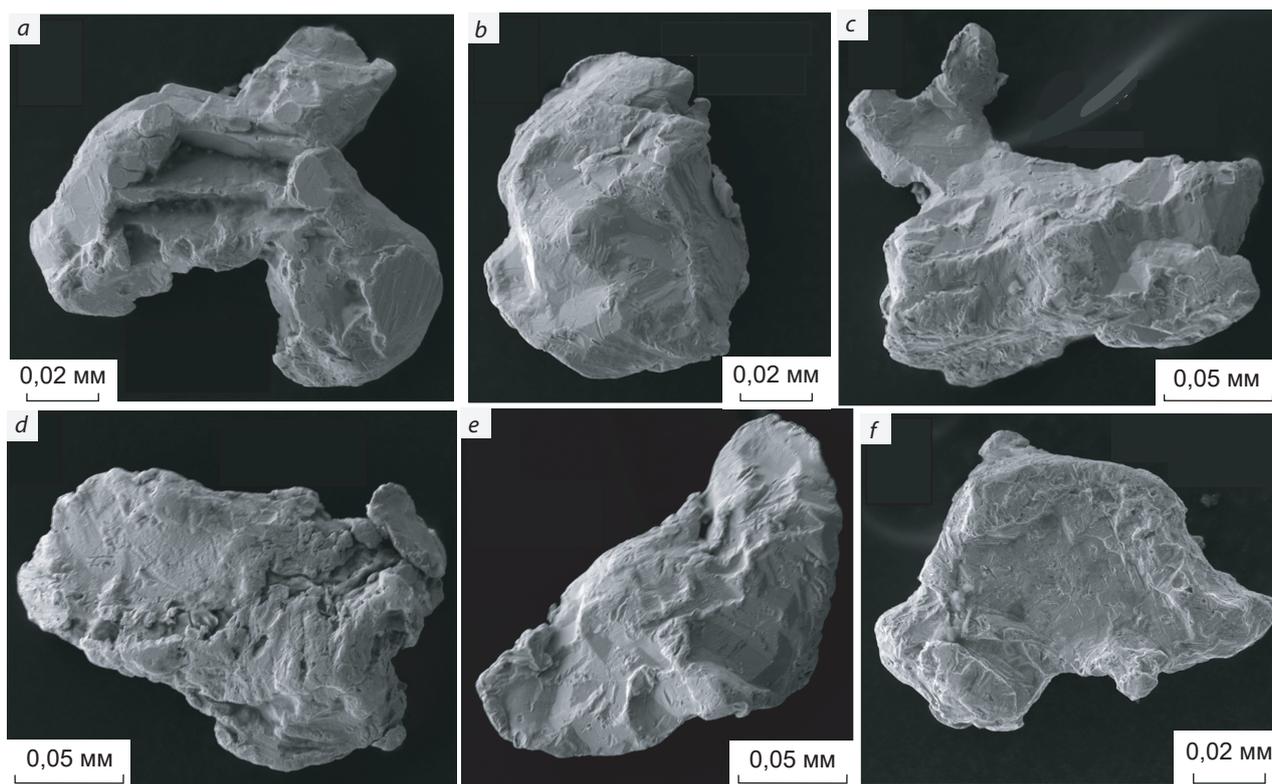


Рис. 3. Золото россыпи р. Кенгкеме рудного облика:

a, c, f – комковидно-угловатое; *b* – изометрическое; *d* – комковидное; *e* – прожилково-чешуйчатое

Fig. 3. Gold particles of the Kengkeme river with a primary-ore type appearance:

a, c, f – flakey-angular; *b* – isometric; *d* – flakey; *e* – scaly-stringer shaped

слагающие плитный комплекс Сибирской платформы. В пределах зоны закартированы многочисленные разрывные нарушения и дайки долеритов, составляющие протяжённые рои северо-восточного простирания. На окраине г. Олёкминска закартировано интрузивное тело сиенитов, сиенит-порфиоров с возрастом 371 млн лет.

В толще терригенно-карбонатных и терригенных отложений плитного комплекса масштабно, с высокой степенью проработки субстрата проявлялись гидротермально-метасоматические процессы, зафиксированные на современном эрозионном срезе новообразованиями джаспероидов и аргиллизито-березитов. В карбонатных толщах отмечаются процессы карстообразования с проявлением окисной и сульфидной минерализации. Дайки долеритов иногда сульфидизированы. В экзоконтакте сиенитовой интрузии г. Олёкминск отмечены скарны с обильной магнетитовой минерализацией и локальными аномалиями золота (рудопроявления Олёкминское, Юбилейное).

В региональных геохимических полях Приленская потенциально золоторудная минерагеническая зона характеризуется разнообразной геохимической специализацией (см. рис. 2). В её пределах отчётливо выделяются районы, узлы и зоны благороднометалльной (Au, Pt), сидерофильной (Fe, Mn), халькофильной (Cu, Pb, Zn) и редкометалльной (TR, Sr) геохимической специализации. На карте аномального магнитного поля на площади этой зоны имеются линейные узкие аномальные зоны диагональной ориентировки, к которым приурочены потенциально золотоносные районы. Гравитационное поле восточной части зоны характеризуется более высокими значениями по сравнению с западной. При этом именно в западной части Приленской минерагенической зоны авторами выделены два потенциальных золоторудных района – Намана-Бирюкский и Олёкминский (рис. 4, 5, см. рис. 1), обладающие высокими перспективами выявления промышленно значимых месторождений куранахского и (или) карлинского типа, на площади которых уже известны мно-

гочисленные проявления золотой и сопутствующей рудной минерализации.

Ленско-Нюйская потенциальная золоторудная минерагеническая зона слагает крайнюю юго-западную часть Алдано-Виллюйской провинции и в геологическом отношении сложена в основном терригенно-карбонатными, карбонатными отложениями кембрия, в меньшей степени – терригенными отложениями юрского возраста, слагающими плитный комплекс Сибирской платформы. Магматические породы, представленные в основном долеритами, слагают рои даек северо-восточного и меридионального простирания. В пределах зоны широко проявлены также и тектонические нарушения северо-восточного простирания.

Гидротермально-метасоматические новообразования Ленско-Нюйской минерагенической зоны – джаспероиды и аргиллизито-березиты – проявлены широко и с высокой степенью проработки исходных пород плитного комплекса. Здесь же картируются карстовые полости. В ареалах развития джаспероидов, аргиллизито-березитов, карстовых полостей, а также разломной тектоники выявлены многочисленные рудопроявления золотой минерализации.

В региональных геохимических полях Ленско-Нюйская потенциально золоторудная зона характеризуется благороднометалльной (Au), сидерофильной (Fe), редкометалльной (TR, Be, Y, Yb) специализацией (см. рис. 2). Кроме того, в центральной части зоны выделяются районы и узлы с радиоактивной (U) и халькофильной (Cu) геохимической специализацией. Аномальное магнитное поле в пределах зоны дифференцировано. В западной части Ленско-Нюйской потенциально золоторудной минерагенической зоны отчётливо выделяется узкая линейная зона субмеридионального простирания положительных значений поля (ΔT_d). Гравитационное поле минерагенической зоны относительно провинции в целом понижено.

В пределах Ленско-Нюйской потенциально золоторудной минерагенической зоны авторами выделены два потенциальных золото-

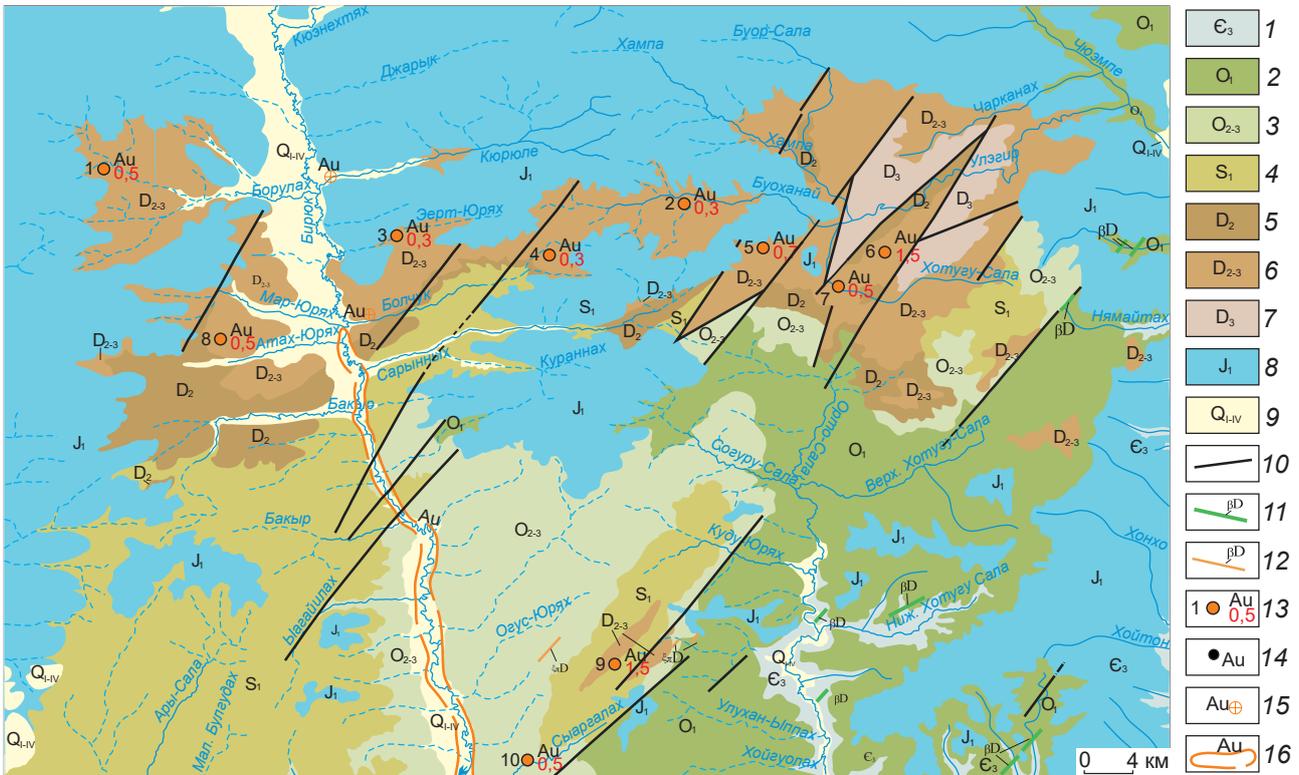


Рис. 4. Положение рудопроявлений золота в потенциальном Намана-Бирюкском золоторудном районе:

1 – кембрийская система, верхний отдел, пёстроокрашенные мергели с прослоями известняков, доломитов и песчаников; ордовикская система: 2 – нижний отдел, известняки, доломиты, 3 – средний–верхний отделы, мергели, аргиллиты, доломиты, прослои песчаников, алевролитов, известняков; 4 – силурийская система, нижний отдел, доломиты, алевролитистые доломиты, известняки; девонская система: 5 – средний отдел, глинистые известняки, песчаники, алевролиты, доломиты, гипсы, базальты, 6 – средний–верхний отделы, песчаники, алевролиты, гравелиты, вулканомиктовые конгломераты и брекчии, покровы трахибазальтов, 7 – верхний отдел, песчаники, прослои гравелитов и алевролитов, покровы базальтов; 8 – юрская система, нижний отдел, пески с прослоями конгломератов, галечников, песчаников, алевролитов, глин; 9 – верхнечетвертичные и современные аллювиальные отложения, пески и глины; 10 – разрывные нарушения; 11 – девонские интрузии, дайки долеритов, габбродолеритов; 12 – девонские дайки сиенит-порфиров; 13 – рудопроявления золота; 14 – пункты минерализации золота; 15 – точечная шлиховая проба с повышенным содержанием золота; 16 – золотоносные россыпи

Fig. 4. Position of gold occurrences in Namana-Biryuksky potential gold region:

1 – Cambrian system, upper section: mottled marls interbedded with dolomites and sandstones; Ordovician system: 2 – lower section, limestones, dolomites, 3 – middle–upper section, marls, argillites, dolomites, bands of sandstones, siltstone, limestones; 4 – Silurian system, lower section: dolomites, aleuritic dolomites, limestones; Devonian system: 5 – middle section, clayey limestones, siltstones, dolomites, gypsum, basalts, 6 – middle–upper sections, sandstones, siltstones, gravelites, volcanomictic conglomerates and breccias, trachybasalt covers, 7 – upper section, sandstones, gravelite and aleurolite bands, basalt covers; 8 – Jurassic system, lower section, sands with interlayers of conglomerates, gravels, sandstones, siltstones, and clays; 9 – Upper Quaternary and recent alluvial deposits, sands and clays; 10 – faults; 11 – Devonian intrusions, dolerite and gabbrodolerite dikes; 12 – Devonian syenite-porphyrus dikes; 13 – gold occurrences; 14 – gold mineralization indications; 15 – gold-enriched heavy mineral concentrate sample; 16 – gold placers

рудных узла – Джербинский и Ньюский (рис. 6, 7).

Амгинская потенциально золоторудная минерагеническая зона. Эта зона расположена в юго-восточной части Алдано-Вилюйской рудно-россыпной золотоносной провинции. В её геологическом строении принимают участие терригенно-карбонатные и карбонатные отложения кембрийского возраста, относимые к плитному комплексу Сибирской платформы. В восточной части зоны наблюдаются горизонтально залегающие юрские терригенные отложения, а в южной – отмечены незначительные по площади выходы терригенных, терригенно-карбонатных отложений венда. Магматические образования рассматриваемой минерагенической зоны представлены дайками долеритов, слагающими поля северного, северо-восточного простирания.

В геохимическом отношении зона характеризуется благороднометалльной (Au, Ag), в меньшей степени редкометалльной геохимической специализацией. Магнитное поле в пределах зоны сложно дифференцировано, имеется множество вытянутых линейных аномалий как положительного, так и отрицательного значения. Наиболее ярко проявлена положительная аномалия сигмоидальной формы, соответствующая Амгинской зоне разломов.

В пределах Амгинской потенциально золоторудной минерагенической зоны выявлены широкие ореолы джаспероидизации и аргиллизито-березитов, нередко приуроченные к зонам брекчирования и объёмной трещиноватости. Кроме того, здесь отмечены производные процессов карстообразования, широко развитые в карбонатных отложениях, а также коры выветривания неоген-четвертичного возраста.

К ореолам развития джаспероидов, аргиллизито-березитов, карстовых воронок, а также зон брекчирования и объёмного катаклаза пространственно приурочены многочисленные проявления золоторудной минерализации, входящие в состав трёх потенциальных золоторудных районов: Улуйского, Междуреченского и Модутокского (см. рис. 1).

Чаро-Алданская золоторудная минерагеническая зона в пространственном отношении располагается в южной части Алдано-Вилюйской рудно-россыпной золотоносной провинции. В геологическом строении зоны участвуют карбонатные, терригенно-карбонатные отложения венда, нижнего кембрия, а также, гораздо в меньшей степени, терригенные отложения юрского возраста. В карбонатных отложениях венда и кембрия отмечаются карстовые воронки, которые заключают в себе обломки железо-золоторудных образований, джаспероидов и красно-бурых глинистых кор выветривания.

В западной части зоны карбонатные отложения нередко имеют чёрный, серо-чёрный цвет, обусловленный наличием обильных битумопроявлений с повышенными содержаниями золота – до 2 г/т.

Магматические породы Чаро-Алданской золоторудной минерагенической зоны представлены дайками долеритов, дайками и штокообразными телами сиенитов и сиенит-порфиров мезозойского возраста.

В региональных геохимических полях рассматриваемая минерагеническая зона характеризуется благороднометалльной (Au) специализацией. Магнитное поле зоны линейно дифференцировано, с чередованием положительных и отрицательных значений. Ориентация региональных магнитных аномалий близмеридиональная.

Гидротермально-метасоматические процессы, проявленные в пределах Чаро-Алданской золоторудной минерагенической зоны, привели к формированию широких ореолов джаспероидов, аргиллизито-березитов, в меньшей степени – гумбеитов. В структурном отношении метасоматиты приурочены к зонам разрывных нарушений, экзо- и эндоконтактовым частям интрузивных тел.

К зонам и ареалам развития джаспероидов и карстовых полостей приурочены месторождения и рудопроявления золота. В пределах Чаро-Алданской золоторудной минерагенической зоны выделены Куранахский золоторудный и Верхнеамгинский потенциально золоторудный районы.

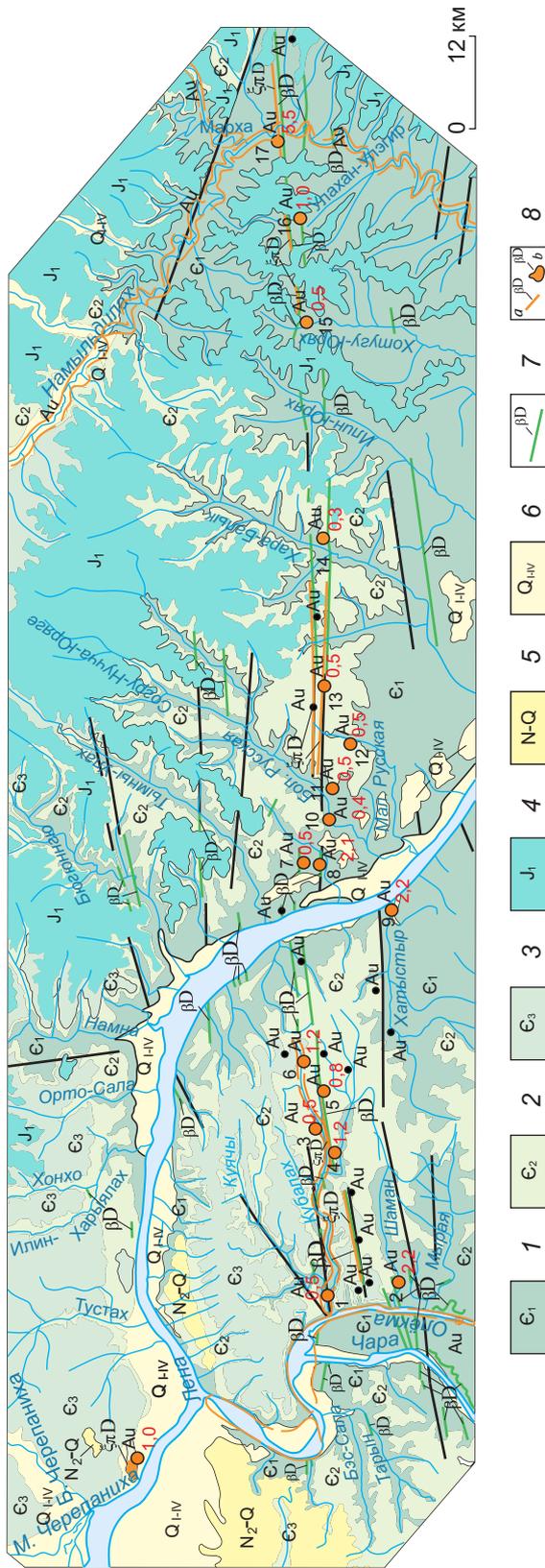


Рис. 5. Положение рудопроявлений золота в потенциальном Олёкминском золоторудном районе:

кембрийская система: 1 – нижний отдел, доломиты, мергели, 2 – средний отдел, доломиты, мергели, 3 – средний–верхний отделы, мергели с прослоями известняков, доломитов и песчаников; 4 – юрская система, нижний отдел, пески с прослоями конгломератов, галечников, песчаников, алевролитов, глин; 5 – плиоцен-нижнечетвертичные аллювиальные отложения, пески с примесью суглинков, глин и галечников; 6 – верхнечетвертичные и современные аллювиальные отложения, пески и глины; 7 – девонские интрузии, дайки долеритов, габбродолеритов; 8 – девонские сиенит-порфиры (a), дайки сиенит-порфира (b); остальные усл. обозн. см. рис. 4

Fig. 5. Position of gold occurrences in Olekminsky potential gold region:

Cambrian system: 1 – lower section, dolomites, marls, 2 – middle section, dolomites, marls containing limestone, dolomite and sandstone bands; 4 – Jurassic system, lower section, sands with interlayers of conglomerates, gravels, sandstones, siltstones, and clays; 5 – Pliocene-Lower Quaternary alluvial deposits, sands contaminated with loams, clays and gravels; 6 – Upper Quaternary and recent alluvial deposits, sands and clays; 7 – Devonian intrusions, dolerite and gabbrodolerite dikes; 8 – Devonian intrusions, syenite porphyries (b), syenite porphyry dikes (a); see Fig. 4 for legend

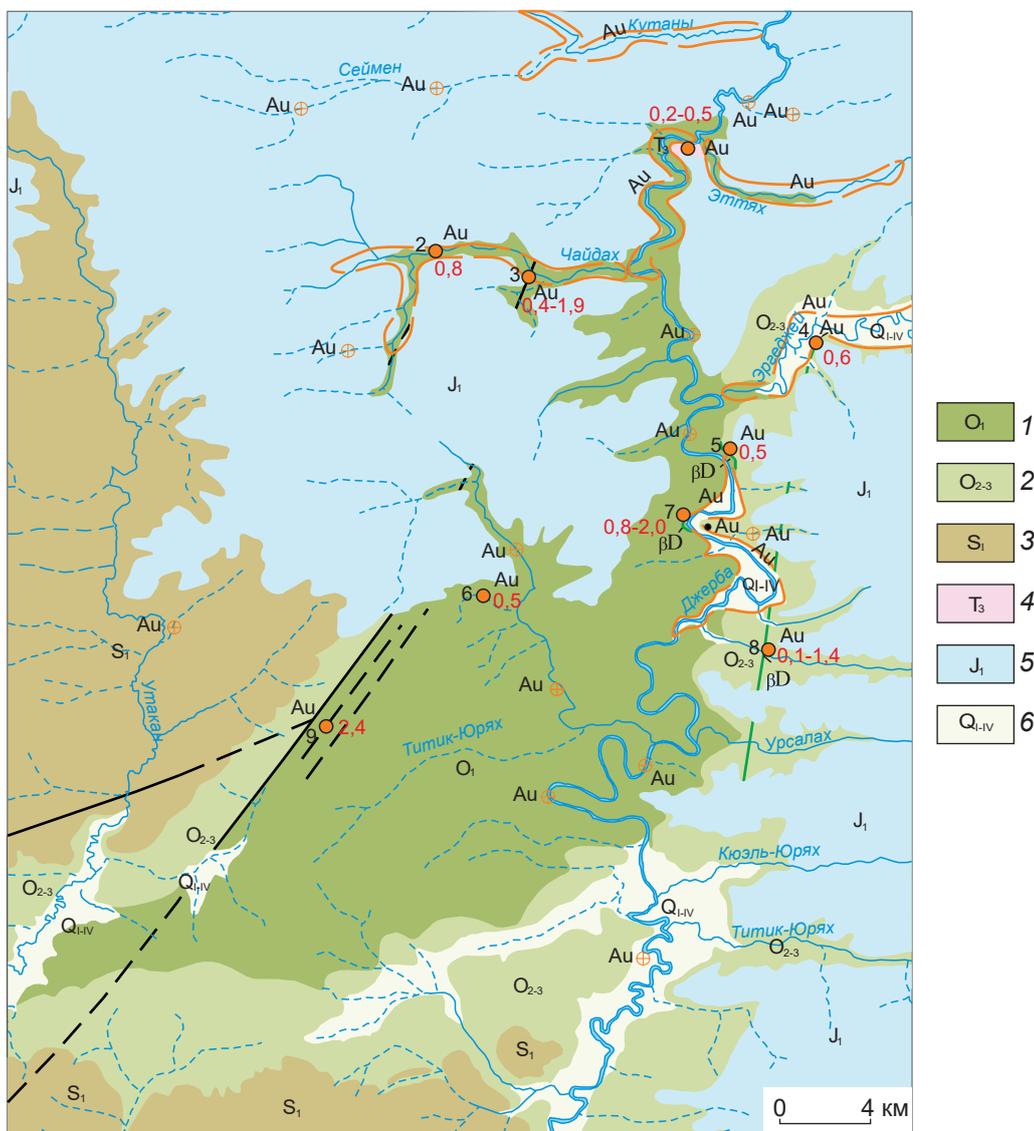


Рис. 6. Положение рудопроявлений золота в потенциальном Джербинском золоторудном районе:

ордовикская система: 1 – нижний отдел, известняки, доломиты, 2 – средний–верхний отделы, алевролиты, глины, известняки, песчаники; 3 – силурийская система, нижний отдел, известняки с прослоями глины и доломитов; 4 – триасовая система, верхний отдел, глины с прослоями углистого вещества; 5 – юрская система, нижний отдел, пески, конгломераты, галечники; 6 – четвертичная система, пески с галькой (аллювий); остальные усл. обозн. см. рис. 4

Fig. 6. Position of gold occurrences in Dzherbinsky potential gold region:

Ordovician system: 1 – lower section, limestones, dolomites, 2 – middle–upper sections, siltstones, clays, limestones, sandstones; 3 – Silurian system, lower section, limestones with interlayers of clays and dolomite; 4 – Triassic system, upper section, clays containing bands of carbonaceous matter; 5 – Jurassic system, lower section, sands, conglomerates, gravels; 6 – Quaternary system, gravely sands (alluvium); see Fig. 4 for legend

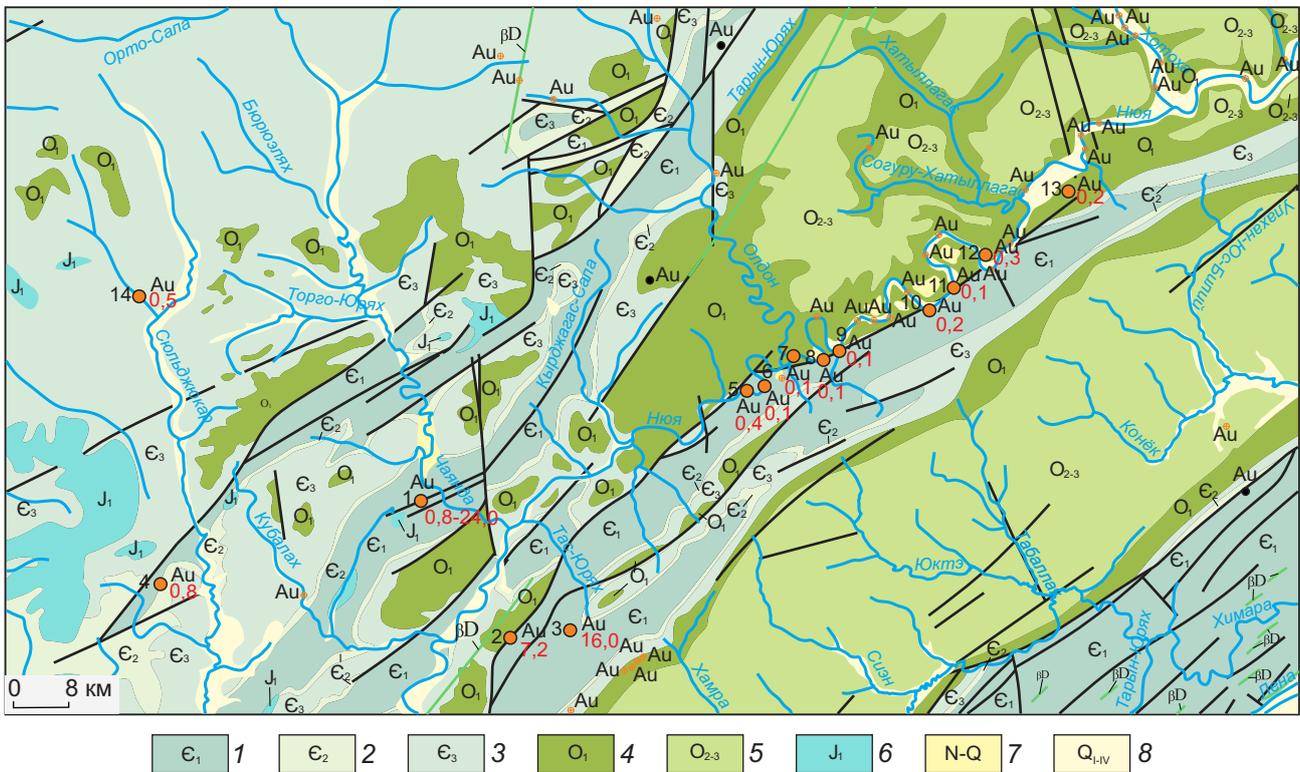


Рис. 7. Положение рудопроявлений золота в потенциальном Нуйском золоторудном районе:

кембрийская система: 1 – нижний отдел, доломиты, мергели, 2 – средний отдел, доломиты, прослои карбонатных брекчий, 3 – средний–верхний отделы, алевролиты, аргиллиты, доломиты, прослои песчаников и известняков; ордовикская система: 4 – нижний отдел, известняки, доломиты, мергели, 5 – средний–верхний отделы, переслаивание песчаников, алевролитов и аргиллитов; 6 – юрская система, нижний отдел, пески с прослоями конгломератов, галечников, песчаников, алевролитов, глин; 7 – плиоцен-нижнечетвертичные аллювиальные отложения, пески с примесью суглинков, глин и галечников; 8 – верхнечетвертичные и современные аллювиальные отложения, пески, галечники, супеси и суглинки; остальные усл. обозн. см. рис. 4

Fig. 7. Position of gold occurrences in Nuyisky potential gold region:

Cambrian system: 1 – lower section, dolomites, marls, 2 – middle section, dolomites, carbonate breccia bands, 3 – middle–upper sections, siltstones, claystones, dolomites, interlayers of sandstones and limestones; Ordovician system: 4 – lower section, limestones, dolomites, marls, 5 – middle-upper sections, intercalation of sandstones, siltstones, and claystones; 6 – Jurassic system, sands with interlayers of conglomerates, gravels, sandstones, siltstones, and clays; 7 – Pliocene-Lower Quaternary alluvial deposits, sands contaminated with loams, clays, and gravels; 8 – Lower Quaternary and recent alluvial deposits, sands, gravels, and loams; see Fig. 4 for legend

Заканчивая изложение материала, полученного нами в ходе выполнения работ по сводному, обзорному и мелкомасштабному картографированию, следует подчеркнуть, что впервые за несколько десятилетий в пределах Российской Федерации выделена новая рудно-россыпная золотоносная провинция – Алдано-Вилуйская, которая, по мнению авторов, обладает металлогеническим потенциалом золота в 5 тыс. т. Наиболее близким аналогом данной провинции мы считаем провинцию Бассейнов и Хребтов штата Невада (США), достоверные запасы золота которой составляют несколько тысяч тонн и относятся к

карлинскому типу. В пределах выделенной провинции обоснованы потенциальные золоторудные минерагенические зоны и районы, в которых необходимо проведение крупномасштабных прогнозно-металлогенических исследований для локализации участков для постановки поисковых работ на рудное золото карлинского (куранахского) типа. В случае благоприятного сценария развития событий, возможно, в ближайшем будущем данная провинция может стать новой масштабной ресурсной базой золота и сопутствующих благороднометалльных элементов Российской Федерации.

Список литературы

1. Глушкова Е. Г., Никифорова З. С. Внутреннее строение россыпного золота бассейна средней Лены (юго-восток Сибирской платформы) // Записки Российского минералогического общества. – 2011. – Ч. СХХХХ, № 1. – С. 76–83.
2. Каженкина А. Г., Никифорова З. С. Индикаторные признаки россыпного золота коренных источников Au-Ag формации // Записки Российского минералогического общества. – 2015. – Ч. СХLIV, № 3. – С. 82–89.
3. Молчанов А. В., Терехов А. В., Шатов В. В., Петров О. В., Кукушкин К. А., Козлов Д. С., Шатова Н. В. Золоторудные районы и узлы Алдано-Становой металлогенической провинции // Региональная геология и металлогения. – 2017. – Вып. 71. – С. 93–111.
4. Никифорова З. С., Герасимов Б. Б., Глушкова Е. Г., Каженкина А. Г. Золотоносность востока Сибирской платформы: россыпи – коренные источники // Геология рудных месторождений. – 2013. – Т. 55, № 4. – С. 305–319.
5. Никифорова З. С., Герасимов Б. Б., Глушкова Е. Г., Каженкина А. Г. Индикаторные признаки россыпного золота как показатель прогнозирования формационных типов золоторудных месторождений (восток Сибирской платформы) // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59, № 10. – С. 1643–1657.
6. Никифорова З. С. О возможности формирования крупных золоторудных месторождений мезозойского этапа рудообразования (восток Сибирской платформы) // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2017. – № 10 (7). – С. 908–921.

References

1. Glushkova E. G., Nikiforova Z. S. Vnutrennee stroenie rossypnogo zolota basseina srednei Leny (yugo-vostok Sibirskoi platformy) [The internal structure of the placer gold of the middle Lena basin (south-east of the Siberian platform)], *Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva* [Notes of the Russian Mineralogical Society], 2011, СХХХХ, No 1, pp. 76–83. (In Russ.).
2. Kazhenkina A. G., Nikiforova Z. S. Indikatornye priznaki rossypnogo zolota korennykh istochnikov Au-Ag formatsii [Indicator signs of the placer gold of indigenous Au-Ag formations], *Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva* [Notes of the Russian Mineralogical Society], 2015, СХLIV, No 3, pp. 82–89. (In Russ.).



3. Molchanov A. V., Terekhov A. V., Shatov V. V., Petrov O. V., Kukushkin K. A., Kozlov D. S., Shatova N. V. Zolotorudnye raiony i uzly Aldano-Stanovoi metallogenicheskoi provintsii [Gold areas and assemblies of Aldano-Stanovaya metallogenic province], *Regional'naya geologiya i metallogeniya* [Regional Geology and Metallogeny], 2017, No 71, pp. 93–111. (In Russ.).
4. Nikiforova Z. S., Gerasimov B. B., Glushkova E. G., Kazhenkina A. G. Zolotonosnost' vostoka Sibirskoi platformy: rossypi – korennye istochniki [Gold mineralization of the East of the Siberian Platform: Places – Indigenous Sources], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits], 2013, V. 55, No 4, pp. 305–319. (In Russ.).
5. Nikiforova Z. S., Gerasimov B. B., Glushkova E. G., Kazhenkina A. G. Indikatornye priznaki rossypnogo zolota kak pokazatel' prognozirovaniya formatsionnykh tipov zolotorudnykh mestorozhdenii (vostok Sibirskoi platformy) [Indicator signs of placer gold as an indicator of forecasting formation types of gold deposits (East of the Siberian platform)], *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2018, V. 59, No 10, pp. 1643–1657. (In Russ.).
6. Nikiforova Z. S. O vozmozhnosti formirovaniya krupnykh zolotorudnykh mestorozhdenii mezozoiskogo etapa rudoobrazovaniya (vostok Sibirskoi platformy) [On the possibility of forming large gold deposits of the Mesozoic stage of ore formation (East of the Siberian Platform)], *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii* [Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies], 2017, No 10 (7), pp. 908–921. (In Russ.).

Авторы

Молчанов Анатолий Васильевич

доктор геолого-минералогических наук
заведующий отделом
Anatoly_Molchanov@vsegei.ru

Терехов Артем Валерьевич

кандидат геолого-минералогических наук
заместитель заведующего отделом
Artem_Terekhov@vsegei.ru

Козлов Глеб Александрович

геолог 1 категории
Gleb_Kozlov@vsegei.ru

Лебедев Иван Олегович

ведущий геолог
Ivan_Lebedev@vsegei.ru

Хорохорина Елена Ивановна

ведущий инженер
Elene_Horohorina@vsegei.ru

Гузев Владислав Евгеньевич

инженер 1 категории
Vladislav_Guzev@vsegei.ru

ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт имени А. П. Карпинского», г. Санкт-Петербург

Authors

Molchanov Anatoly Vasilievich

PhD
Head of Department
Anatoly_Molchanov@vsegei.ru

Terekhov Artem Valerievich

PhD
Deputy Head of Department
Artem_Terekhov@vsegei.ru

Kozlov Gleb Alexandrovich

Geologist
Gleb_Kozlov@vsegei.ru

Lebedev Ivan Olegovich

Leading geologist
Ivan_Lebedev@vsegei.ru

Khorokhorina Elena Ivanovna

Leading engineer
Elene_Horohorina@vsegei.ru

Guzev Vladislav Evgenievich

Engineer
Vladislav_Guzev@vsegei.ru

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg, Russia

Металлогения золота Восточно-Таннуольского рудного района (Республика Тыва)

Gold metallogeny of the East Tannu-Ola ore region, Tyva Republic

Черных А. И., Широбоков А. Ю.,
Арсентьева И. В.

Chernykh A. I., Shirobokov A. Yu.,
Arsentieva I. V.

Приведены результаты анализа ранее полученных и новых геологических, геохимических и металлогенических данных по территории Восточно-Таннуольского железо-медно-полиметаллически-золоторудного района. В его пределах обосновано выделение прогнозируемых Элегест-Межегейского, Аптаринского и Шивилигского золоторудных узлов и Харалыгского, Ирбитейского золото-серебро-полиметаллических. Кроме того, внутри Элегест-Межегейского узла оконтурены Ургайлыгское, Проездное, Чумуртукское прогнозируемые золоторудные поля, внутри Аптаринского – Деспенское, а внутри Шивилигского – Овур-Онгешское. За пределами рудных узлов установлены Улуг-Сайлыгское и Ак-Чаринское золото-молибден-меднорудные поля. Приведены краткие сведения об истории изучения, геолого-структурном положении, геологическом строении и геохимической специализации пород Восточно-Таннуольского района. Для каждого рудного узла представлены особенности геологического строения, минералогического состава руд, характеристика самородного золота, параметры распределения золото-сульфидно-кварцевого, золото-скарнового, золотосодержащего колчеданно-полиметаллического и молибден-медно-порфирирового типов руд. Сделаны выводы о закономерностях распространения и металлогенических эпохах формирования золота и золотосодержащего оруденения в пределах изучаемого района.

Ключевые слова: металлогеническое районирование, золото, Восточно-Таннуольский рудный район, Республика Тыва.

The Elegest-Mezhegei, Aptara, and Shivilig forecasted gold ore clusters and the Kharalyg and Irbitei forecasted gold-silver-polymetallic ore clusters were distinguished within the East Tannu-Ola iron-copper-polymetallic-gold ore region, based on examination of historical and new geological, geochemical, and metallogenical data. Subsequently, the Urgailyg, Proezdnoe, and Chumurtuk forecasted gold ore fields were delineated within the Elegest-Mezhegei cluster; the Despen ore field was delineated within the Aptara ore cluster; and the Ovur-Ongesh ore field was outlined within the Shivilig cluster. In addition, the Ulug-Sailyg and Ak-Charinsk gold-molybdenum-copper ore fields were distinguished outside the ore clusters. The article summarizes the investigation history, geological-structural position, geological features, and geochemical specialization of the rocks of the East Tannu-Ola region. Descriptions of the ore clusters embrace peculiarities of their geological structure, ore mineralogy, and native gold, as well as parameters of the gold-sulfide-quartz, gold-skar, gold-containing polymetallic VMS, and porphyry molybdenum-copper mineralized zones. The conclusions highlight the metallogenic epochs and distribution regularities of the gold and gold-containing mineralization within the region studied.

Keywords: metallogenic regionalization, gold, East Tannu-Ola ore region, Tyva Republic.

Для цитирования: Черных А. И., Широбоков А. Ю., Арсентьева И. В. Металлогения золота Восточно-Таннуольского рудного района (Республика Тыва). Руды и металлы. 2021. № 2. С. 40–67. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10010.

For citation: Chernykh A. I., Shirobokov A. Yu., Arsentieva I. V. Gold metallogeny of the East Tannu-Ola ore region, Tyva Republic. Ores and metals 2021, № 2, pp. 40–67. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10010.



Восточно-Таннуольский рудный район (ВТРР) имеет железо-медно-полиметаллически-золоторудную специализацию, расположен в юго-западной части Республики Тыва, в 50 км от г. Кызыл. Рудный район площадью около 6140 км² вытянут на 135 км в широтном направлении от р. Ирбитей на западе до р. Шурмак на востоке (рис. 1). В материалах комплекта Госгеолкарты-200/2 (лист М-46-Х) и Госгеолкарты-1000/3 [4] ВТРР был назван Деспенским, однако вслед за тувинскими геологами (В. И. Лебедевым, А. А. Монгушем, В. Н. Чучко, С. А. Яровым и многими другими) нами используется традиционное название.

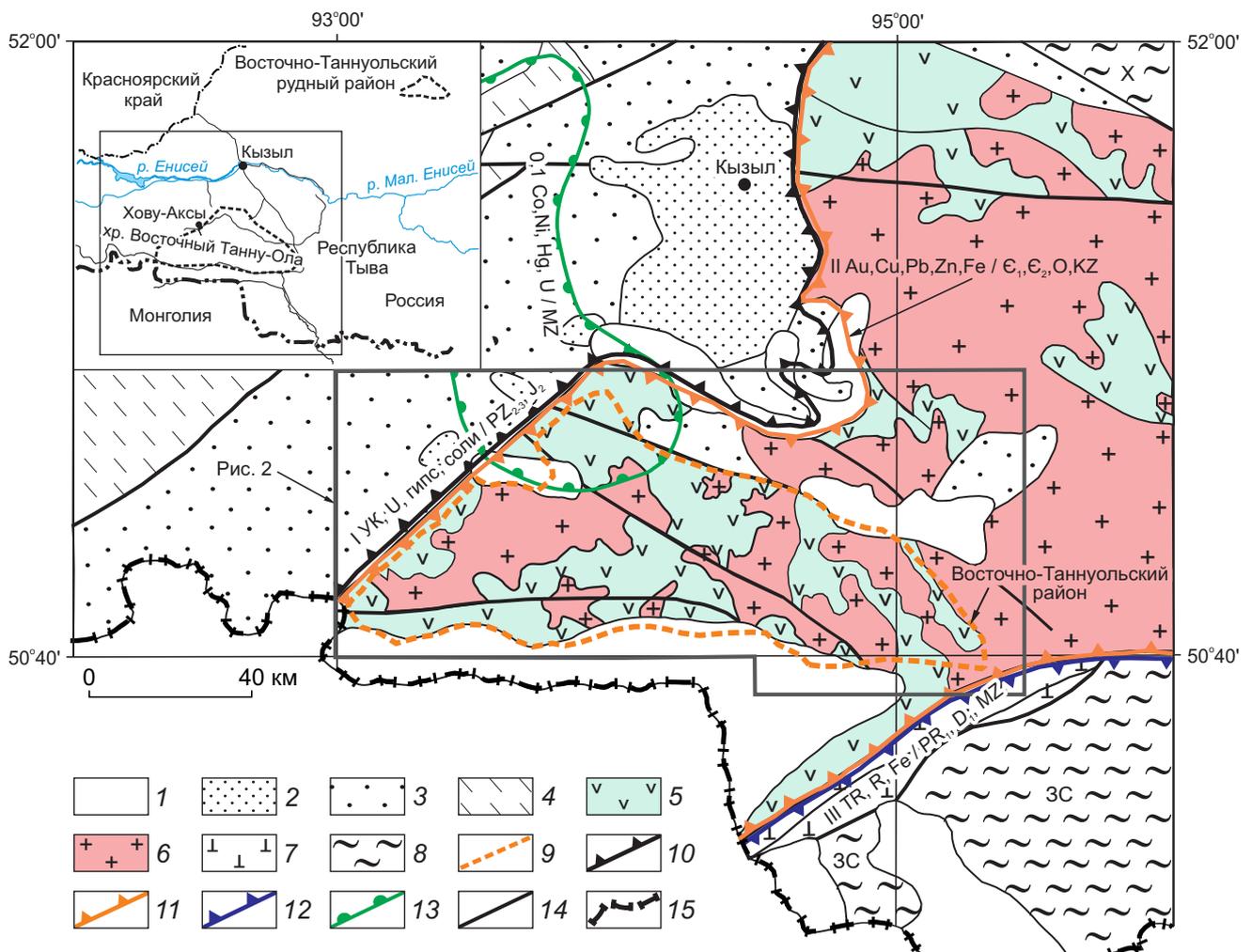
Восточно-Таннуольский рудный район орографически приурочен к системе горных отрогов субширотно вытянутого хребта Восточный Танну-Ола и в связи с плохой доступностью изучен сравнительно слабо. Первые сведения о полезных ископаемых территории рудного района получены ещё в XIII–III веках до н. э., о чём свидетельствуют многочисленные выработки (неглубокие шахты и мелкие карьеры) этого времени для добычи золота, меди и железа [6]. В новейшей истории упоминания о добыче россыпного золота в Тыве появляются в 1839 г. Первые задокументированные работы по изучению золотоносности территории ВТРР проводились в 1911–1914 гг. К. И. Иваницким, который обнаружил кварцевую жилу с ковеллином, халькопиритом, лимонитом, малахитом и золотом в правобережье р. Овур-Онгеш.

Систематическое изучение геологии и полезных ископаемых Тывы и Восточно-Таннуольского района началось с середины 40-х гг. XX в. Поисковые работы велись в крайне незначительном объёме и были начаты в конце 40-х гг. В. П. Масловым (1947 г.), Д. И. Суворовым (1948 г.), А. Л. Додиныным (1948 г.), В. Н. Старостиным (1949 г.), Я. С. Зубрилинным (1949 г.), Г. М. Владимирским (1952 г.) и др. В 50–70 гг. выполнялись геолого-съёмочные работы масштабов 1:200 000 и 1:50 000 под руководством Г. Н. Лукашева (1958, 1961, 1962 гг.), В. Н. Чучко (1965 г.), В. И. Лебедева (1968 г.), Я. В. Сарбаа (1971 г.), А. Н. Митуса (1976 г.). Большое значение для характеристики особенностей вторичных геохимических полей Восточно-Таннуоль-

ского рудного района имели геохимические работы 1987–1990 гг. масштаба 1:200 000 под руководством С. А. Ярового (1990 г.). Впервые специализированные поисковые работы на золото проведены сотрудниками АО «СНИИГГиМС» (А. Ю. Ширококов, А. И. Черных, М. В. Викторов и др.) в 2012–2014 гг. в южной части ВТРР на Деспенской площади, а в 2016–2017 гг. в северной части на Ургайлыгской площади (А. Ю. Ширококов, В. В. Меркулов, М. А. Шеин и др.). В 2014–2016 гг. для западной части ВТРР (лист М-46-Х) геологами СНИИГГиМСа (Е. В. Ветров, А. И. Черных, А. Н. Уваров и др.) выполнены работы по ГДП-200. Исследования 2012–2020 гг. на территории ВТРР позволили получить современные данные о магматизме, геохимии, возрасте и полезных ископаемых [1–3, 8–13]. В настоящей статье приводятся результаты металлогенического анализа имеющихся и вновь полученных данных, отражающих закономерности распространения золотого и золотосодержащего оруденения ВТРР, и особенности минералогического состава руд.

Геолого-структурное положение и геологическое строение. Восточно-Таннуольский рудный район приурочен к одноимённой складчатой подзоне в юго-западной части Таннуольско-Улугойской (Верхнеенисейской) складчатой зоны (рис. 2, см. рис. 1). С севера и запада он граничит с отложениями Центрально-Тувинского герцинско-эпигерцинского прогиба, который сложен преимущественно терригенными и карбонатно-терригенными породами континентальных, реже морских, фаций ордовикского, силурийского, девонского и каменноугольного возрастов. С юга граница проведена по геолого-геофизическим данным под отложениями Убсунурской впадины, сложенной миоценовыми (конгломераты, песчаники, глины, мергели) и четвертичными (галечники, валунники, пески) отложениями. В юго-восточной части граничит с Западно-Сангиленским блоком, от которого отделён Агардагским разломом, контролирующим положение Южно-Тувинского офиолитового пояса.

Положение границы ВТРР хорошо согласуется с геофизическими данными. В магнитном поле он выделяется высокоградиентной



областью положительных магнитных аномалий со сложной мозаичной внутренней структурой. Для территории района характерны мелкие контрастные узколинейные и изометрические положительные локальные аномалии интенсивностью до 2500 нТл. В гравитационном поле ВТРР выражен положительными аномалиями эллипсовидной и округлой форм, ограниченными гравитационными ступенями со значениями горизонтального градиента до 2 мГал/км. В восточном направлении интенсивность аномалий снижается, и они характеризуются отрицательными значениями.

Металлогения ВТРР определяется особенностями геологического строения и вещественного состава пород, представленных островодужной и аккреционно-коллизивной ассоциациями [3, 9, 10]. Сложен преимущественно

ранне-среднекембрийскими вулканогенно-осадочными породами кадвойской (E_1), серлигской (E_1), ирбитейской (E_1) и манайлыгской (E_2) свит. На основании геологических данных предполагается, что образование вулканогенно-осадочных пород происходило в две стадии. В раннюю формировались вулканиты толеитовой серии базальт-андезит-риолитового состава с прослоями туфов, туффитов и известняков кадвойской и серлигской свит. В более позднюю стадию образовывались породы ирбитейской свиты (глинистые и рифогенные известняки, песчаники, алевролиты, эффузивы, туфы) и манайлыгской свиты (алевролиты, прослой туфов и эффузивов кислого состава). Возраст риодацитов серлигской свиты определяется многочисленными геологическими данными как раннекембрийский. Изуче-

Рис. 1. Схема геолого-структурного положения Восточно-Таннуольского рудного района:

1 – впадины, выполненные кайнозойскими континентальными отложениями; 2 – впадины, выполненные мезозойскими угленосными отложениями; 3 – средне-верхнепалеозойские породы Центрально-Тувинского прогиба; 4 – карбонатно-терригенные породы каледонской Западно-Саянской складчатой системы; структуры Таннуольско-Улугуйской складчатой зоны: 5 – ранне-среднекембрийские островодужные вулканогенно-осадочные породы, 6 – кембрийско-ордовикские интрузивные породы аккреционно-коллизивной ассоциации (габбро, диориты, гранитоиды, плагиограниты); 7 – венд (?)–раннекембрийские породы Южно-Тувинского офиолитового пояса; 8 – Западно-Сангиленский (ЗС) и Харальский (Х) выступы, сложенные глинистыми сланцами, гнейсами и мраморами протерозойско-рифейского возраста; 9 – граница Восточно-Таннуольского рудного района; металлогенические зоны: 10 – Центрально-Тувинская I (каменный уголь, U, гипс, соли), 11 – Таннуольско-Улугуйская II (Au, Cu, Pb, Zn, Fe), 12 – Сангиленская III (редкие, редкоземельные металлы, Fe); 13 – Баян-Хольский рудный район (Co, Ni, Hg, U); 14 – разломы; 15 – граница РФ

Fig 1. Schematic map showing the geological-structural position of the East Tannu-Ola ore region:

1 – depressions filled with Cenozoic continental sediments; 2 – depressions filled with Mesozoic coal-bearing sediments; 3 – Middle-Upper Paleozoic rocks of the Central Tyva trough; 4 – carbonate-terrigenous sediments of the Caledonian West Sayan fold system; structures of the Tannu-Ola–Ulugoi fold zone: 5 – Early Cambrian island arc volcanosedimentary rocks, 6 – Cambrian-Ordovician intrusive rocks of accretionary-collisional association (gabbro, diorites, granitoids, plagiogranites); 7 – Vendian(?)–Early Cambrian rocks of the South Tyva ophiolite belt; 8 – West Sangilen and Kharal salients composed of shales, gneisses, and marbles of the Proterozoic to Riphean; 9 – boundary of the East Tannu-Ola ore region; metallogenic zones: 10 – Central Tyva I (coal, U, gypsum, salts), 11 – Tannu-Ola–Ulugoi II (Au, Cu, Pb, Zn, Fe), and 12 – Sangilen III (rare-metals, rare-earth metals, Fe); 13 – Bayan-Khol ore region (Co, Ni, Hg, U); 14 – faults; 15 – frontier of the Russian Federation

ние цирконов из риолитов серлигской свиты U-Pb методом (SHRIMP-II, ФГБУ «ВСЕГЕИ») показало их возраст на уровне $508,2 \pm 4,7$ млн лет [1]. Вероятно, полученная датировка отражает омоложение возраста за счёт термального воздействия масштабного гранитоидного среднекембрийско-ордовикского магматизма.

Вулканогенно-осадочные породы кадвуйской и серлигской свит прорываются раннекембрийскими небольшими интрузиями предположительно майнского комплекса. Породы разделены на две фазы – роговообманковые и кварцевые габбро первой фазы и роговообманково-биотитовые диориты, гранодиориты, плагиограниты, тоналиты и лейкоплагиограниты второй. Породы майнского комплекса рассматриваются как комагматы вулканитов кадвуйской и серлигской свит. Особенности петрохимического, геохимического и изотопно-геохимического составов свидетельствуют о принадлежности гранитоидов майнского комплекса ВТРР к породам островных дуг [2, 3, 10] и хорошо сопоставляются с аналогичными породами Западного Саяна. Результаты ранее про-

ведённых изотопно-геохронологических исследований пород майнского комплекса [5, 7] и вновь полученные нами результаты U-Pb датирования по циркону (SHRIMP-II, ФГБУ «ВСЕГЕИ») [3, 10] указывают на возраст пород на уровне 518–541 млн лет.

Породы островодужной ассоциации прорываются массивами габбродиорит-гранодиорит-плагиогранитовой (таннуольский комплекс, E_{2-3}) и гранит-лейкогранитовой (арголикский комплекс, O) формаций. Становление пород таннуольского комплекса происходило на ранней, а арголикского – на завершающей стадии аккреционно-коллизивного этапа формирования Таннуольско-Улугуйской складчатой зоны. В небольших узких грабенах локально развиты ордовикские вулканогенно-осадочные отложения (деспенская толща), сформированные на аккреционно-коллизивной стадии.

Породы таннуольского комплекса представлены габбро, габбродиоритами, диоритами первой фазы и кварцевыми диоритами, тоналитами, гранодиоритами, плагиогранитами второй. Вещественный состав пород таннуоль-

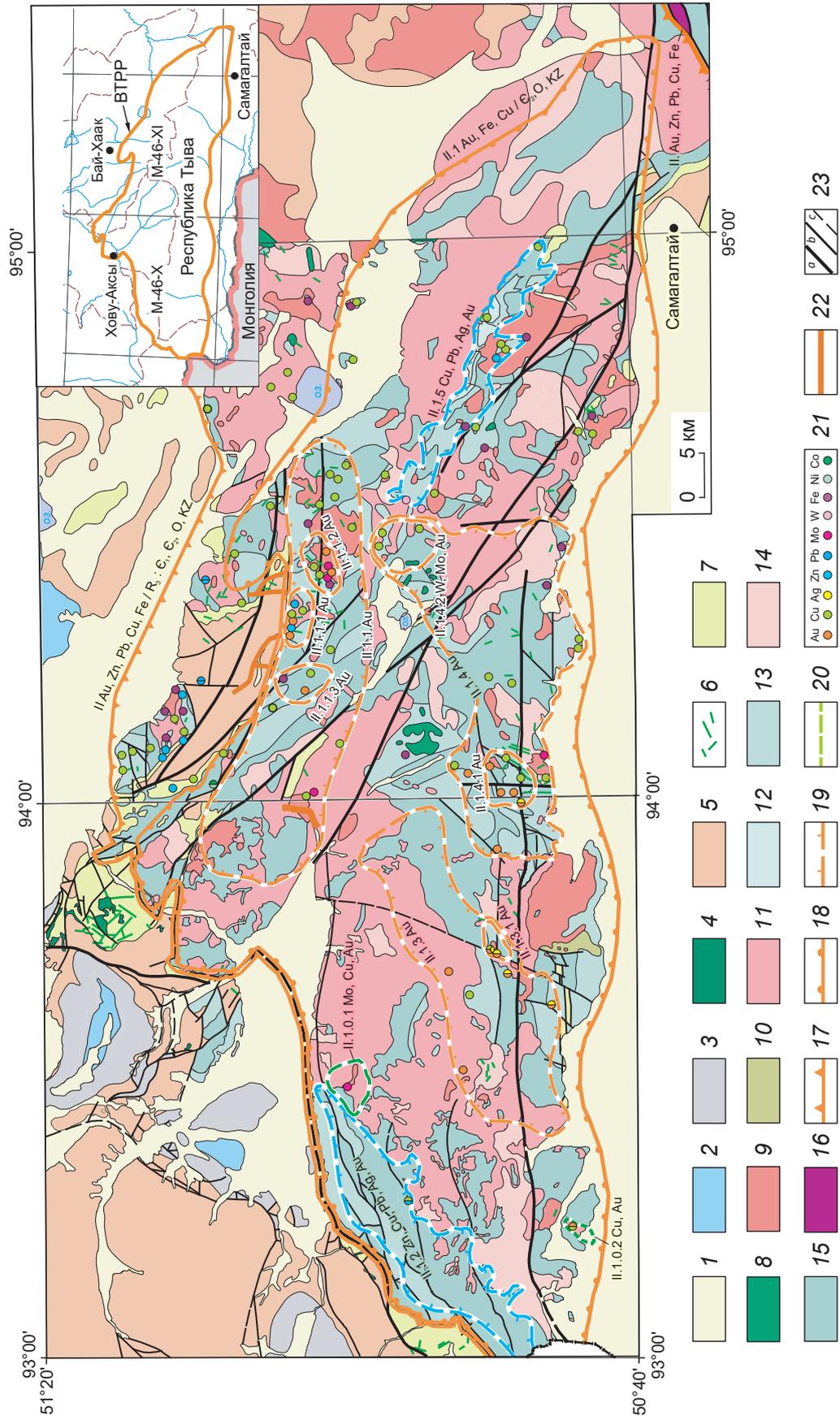




Рис. 2. Обзорная схема геологического строения и металлогенического районирования Восточно-Таннуольского железо-медно-полиметаллически-золоторудно-россыпного района (по материалам ГДП-200, лист М-46-Х):

1 – кайнозойские осадочные отложения; 2 – юрские угленосные терригенные породы; 3 – каменноугольные терригенные породы; 4 – торгальгский сиенит-габбровый комплекс (D_3-C_1); 5 – девонские вулканогенно-осадочные, терригенные и терригенно-карбонатные отложения Центрально-Тувинского прогиба (D_1-D_3); 6 – верхнепалеозойско-мезозойские базитовые дайки; 7 – ордовикско-силурийские терригенные и терригенно-карбонатные отложения Центрально-Тувинского прогиба (O_3-S_2); 8 – мажальгский перидотит-пироксенит-габбровый комплекс (O); 9 – аргонитовый гранодиорит-гранитовый комплекс (O); 10 – деспенская андезит-риодацитовая толща (O_3); 11 – таннуольский габбро-плагиогранитовый комплекс (C_2); 12 – манайльгская свита (C_2); 13 – ирбитейская свита (C_1); 14 – майнский габбро-плагиогранитовый комплекс (C_1); 15 – кадвоянская и серлигская свиты объединённые (C_1); 16 – актовракский дунит-гарцбургитовый комплекс (V- C_1); металлогенические подразделения (цветом показана специализация: Au – оранжевым, цветные металлы – голубым, Cu, Mo, Au – зелёным, W, Mo, Au – фиолетовым); 17 – зоны, 18 – рудные районы, 19 – прогнозируемые рудные узлы, 20 – прогнозируемые рудные поля; 21 – проявления с указанием вида полезных ископаемых; 22 – малое месторождение россыпного золота; 23 – разломы (a – главные, b – второстепенные, c – перекрытые кайнозойскими отложениями); металлогенические подразделения: II – Таннуольско-Улугуйская железо-медно-полиметаллически-золоторудная металлогеническая зона: II.1 – Восточно-Таннуольский железо-медно-полиметаллически-золоторудный район (ВГРР), II.1.1 – Элегест-Межегейский прогнозируемый золоторудно-россыпной узел, II.1.1.1 – Урайлыгское прогнозируемое золоторудное поле, II.1.1.2 – Проездное прогнозируемое золоторудное поле, II.1.1.3 – Чумуртукское прогнозируемое золоторудное поле, II.1.2 – Ирбитейский прогнозируемый золото-серебро-полиметаллический узел, II.1.3 – Аптаринский прогнозируемый золоторудный узел, II.1.3.1 – Деспенское прогнозируемое золоторудное поле, II.1.4 – Шивилигский прогнозируемый золоторудный узел, II.1.4.1 – Овур-Онгешское прогнозируемое золоторудное поле, II.1.4.2 – Верхне-Дургенское золото-вольфрам-медно-молибденное рудное поле, II.1.5 – Харальгский прогнозируемый золото-серебро-полиметаллический узел, II.1.0.1 – Улуг-Сайлыгское прогнозируемое золото-медно-молибден-порфирировое рудное поле, II.1.0.2 – Ак-Чаринское прогнозируемое золото-молибден-медно-порфирировое рудное поле

Fig. 2. Generalized map of the East Tannu-Ola iron-copper-polymetallic placer-lode gold region, showing the geological features and promising metallogenic areas of different orders (compiled using materials of GDP-200, Sheet M-46-X):

1 – Cenozoic sediments; 2 – Jurassic coal-bearing terrigenous rocks; 3 – Carboniferous terrigenous rocks; 4 – Torgalyg syenite-gabbro complex (D_3-C_1); 5 – Devonian volcanosedimentary, terrigenous, and terrigenous-carbonate deposits of the Central Tyva trough (D_1-D_3); 6 – Late Paleozoic-Mesozoic basic dikes; 7 – Ordovician-Silurian terrigenous and terrigenous-carbonate deposits of the Central Tyva trough (O_3-S_2); 8 – Mazhalyk peridotite-pyroxenite-gabbro complex (O); 9 – Argolik granodiorite-granite complex (O); 10 – Despen andesite-rhyodacite sequence (O_3); 11 – Tannuola gabbrodiorite-plagiogranite complex (C_2); 12 – Manalyg formation (C_2); 13 – Irbitei formation (C_1); 14 – Maina gabbro-plagiogranite complex (C_1); 15 – Kadvoi and Serlig formations (C_1), undivided; 16 – Aktovrak dunit-harzburgite complex (V- C_1); boundaries of the metallogenic subdivisions (metallogenic specialisation is shown by colors: Au – orange, base metals – blue, Cu-Mo-Au – green, W-Mo-Au – violet); 17 – metallogenic zones, 18 – ore regions, 19 – forecasted ore clusters, 20 – forecasted ore fields; 21 – ore occurrences (the principal metals are indicated); 22 – minor placer gold deposits; 23 – faults (a – major, b – auxiliary, c – covered with Cenozoic deposits); metallogenic subdivisions: II – Tannu-Ola-Ulgoi iron-copper-polymetallic-gold metallogenic zone: II.1 – East Tannu-Ola iron-copper-polymetallic-gold region; II.1.1 – Elegest-Mezhegei forecasted placer-lode gold cluster; II.1.1.1 – Urgailyg forecasted gold field; II.1.1.2 – Proezdnoe forecasted gold field; II.1.1.3 – Chumurtuk forecasted gold field; II.1.2 – Irbitei forecasted gold-silver-polymetallic ore cluster; II.1.3 – Aptara forecasted gold ore cluster; II.1.3.1 – Despen forecasted gold field; II.1.4 – Shivilig forecasted gold field; II.1.4.1 – Ovur-Ongesh forecasted gold field; II.1.4.2 – Upper Durgan forecasted gold-tungsten-copper-molybdenum ore field; II.1.5 – Kharalyg forecasted gold-silver-polymetallic ore cluster; II.1.0.1 – Ulug-Sailyg forecasted porphyry gold-copper-molybdenum ore field; II.1.0.2 – Ak-Charinsk forecasted porphyry gold-molybdenum-copper ore field

ского комплекса позволяет рассматривать их как аккреционный комплекс [2, 3, 10]. Возраст пород определён U-Pb методом (SHRIMP-II, ФГБУ «ВСЕГЕИ») на уровне 508–492 млн лет.

Арголикский комплекс представлен двуполовошпатовыми, аляскитовыми гранитами, лейкократовыми гранитами и гранит-порфирами, которые слагают небольшие нередко сближенные тела и группы тел. Массивы приурочены к синхронным по возрасту тектоническим зонам, в пределах которых слагающие их гранитоиды подвергнуты катаклазу, разгнейсованию, окварцеванию, эпидотизации. Кроме раннекембрийских вулканитов они прорывают образования ордовикской деспенской толщи и средне-позднекембрийские граниты таннуольского комплекса. Изотопное датирование пород арголикского комплекса U-Pb методом (SHRIMP II, ФГБУ «ВСЕГЕИ») по лейкократовым гранитам показало значения на уровне 451–447 млн лет [2, 3, 10].

Геохимическая специализация геологических комплексов. Геохимическая специализация пород ВТРП закономерно отражает особенности условий их образования и петрографического состава. Результаты спектрального и ИСР анализов первичных и вторичных геохимических полей по более чем 14000 проб, полученных при ГСР-50 и геохимических поисках в 1970–1980 гг. (А. Н. Митус, В. И. Лебедев, Я. В. Сарбаа, С. А. Яровой) и ГДП-200 в 2014–2016 гг., позволили установить повышенное содержание элементов сидеро-халькофильной ассоциации в раннекембрийских вулканогенно-осадочных породах. Кембрийско-ордовикские интрузивные породы (габбродиориты, гранодиориты, плагиограниты, граниты) отличаются сидеро-литофильной специализацией.

Характерной особенностью вулканитов кадвойской и серлигской свит является повышенное содержание меди. В пределах ВТРП широко распространены точечные и площадные геохимические аномалии Cu, Au, Ag, Pb, Zn, Fe, Mo. Аномалии устанавливаются по результатам изучения потоков рассеяния, вторичных и первичных ореолов. Геологическое строение и геохимическая специализация пород определяют металлогеническую специализацию ВТРП

на Au, Cu, Zn, Pb, Ag, Fe, Mo. Анализ пространственного распределения геохимических аномалий позволяет выделить аномальные геохимические узлы, которые в значительной степени отражают положение рудных узлов.

Металлогеническое районирование. Восточно-Таннуольский рудный район расположен на западе Таннуольско-Улугуйской (Верхнеенисейской) металлогенической зоны (см. рис. 1, 2). С запада и севера он граничит с Центрально-Тувинской минерагенической зоной, приуроченной к структурам Центрально-Тувинского прогиба. Она характеризуется преобладанием полезных ископаемых осадочного генезиса – каменного угля коксующихся марок (Актальский и Онкажинский угленосные районы), урана (Южно-Тувинский ураноносный район), галита и гипса (Дус-Дагский соленосный район). С этапом девонской и мезозойской тектоно-магматической активизации связано формирование медно-никель-кобальт-арсенидного оруденения Баян-Хольского рудного района с крупным, в значительной степени обработанным Хову-Аксинским месторождением.

При сравнительно слабой изученности в пределах ВТРП кроме россыпных месторождений золота известны признаки коренного золотого оруденения различных типов. На основании комплексного анализа геологических, геофизических, геохимических и металлогенических данных в пределах ВТРП выделены прогнозируемые Элегест-Межегейский, Аптаринский, Шивилигский золоторудные узлы, Ирбитейский и Харалыгский золотосодержащие полиметаллические, а также медно-молибденовое Улуг-Сайлыгское и молибден-медное Ак-Чаринское рудные поля (см. рис. 2).

Элегест-Межегейский прогнозируемый золоторудно-россыпной узел (II.1.1) расположен в северной части ВТРП в междуречье Кызыл-Эрик – Дурген (см. рис. 2). Территория узла сложена преимущественно островодужными раннекембрийскими вулканогенно-осадочными породами серлигской и ирбитейской свит, прорванными аккреционно-коллизийными средне-позднекембрийскими массивами таннуольского и ордовикскими арголик-



ского комплексов (см. рис. 1, 2). Большое количество небольших интрузивов гранитоидов определяет широкое развитие скарнированных пород и роговиков.

Несмотря на крутой профиль долин рек и неблагоприятные ландшафтно-геоморфологические условия, на северном фланге Элегест-Межегейского узла имеются мелкие россыпи золота. На западе узла известно мелкое россыпное месторождение золота в долинах р. Кызыл-Эрик и её правого притока руч. Джаралыг. На востоке узла аллювиальные россыпи отрабатывались по левым притокам рек Улуг-Шанган (ручьи Михайловский, Петровский), Чинге и Ургайлыг. Суммарный объём добычи учённого золота из россыпей оценивается на уровне 650–700 кг. Содержание золота в россыпях, как правило, высокое – 1–3,6 г/м³. Золото в россыпях характеризуется плохой окатанностью, наличием самородков массой до 10 г, часто находится в сростании с кварцем, иногда в лимонитовой рубашке.

На территории всего узла распространены проявления и пункты минерализации золота, меди и железа. Установлены шлиховые потоки золота, геохимические ореолы и аномалии Cu, Fe, Pb, Zn, Mo, Au, Ag по результатам донного опробования и поисков по вторичным ореолам, потенциально золотоносные метасоматиты, кварцевые жилы, сульфидная минерализация, золото в шлихах и др.

Анализ результатов геолого-съёмочных и поисковых работ (материалы Д. И. Суворова, К. М. Кильчичакова, Я. В. Сарбаа, С. А. Яровога, А. И. Черных, А. Ю. Широбокова) позволил выявить в пределах Элегест-Межегейского узла оруденение золото-сульфидно-кварцевого и золото-скарнового типов. По морфологии и вещественному составу объекты золото-сульфидно-кварцевого типа разделяются на три разновидности – жильные, жильно-прожилковые и жильно-прожилковые в метасоматитах березит-лиственитового состава. Признаки этих типов золотой минерализации распространены по всей территории узла и иногда пространственно совмещаются. По имеющимся данным можно выделить три прогнозируемых рудных поля с преобладанием разных ти-

пов золотой минерализации – Ургайлыгское (II.1.1.1), Проездное (II.1.1.2) и Чумуртукское (II.1.1.3) (см. рис. 2).

Наиболее изучена жильная кварцевая золото-халькопирит-пиритовая минерализация в пределах *Ургайлыгского золоторудного поля*. Здесь ещё в конце 1940-х гг. установлены многочисленные разнонаправленные кварцевые жилы и прожилки как в гранодиоритах таннуольского комплекса, так и в раннекембрийских вулканогенно-осадочных породах. В пределах рудного поля наблюдается концентрация золотоносных кварцевых жил со средним содержанием золота 2–6 г/т, обломков кварца, литохимических аномалий золота на уровне 0,01–0,04 г/т, шлиховых потоков золота. Наиболее типичное жильное проявление – Ургайлыг-1, расположенное в верховьях руч. Кварцевый. Здесь по результатам работ 1950–1970 гг. детально изучены три жилы, а одна из них вскрыта штольной.

Проявление золота Ургайлыгское-1 расположено в эндоконтакте Ургайлыгского диорит-гранодиоритового массива таннуольского комплекса. В поле диоритов отмечаются участки кварцевых, иногда кальцит-кварцевых жил и прожилков, ориентированных главным образом в северо-восточном направлении. Ширина выхода окварцованных пород до 20–30 м. Преобладают прожилки мощностью от 5 до 30 мм, среди которых фиксируются более мощные жилы – до 1,5 м. Средняя мощность жилы № 3 – 0,65 м, в раздувах до 2,5 м. Сложена желтовато-серым кварцем с вкрапленностью сульфидов до 15 % (пирит, халькопирит, борнит, реже галенит и сфалерит). Содержание золота крайне неравномерное от следов до 58,2 г/т, в среднем по 56 пробам 6,2 г/т. В отдельных пробах содержание Pb до 3–3,5 %, Zn до 0,25 %, Cu более 1 %. Жила № 2 находится в 150 м северо-западнее жилы № 3. Мощность жилы от 0,4 до 1,0 м, сложена беловато-серым кварцем с вкрапленностью пирита и халькопирита. Содержание золота колеблется от 0,5 до 62 г/т, в среднем 21,6 г/т.

Проездное золоторудное поле (II.1.1.2) приурочено к тектонически осложнённому северному контакту Орту-Адырского массива танну-

ольского комплекса, прорванного небольшим массивом арголикского комплекса (см. рис. 2). Здесь установлены эндо- и экзоскарны, зоны окварцевания и кварцевые жилы. На водоразделе ручьев Чинге и Проездной выделяются скарноиды и гранат-пироксеновые скарны, развитые преимущественно по известнякам. Скарнированные породы изучались, в первую очередь, в связи с развитой в них магнетитовой минерализацией. Здесь в 1948 г. А. Л. Додинным выявлены Дургеновское и ряд более мелких проявлений железа.

По результатам геохимических поисков масштаба 1:200 000 (С. А. Яровой) по руч. Проездной и его левым притокам обнаружены выдержанные аномальные потоки золота с содержаниями от 12 до 1000 мг/т. Поиски по вторичным ореолам в левобережье руч. Проездной позволили выявить две комплексные геохимические аномалии Pb (0,0012–0,01 %), Zn (0,01–0,04 %), Cu (0,004–0,06 %), Au (10–50 мг/т), Mo (до 0,0002 %). Максимальные концентрации золота в ореолах рассеяния отмечаются вдоль тектонического нарушения субширотного простирания в экзоконтакте Орту-Адырского массива и связаны с участками эпидотизации, пиритизации и окварцевания. В аллювии руч. Проездной и его левых притоков установлены шлиховые потоки золота.

Повышенные содержания золота определены по единичным маломощным сечениям в сульфидизированных эпидот-гранат-пироксеновых скарнах с магнетитом в северной контактовой зоне Орту-Адырского массива. На этой территории скарны образуют небольшие линзы мощностью 1–5 м и протяженностью по простиранию от 10 до 100 м. Высокая золотоносность (1–3,5 г/т) устанавливается в окварцованных и интенсивно сульфидизированных скарнах.

К. М. Кильчичаковым (1973 г.) в поле гранодиоритов Орту-Адырского массива выявлена зона березитизированных пород пирит-кварц-серицит-плагиоклазового состава, прослеженная на 2 км. Содержание золота в березитах достигает 0,5 г/т. Также отмечаются повышенные содержания Cu до 0,3 %, Mo до 0,0001% и Ag 1–5 г/т.

В западной части Проездного рудного поля известны грейзенизированные граниты с пиритовой, халькопиритовой и молибденитовой минерализацией. В брекчированных, окварцованных разностях грейзенизированных пород возрастает содержание золота с сотых долей до первых граммов на тонну. К одной из таких зон приурочено Адырское проявление золота и молибдена с содержаниями Cu от 0,003 до 0,3 %, Mo от 0,001 до 0,06 %, Ag от 3,8 до 20,6 г/т, Au от 0,01 до 0,7 г/т.

Чумуртукское золоторудное поле (II.1.1.3) расположено в центральной части Элегест-Межегейского узла в верховьях р. Чумуртук. Исходя из геологических и геофизических данных можно предположить, что рудное поле находится в надкровельной части интрузивного массива гранодиоритового состава. Здесь в 1970-х гг. по результатам ГСР-50 обнаружены многочисленные развалы кварца и единичные кварцевые жилы. Кроме кварцевых жил в верховьях руч. Михайловский установлена зона прокварцевания и сульфидизации мощностью до 20 м, представленная серией мелких кварцевых прожилков и линз среди метасоматитов. Зоны метасоматитов сопровождаются интенсивной пиритизацией вулканитов. По единичным пробам определено содержание Au до 0,7 г/т как в кварцевых жилах, так и в сульфидизированных вулканитах.

Изучение кварцевых жил Чумуртукского золоторудного поля, выполненное С. А. Яровым (1990 г.), позволило выявить содержание Au в кварцевых жилах на уровне 0,01–0,7 г/т, а в единичных пробах до 3 г/т. Кроме того, найдены интенсивно рассланцованные туфы и туфобрекчии порфиритов ирбитейской свиты, сильно прокварцованные, с прожилками кварца и сульфидизированные. Более позднее изучение этих и вновь установленных зон сотрудниками АО «СНИИГГиМС» позволило выделить три линейные минерализованные зоны мощностью до 15–20 м, прослеженные на несколько сотен метров. Зоны сложены метасоматитами пирит-кварц-серицит-анкеритового состава с сульфидно-кварцевыми прожилками. Метасоматиты развиваются преимущественно по туффитам, туфам и эффузивам основ-



ного–среднего состава. На отдельных участках метасоматиты подверглись брекчированию и дополнительному окварцеванию. В пределах метасоматических минерализованных зон кварцевые прожилки имеют разное направление. Сульфиды в метасоматитах представлены пиритом, количество которого достигает 10–20 %. Содержание Au в метасоматитах составляет, как правило, 0,01–0,3 г/т, на участках интенсивного прокварцевания зафиксированы интервалы со средним содержанием от 2 до 6 г/т на мощность от 1,6 до 6 м.

Аптаринский прогнозируемый золоторудный узел (П.1.3) расположен в южной части Восточно-Таннуольского района (см. рис. 2). Приурочен к тектонически осложнённому юго-восточному контакту Унгешского ареал-плутона и мелким массивам-сателлитам, которые прорывают породы кадвойской, серлигской и ирбитейской свит. Северо-западной границей узла служит эндоконтактовая часть плутона, сложенная преимущественно диоритами первой фазы таннуольского комплекса, прорванными гранитоидами второй фазы и мелкими массивами ордовикского арголикского комплекса. Юго-восточная граница проведена по экзоконтактовой надынтрुзивной части плутона, сложенной раннекембрийскими вулканогенно-осадочными породами. Учитывая геофизические данные, наличие выходящих на дневную поверхность многочисленных апофиз и небольших массивов сателлитов среди вулканитов вдоль юго-восточного контакта плутона, можно предположить его пологое падение под раннекембрийские породы. Для данного узла характерно наличие потенциально промышленного оруденения золото-скарнового, жильного и прожилкового (штокверкового) золото-сульфидно-кварцевого типов.

В наиболее исследованной на золото юго-восточной части Аптаринского узла, в междуречье Биче-Серлиг – Деспен, выделено *Деспенское прогнозируемое золоторудное поле (П.1.3.1)* [9]. Оно приурочено к провису кровли между Унгешским плутоном на северо-западе и группой разновозрастных массивов – Биче-Серлигским (О), Дыттыгхемским и Деспенским (Є₂₋₃) – на юго-востоке, в зоне пересечения крупных

разломов северо-восточного (Биче-Сайлыгский) и субширотного (Южно-Таннуольский) направлений. Золотое оруденение концентрируется в пределах небольшого участка (около 11 км²) на тектонически осложнённых крыльях Биче-Серлигской синклинали, чаще всего на контакте пород серлигской и ирбитейской свит (рис. 3).

Примером золотого оруденения в скарнах служит проявление Кварцевое. Оно расположено в центральной части Деспенского золоторудного поля, с поверхности проявлено вторичным геохимическим ореолом с содержанием Au 0,06–1,36 г/т. Проявление представлено окварцованными и сульфидизированными апоизвестковыми скарнами в экзоконтактовой зоне диоритов и плагиогранитов таннуольского комплекса с вулканогенно-осадочными породами серлигской свиты. Скарнированные породы прорываются массивом арголикского комплекса с возрастом 447 ± 2 млн лет [10].

Скарны состоят из четырёх основных минералов: граната, клинопироксена, волластонита и кальцита, иногда присутствует везувиан. Характерно наличие в золотоносных скарнированных породах многочисленных мелких, часто субпараллельных сульфидно-кварцевых прожилков мощностью 1–5 см, реже сульфидно-кварцевых жил мощностью 0,3–0,5 м (рис. 4). Количество кварца в скарнах достигает 30–40 %. Рудные минералы (0,5–5 %) образуют вкрапленность, иногда мелкие прожилки. Основными сульфидными минералами являются халькопирит, борнит и халькозин. Гораздо реже встречаются пирит, галенит, сфалерит, ковеллин и тетраэдрит, иногда гессит, акантит, науманнит, самородное золото. Кроме того, в рудах часто отмечаются магнетит и вторичные минералы – гематит, лимонит, гётит, малахит, хризокolla, ковеллин, куприт.

Скарнированные породы отличаются повышенным содержанием золота, как правило, 0,01–0,09 г/т. На участках, где на скарны наложена золото-сульфидно-кварцевая минерализация, оно повышается. Максимальное содержание золота в отдельных бороздовых пробах составляет 29 г/т, в штуфных – 86 г/т. Мощность рудных интервалов по данным бороздо-

Рис. 3. Геолого-поисковая схема прогнозируемого Деспенского золоторудного поля:

1 – ирбитейская свита (туфы смешанного состава, туфобрекчии, туфопесчаники, мраморизованные известняки); 2 – серлигская свита (андезибазалты, андезибазальтовые порфириды, андезиты, мраморизованные известняки, песчаники, алевролиты); 3 – кадвойская свита (метаморфизованные базальты, туфы, туфобрекчии, порфириды основного–среднего состава, известняки); 4 – арголикский комплекс (граниты, лейкограниты); таннуольский комплекс: 5 – граниты и плагиограниты второй фазы, 6 – габбродиориты, диориты, кварцевые диориты первой фазы; 7 – известняки, известняки мраморизованные светло-серые, серые; 8 – известняки с прослоями серых песчаников, алевролитов; 9 – туфы основного состава; 10 – граниты, лейкограниты; 11 – граниты, плагиограниты, тоналиты; 12 – габбродиориты, диориты, кварцевые диориты; 13 – торгалыкский и чазадырский комплексы нерасчленённые (габбродолериты, базальтовые порфириды, долериты); 14 – скарны и скарнированные породы с кварц-сульфидными прожилками; 15 – ороговикование; 16 – метасоматические изменения: *a* – эпидотизация, *b* – окварцевание, *c* – сульфидизация; 17 – разломы; 18 – элементы залегания слоёв: *a* – наклонное, *b* – субвертикальное; 19 – размер выделения полезного ископаемого: *a* – проявление, *b* – точка минерализации; 20 – вид полезного ископаемого: *a* – золото, *b* – серебро, *c* – медь

Fig. 3. Geological prospecting scheme of the Despen forecasted gold field:

1 – Irbitei formation: tuffs of mixed composition, tuff breccias, tuff sandstones, marbleized limestones; 2 – Serlig formation: andesibasalts, andesibasalt porphyrites, andesites, marbleized limestones, sandstones, siltstones; 3 – Kadvoi formation: metamorphosed basalts, tuffs, tuff breccias, porphyrites of basic to intermediate composition, limestones; 4 – Argolik complex: granites, leucogranites; Tannuola complex: 5 – granites and plagiogranites (second phase), 6 – gabbrodiorites, diorites, quartz diorites (first phase); 7 – light gray and gray limestones and marbleized limestones; 8 – limestones with intercalations of gray sandstones and siltstones; 9 – basic tuffs; 10 – granites, leucogranites; 11 – granites, plagiogranites, tonalities; 12 – gabbrodiorites, diorites, quartz diorites; 13 – Torgalyk and Chazadyr complexes, undifferentiated: gabbrodolerites, basalt porphyrites, dolerites; 14 – skarns and skarnified rocks with quartz-sulfide veinlets; 15 – hornfelsing; 16 – metasomatic alterations: *a* – epidotization, *b* – silicification, *c* – sulfidation; 17 – faults; 18 – layer attitudes: *a* – oblique, *b* – subvertical; 19 – scope of the mineral object: *a* – ore occurrence, *b* – mineral indication; 20 – metal: *a* – gold, *b* – silver, *c* – copper

ром до 0,5–2 мм (см. рис. 5, *d–f*). Кроме того, можно предположить, что золото присутствует и в медных минералах – борните, халькопирите и халькозине. Это обосновывается высокой положительной корреляцией золота и меди в геохимических пробах из коренных пород Деспенского золоторудного поля. Пробность золота варьирует от 793 до 910 ‰, при этом выделяются два максимума по пробности – 820 и 890 ‰. В золоте кроме серебра присутствует примесь меди до 0,2 % и в единичных случаях ртути (в отдельных зёрнах до 2,7 %).

По Деспенскому золоторудному полю ФГБУ «ЦНИГРИ» апробированы прогнозные ресурсы золота категории P_2 42,7 т до глубины 100 м и при среднем содержании золота 2,41 г/т.

Золотое оруденение золото-сульфидно-кварцевого типа распространено по всей площади Аптаринского узла. По морфологичес-

ким особенностям выделяются две разновидности – жильная и штокверковая. Первая представлена одиночными жилами или мощными линзами с серией апофиз. Мощность таких жил составляет обычно от 0,5 до 1,5 м, в единичных случаях достигает 3–9 м. К участкам повышенной дислоцированности, преимущественно раннекембрийских вулканогенных пород, приурочены штокверковые зоны, сложенные мало-мощными кварцевыми прожилками и жилами. Иногда в штокверках выделяются стволые жилы мощностью до 0,8 м, однако потенциально золотоносными являются все породы, насыщенные кварцевыми прожилками.

Жилы и прожилки сложены преимущественно кварцем (93–97 %), иногда встречаются эпидот, реже – хлорит, альбит, кальцит, анкерит. Рудные минералы – пирит, халькопирит, борнит, халькозин, магнетит, гематит – содер-

жаты в переменных количествах, как правило, на уровне 1–3 %. Выделяются жилы с преобладанием пирита или халькопирита. Обычно в жилах с преобладающей халькопиритовой минерализацией содержание золота более высокое и выдержанное, что, вероятно, отражает наличие его внутри медьсодержащих сульфидов. С поверхности в сульфидсодержащих жилах развиты лимонит, малахит, хризоколл, азурит, гётит, гидрогётит.

Примером золоторудной жильной золото-сульфидно-кварцевой минерализации с преобладанием пирита являются проявления и пункты минерализации в бассейнах рек Сувагтыг, Онгеш, Аптара, Чайлаг-Хем, Хошуктыг и др. Здесь обнаружены маломощные (0,1–0,7 м) кварцевые, реже эпидот-кварцевые и анкерит-кварцевые жилы с неравномерной вкрапленностью кристаллов пирита кубического, реже пентагон-додокаэдрического габитуса размером 1–4 мм в количестве около 0,5–3 %. Широко распространены лимонит, гётит, гидрогётит. Редко встречаются халькопирит, борнит, малахит. Содержание золота в жилах составляет 0,1–1 г/т, иногда достигает по бороздовым пробам 5,57 г/т.

На территории Аптаринского узла наиболее распространены жилы, в которых вместе с пиритом или без него присутствуют халькопирит, борнит и другие медьсодержащие минералы (водораздел рек Улуг-Серлиг и Хольчук-Холий, правобережье р. Чайлыг-Хем, верховья р. Хураган-Хем и др.). Рудные минералы содержатся в переменных количествах, в основном, на уровне 1–5 %. Распределение сульфидов по жилам гнездово-вкрапленное, на отдельных участках их количество может достигать 15–25 %. Содержание Au в них составляет 6,1 г/т, Cu 2,3 %, Ag 2,33 г/т.

На водоразделе рек Чайлыг-Хем и Хошуктыг, на площади около 5,4 км², широко развиты кварцевые жилы и штокверки как с пиритовой, так и с халькопиритовой минерализацией. Большая часть жил приурочена к контакту пород таннуольского комплекса и вулканогенных пород серлигской свиты, слагающих небольшие фрагменты в провисах кровли массива. Содержания золота в кварцевых жилах

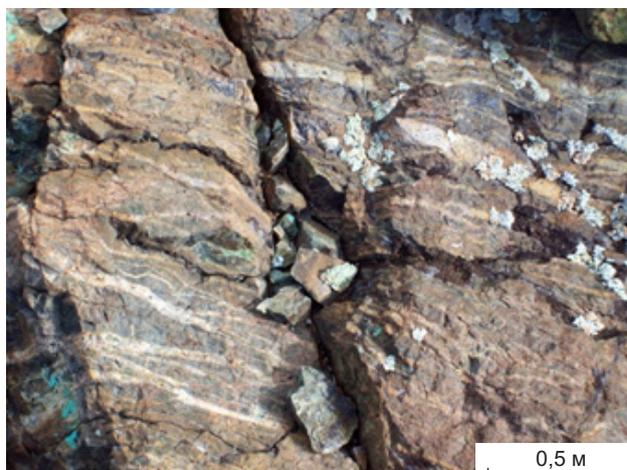


Рис. 4. Гранат-пироксеновые скарны с многочисленными субпараллельными сульфидно-кварцевыми прожилками, Деспенское золоторудное поле

Fig. 4. Garnet-pyroxene skarns with numerous subparallel sulfide-quartz veinlets, Despen gold field

варьируют в значительных пределах и, вероятно, отражают его крайне неравномерное распределение. В некоторых жилах нами определены содержания Au до 1,55 г/т. На отдельных участках, приуроченных к интенсивно дислоцированным породам, зонам пересечения разломов различного направления развиты кварцевые штокверки, содержащие вкрапленную медьсодержащую с золотом сульфидную минерализацию. Наиболее мощная зона штокверковой золото-сульфидно-кварцевой минерализации с шириной выхода на поверхность около 120 м обнаружена в диоритах первой фазы таннуольского комплекса. Мощность отдельных жил от 1 до 10 см, максимальная 0,8 м. Жилы штокверка включают минерализацию халькопирита, гётита, азурита и малахита. Халькопирит наблюдается в виде вкрапленности, на некоторых участках образует гнезда до 2 см в сечении. Содержание Cu 9 %, Ag 4,8 г/т, Au 0,67 г/т (штуфная проба).

В юго-восточной части ВТРП выделяется **Шивилигский прогнозируемый золоторудный узел (II.1.4)** (см. рис. 2), аналогичный по

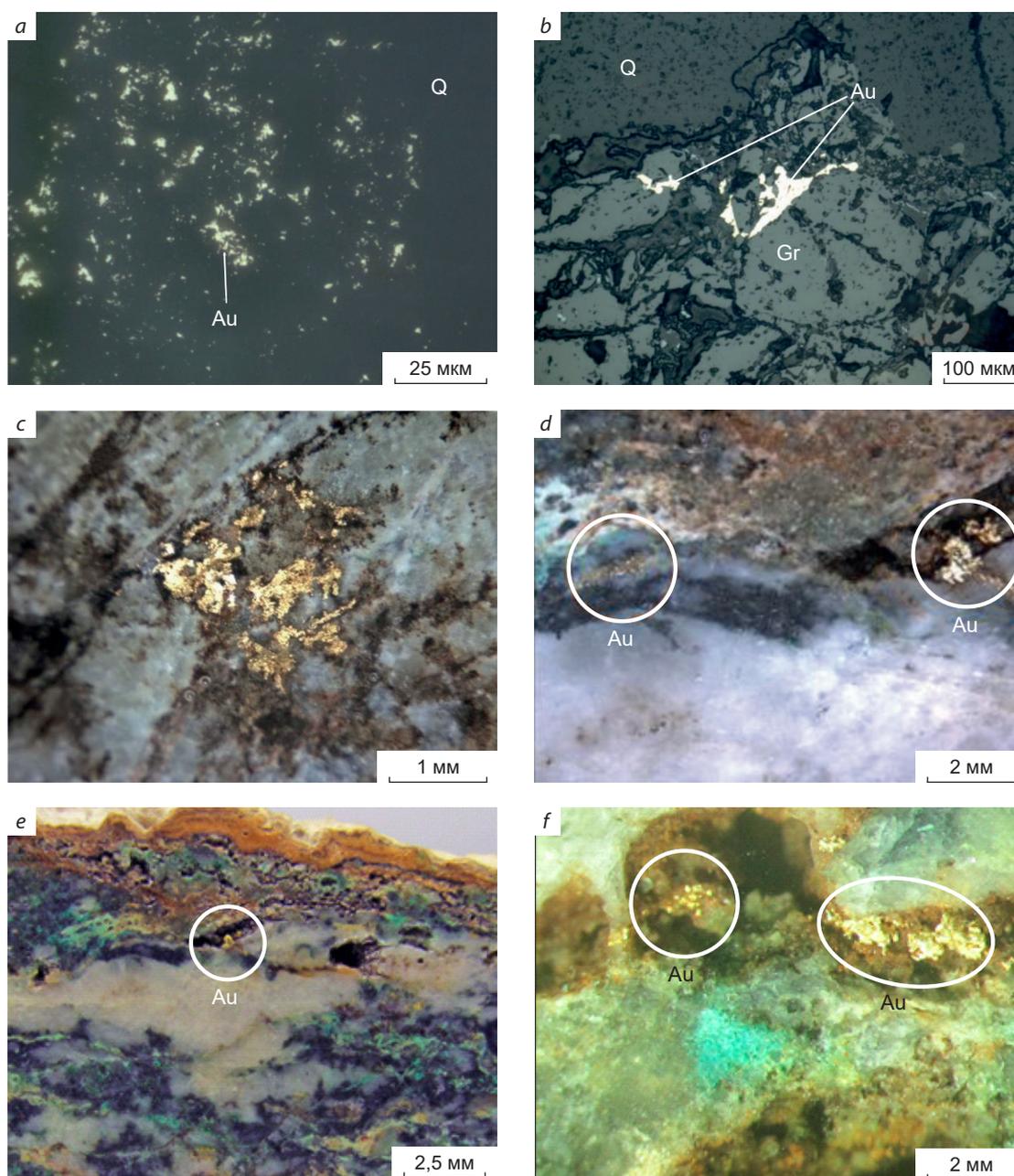


Рис. 5. Золото в окварцованных и сульфидизированных скарнах Деспенского золоторудного поля:

a – тонкая вкрапленность золота в кварце; *b* – золото в трещинах в гранате; *c* – золото с гидроксидами железа в гранат-кварцевом агрегате; *d–f* – выделения видимого золота в окварцованных скарнах с халькопиритом, халькозином, малахитом, лимонитом; Q – кварц; Au – золото; Gr – гранат

Fig. 5. Gold in polished sections from silicified and sulfidized skarns of the Despen gold field:

a – fine dissemination of gold in quartz; *b* – gold within cracks in garnet; *c* – gold with iron hydroxides in garnet-quartz aggregate; *d–f* – visible gold segregations in silicified skarns with chalcopyrite, chalcocite, malachite, limonite; Q – quartz; Au – gold; Gr – garnet

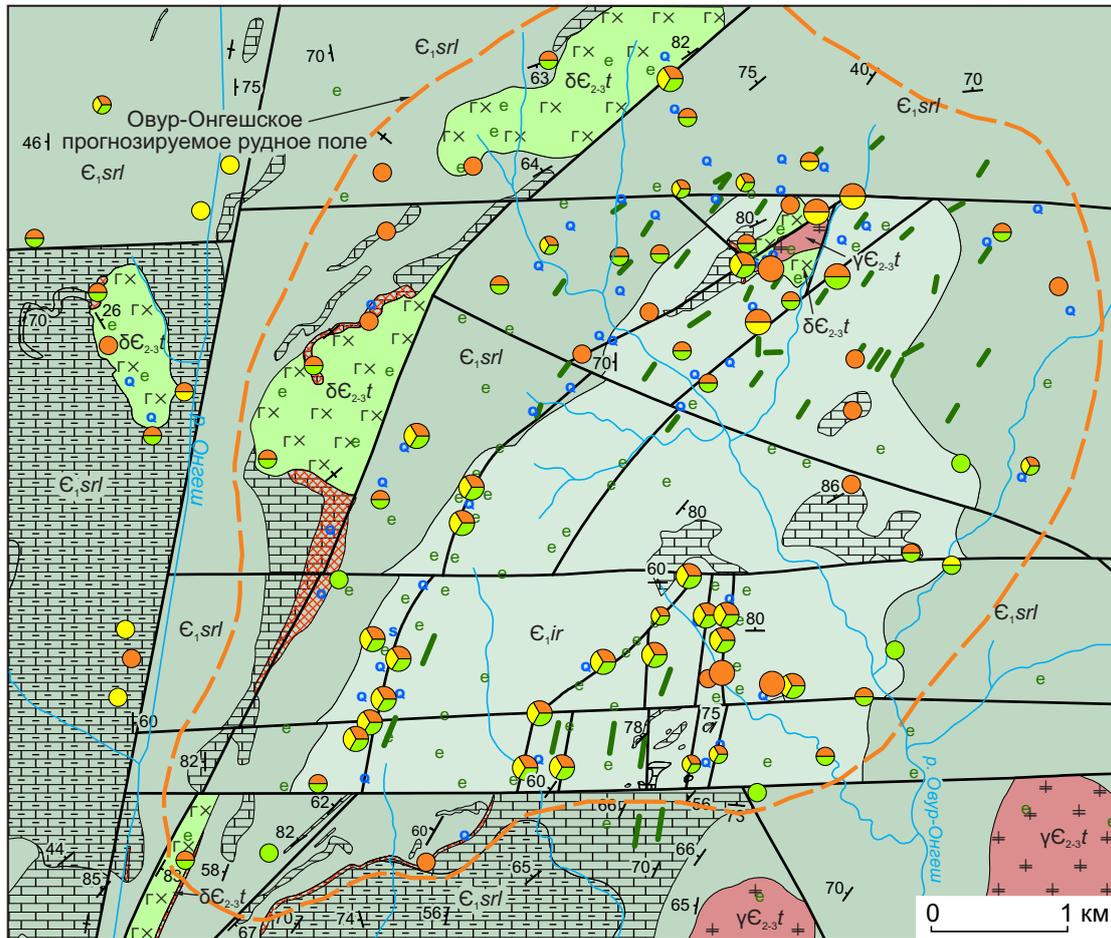


Рис. 6. Геолого-поисковая схема Овур-Онгешского золоторудного поля:
усл. обозн. см. рис. 3

Fig. 6. Geological-prospecting scheme of the Ovr-Ongesh gold field:
see Fig. 3 for legend

геологическому строению и типу оруденения Аптаринскому и Элегест-Межегейскому узлам. Здесь широко распространено золото-сульфидно-кварцевое жильное и прожилковое, а также золото-скарновое оруденение. Кроме того, в южной части известны единичные находки медно-молибденовой минерализации в глыбах кварца и гранитов таннуольского комплекса. В северо-восточной части на основании анализа геологических данных, результатов геохимических поисков масштаба 1 : 200 000 околтурено прогнозируемое *Верхне-*

Дургановское золото-вольфрам-медно-молибденовое рудное поле (II.1.4.2).

В юго-западной части узла выделено *Овур-Онгешское золоторудное поле (II.1.4.1)*. В его пределах в 2012–2014 гг. в небольшом объеме проведены поисковые работы. Золоторудное поле приурочено к синклинали с осью, ориентированной в северо-северо-восточном направлении (рис. 6). Синклиналь осложнена субширотными разломами, а западное крыло – серией разломов северо-северо-восточного направления. Ядерная часть сложена породами

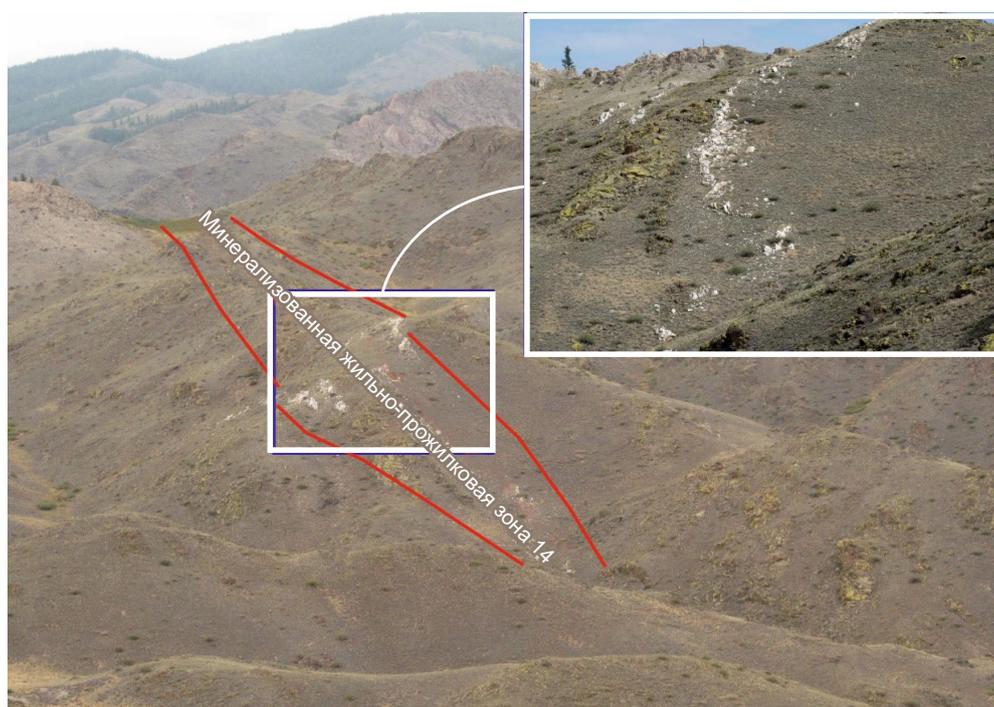


Рис. 7. Минерализованные жильно-прожилковые зоны Овур-Онгешского золоторудного поля

Fig. 7. Mineralized vein-veinlet zones, Ovur-Ongesh gold field

ирбитейской свиты, крылья – серлигской свиты. Интрузивные образования представлены выходами пород таннуольского комплекса и большого количества даек разного возраста и состава. Породы таннуольского комплекса представлены диоритами первой фазы и плагиогранитами второй фазы. Вдоль контактов диоритов с карбонатными породами встречаются скарны.

По результатам геохимических поисков по вторичным ореолам рассеяния, выполненных геологами АО «СНИИГГиМС», Овур-Онгешское золоторудное поле соответствует крупным аномалиям Au с содержанием 0,01–0,07 г/т, в отдельных точках до 0,3 г/т. Среди минералов тяжёлой фракции шлихов из делювиальных и аллювиальных отложений в пределах рудного поля отмечаются гранат, барит, шеелит, золото, малахит, пирит, лимонит, магнетит, ковеллин, азурит, самородная медь, ярозит.

Для Овур-Онгешского золоторудного поля характерно развитие большого количества кварцевых жил, которые преимущественно встречаются в пропилитизированных базальтах, туфах основного состава серлигской и ирбитейской свит и сопровождаются зонами кварц-эпидот-хлорит-серицитовых метасоматитов. Содержание золота в пропилитизированных породах составляет 0,01–0,09 г/т, иногда до 0,2 г/т. Мощность жил изменяется от первых сантиметров до 5 м, длина жил – от первых метров до первых сотен метров. Наблюдаются как отдельные жилы, так и серии параллельных или кулисных жил, штокверки. Жилы чаще всего образуют выраженные линейные зоны, приуроченные к участкам разломов разного уровня. В минерализованных зонах, как правило, выделяются серии стволовых жил мощностью 0,5–3 м (рис. 7) и прожилки.

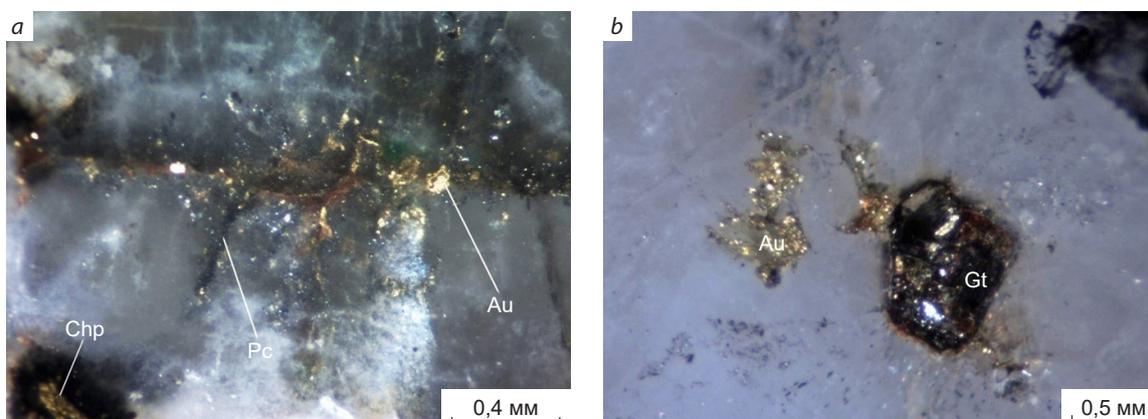


Рис. 8. Золото в аншлифах из кварцевых жил Овур-Онгешского золоторудного поля:

a – самородное золото с петцитом в кварце; *b* – самородное золото возле гётитовой псевдоморфозы по пириту в кварце; Au – золото; Pc – петцит; Chp – халькопирит; Gt – гётит

Fig. 8. Gold in polished sections from quartz veins of the Ovur-Ongesh gold field:

a – native gold with petzite in quartz; *b* – native gold near a goethite pseudomorph after pyrite in quartz; Au – gold; Pc – petzite; Chp – chalcopyrite; Gt – goethite

По результатам поисковых работ в пределах Овур-Онгешского рудного поля выделены десять минерализованных жильно-прожилковых зон. Содержания золота в них варьируют от 0,05 до 0,2 г/т, а мощности составляют десятки метров, в отдельных случаях по канавам и скважинам выявлены пересечения до 137–165 м. По простиранию зоны прослеживаются на 500–700 м, иногда до 2200 м. Внутри таких минерализованных зон установлены сечения мощностью 1–2 м с содержанием Au 1–3 г/т (до 9,99 г/т) по бороздovому опробованию и до 50,73 г/т по штупному. Данные результаты свидетельствуют о значительных масштабах гидротермально-метасоматической деятельности в пределах Овур-Онгешского золоторудного поля. Рудные минералы в кварцевых жилах представлены халькопиритом, борнитом, халькозином, иногда с пиритом, магнетитом, гематитом. В отдельных жилах выявлено видимое самородное золото.

Наиболее распространённый жильный минерал – кварц (95–99 %), в небольших количествах (до 1–5 %) присутствуют кальцит, эпидот, хлорит, серицит. Рудные минералы составляют не более 1–2 %, в редких случаях до 5 %.

Они представлены магнетитом, гематитом, пиритом, халькопиритом, борнитом, халькозином, ковеллином, самородным золотом. Встречаются также теллуриды золота и серебра (алтаит, гессит и петцит) (рис. 8, *a*), самородное серебро. Вторичные минералы представлены лимонитом, гётитом, купритом, малахитом, азуритом. Текстура руд вкрапленная, прожилково-вкрапленная, иногда брекчиевидная.

На площади выделяются два типа жил с сульфидной минерализацией. Первый тип содержит магнетитовую и медную сульфидную минерализацию, второй – обильную пиритовую минерализацию с незначительным количеством сульфидов меди. Кварцевые жилы с пиритовой минерализацией характерны для северо-восточной части участка. Золото в них присутствует в самородном виде. Образует плёнки по границам окисленного пирита и кварца или выделения неправильной формы возле гётитовых псевдоморфоз по пириту (см. рис. 8, *b*).

Кварцевые жилы с магнетитом и медной сульфидной минерализацией характерны для западной и южной частей Овур-Онгешского поля. Магнетит отмечается в зальбандах жил



и в приконтактных частях вмещающих пород. Часто сопровождается хлоритом, эпидотом. Вероятнее всего, образование магнетита происходило на ранних этапах формирования жил. Медная сульфидная минерализация является более поздней, чем магнетитовая, и в отличие от неё фиксируется не во всех жилах. Сульфиды представлены халькопиритом, борнитом, халькозином. Встречаются как в зальбандах, так и в виде гнезд, рассеянной вкрапленности или прожилков по всему объёму жил. Количество сульфидов увеличивается в участках дробления кварцевых жил, где они служат цементом кварцевых брекчий.

Золото обнаружено как в жилах с пиритовой минерализацией, так и в кварцевых жилах с медьсодержащими сульфидами, достигая размеров 2–3 мм (рис. 9, а). В жилах только с магнетит-гематитовой минерализацией, без наложенной сульфидной, золото отсутствует или его содержание не превышает 0,1–0,2 г/т. По морфологии самородное золото в кварцевых жилах губчатое (см. рис. 9, б), тонкопластинчатое, чешуйчатое (см. рис. 9, в). Губчатое золото представлено изометрическими выделениями неправильной формы с очень неровной матовой поверхностью и пористым строением. Размер выделений от долей миллиметра до 1–2 мм. Всё найденное губчатое золото находилось в гнездах, выполненных гидроксидами железа, часто с колломорфными структурами. Тонкопластинчатое и чешуйчатое золото развивается по межзерновым границам и трещинам в кварце, иногда образует отчётливо выраженные дендриты размером до 2–3 мм (см. рис. 9, д).

Пробность самородного золота из кварцевых жил Овур-Онгешского золоторудного поля на уровне 928–960, в среднем около 950 ‰. Из примесей обнаружены Ag (3,4–10,2 ‰), в среднем 6,4 ‰ и Cu (0,4–1,9 ‰).

В результате поисковых работ по Овур-Онгешскому прогнозируемому золоторудному полю в ФГБУ «ЦНИГРИ» апробированы прогнозные ресурсы золота категории P₂ 19,8 т при среднем содержании золота 5 г/т.

Ирбитейский прогнозируемый золото-серебро-полиметаллический узел (П.1.2) рас-

положен в западной части Восточно-Таннуольского района (см. рис. 2). Полиметаллическая минерализация приурочена к вулканитам преимущественно среднего и кислого составов серлигской свиты, реже к породам ирбитейской свиты, которые прослеживаются в юго-западной части ВТРП в виде полосы северо-восточного простирания на протяжении 40 км при ширине 5–10 км. Наиболее изучено проявление цинка, меди и свинца Подперевальное в истоках р. Холу. Здесь среди вулканитов серлигской свиты по результатам ГСР-50 В. И. Лебедевым (1975 г.) и геохимических поисков С. А. Яровым (1990 г.) выявлены зоны хлоритовых и кварц-серицитовых метасоматитов мощностью от десятков до первых сотен метров, протяжённостью первые километры с линзами вторичных кварцитов. Метасоматитам отвечают вторичные ореолы и потоки рассеяния Zn (0,015–0,5 ‰), Pb (0,005–0,2 ‰), Cu (0,01–0,5 ‰), Mn (0,01–0,6 ‰), Ba (0,05–0,5 ‰), Ag, Cd, Au и сульфат-иона. Горными работами установлены три рудных пересечения с содержанием суммы металлов (Zn + Pb + Cu) около 3,5 ‰ на 2,5 м, 9 ‰ на 7 м и 5 ‰ на 20 м. Содержания Ag достигают 131 г/т, Au – 0,55 г/т.

В результате работ по ГДП-200/2 поисковые признаки золотосодержащей полиметаллической минерализации прослежены северо-восточнее и юго-западнее проявления Подперевальное. Выявлены линейные зоны баритизации вулканогенно-осадочных пород серлигской свиты, участки кварц-пирит-серицитовых метасоматитов и вторичных кварцитов. В зонах сульфидизации наиболее распространены пирит, халькопирит, сфалерит, галенит. Опробование коренных пород в пределах Ирбитейского прогнозируемого узла позволило выделить первичные геохимические аномалии с содержанием Cu 0,1–14,2 ‰, Pb 0,01–0,13 ‰, Zn 0,1–0,84 ‰, Ba до > 2 ‰, Ag 1–126,6 г/т, Au 0,1–1,6 г/т, а также пункты минерализации в сульфидизированных риолитах с содержанием Pb 0,05–0,1 ‰, Zn до 0,8 ‰, Ag от 0,3–0,9 до 6,2 г/т. В шлихах из аллювиальных и делювиальных отложений установлены золото, барит, лимонит, пирит, азурит, галенит, малахит.

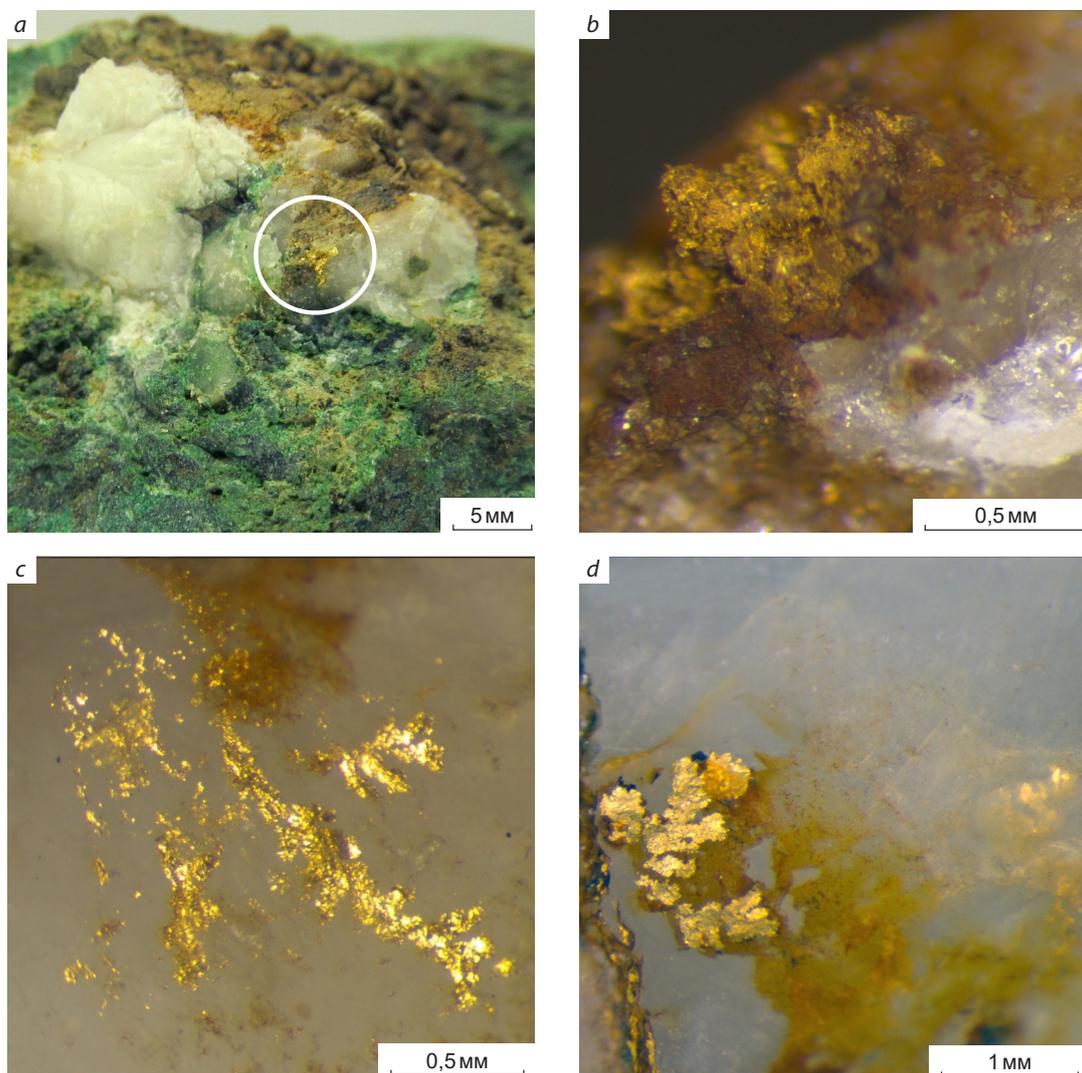


Рис. 9. Морфология золота в кварцевых жилах Овур-Онгешского золоторудного поля:

a – видимое золото в брекчированной кварцевой жиле с халькопиритом, лимонитом, малахитом; *b* – губчатое золото в лимоните; *c* – чешуйчато-пластинчатое золото; *d* – дендритовидное золото

Fig. 9. Morphology of gold in quartz veins of the Ovur-Ongesh gold field:

a – visible gold in a brecciated quartz vein with chalcopyrite, limonite, malachite; *b* – sponge gold in limonite; *c* – flaky-laminated gold; *d* – dendritic gold

Большая часть выявленных на данный момент проявлений и пунктов минерализации с золотосодержащей полиметаллической минерализацией Ирбитейского прогнозируемого узла приурочена к экзоконтактовой северо-западной зоне Унгешского ареал-плутона. Зона контакта вытянута в северо-восточном

направлении конформно с простираем вулканогенных пород. Исходя из имеющихся геологических и минералогических данных можно предположить, что на отдельных участках произошла перекристаллизация и обогащение первичных вулканогенно-осадочных руд.



По подавляющему большинству геолого-структурных, геологических, минералогических и геохимических критериев оруденение Ирбитейского прогнозируемого узла подобно оруденению Кызыл-Таштыгского (Туматтайгинского) полиметаллического узла в северо-восточной части Таннуольско-Улугуйской металлогенической зоны. Здесь известны крупное по запасам Кызыл-Таштыгское месторождение и несколько недоизученных объектов – Кызыл-Ташское, Улуг-Ойское проявления и др. Результаты проведенных работ по ГДП-200/2 и ранее полученные данные позволили оценить прогнозные ресурсы Ирбитейского узла категории P_3 и апробировать их на НТС ФГБУ «ВСЕГЕИ» для Zn – 1,2 млн т, Pb – 0,182 млн т, Cu – 0,124 млн т, Ag – около 2 тыс. т.

Харалыгский прогнозируемый золото-серебро-полиметаллический рудный узел (II.1.5) характеризуется аналогичными Ирбитейскому узлу геологическим строением и минерализацией. Рудный узел расположен на юго-восточном фланге ВТРР, где прослеживается в виде узкой полосы длиной около 35 км при ширине 2–6 км в северо-западном направлении. Площадь узла сложена вулканогенно-осадочными породами серлигской, ирбитейской и манайлыгской свит. В поле развития вулканитов установлены контрастные потоки рассеяния Pb до 0,01 %, Zn до 0,08 %, Cu до 0,06 %, Ba до 0,04 %, Ag до 0,1 г/т, Au до 0,1 г/т, Cd, Mo, неизученные зоны прожилково-вкрапленной пиритовой и вкрапленной халькопиритовой, галенитовой и сфалеритовой минерализации, шлихи с золотом, галенитом, баритом. Кроме того, в экзоконтактовых частях плагиогранитов таннуольского комплекса обнаружены магнетитовые скарны с галенитовой и халькопиритовой минерализацией.

Степень изученности Харалыгского прогнозируемого узла крайне низкая, даже на фоне низкой изученности всей Тывы. Экспертным образом с использованием геохимическими данными и по аналогии с Улуг-Ойским и Ирбитейским узлами нами оценены прогнозные ресурсы P_3 для Zn на уровне 1,4 млн т, Pb – 0,2 млн т, Cu – 0,2 млн т, Ag – 1000 т, Au – 30 т.

Таннуольско-Улугуйская металлогеническая зона рассматривается нами как одна из наиболее перспективных в Алтае-Саянской минерагенической провинции на золотосодержащее молибден-медно-порфировое оруденение. В её северо-восточной части известны крупное Ак-Сугское месторождение, перспективное Кызык-Чадрское проявление и ряд других проявлений и пунктов минерализации. В северо-западной части Восточно-Таннуольского района нами выделено Улуг-Сайлыгское (II.1.0.1), а в юго-западной части Ак-Чаринское прогнозируемые медно-молибденовые рудные поля (II.1.0.2) (см. рис. 2).

Улуг-Сайлыгское прогнозируемое золото-медно-молибден-порфировое рудное поле приурочено к породам второй фазы таннуольского комплекса, которые прорываются небольшим телом гранитов арголикского комплекса. В кровле интрузий встречаются останцы вулканогенно-осадочных пород серлигской свиты. Широко распространены разновозрастные дайки кислого состава.

В северной части Улуг-Сайлыгского поля при проведении геохимических работ С. А. Яровым с коллегами выявлены контрастный аномальный поток рассеяния Mo (содержание 0,0005–0,002 %), W (0,0006–0,001 %) и литохимический вторичный ореол рассеяния Mo с содержанием 0,0005–0,005 %, в эпицентре до 0,012 %. Позднее при ГДП-200/2 в районе вторичного ореола Mo выявлены и прослежены зоны калишпатизации и пиритизированные кварц-биотит-альбитовые метасоматиты, развитые по гранитоидам и вулканитам. Среди гранитоидов и метасоматитов имеются многочисленные сульфидно-кварцевые прожилки. Как в прожилках, так и в гранитах таннуольского комплекса установлена вкрапленность молибденита и халькопирита. По данным полуколичественного спектрального анализа штучных проб содержание Mo изменяется от 0,002–0,006 % до > 0,05 %, Cu – от 0,012 до 0,028 %, в единичных случаях до 0,37 %.

Ак-Чаринское прогнозируемое золотосодержащее молибден-медно-порфировое рудное поле приурочено к небольшому гранитному массиву предположительно второй фазы танну-

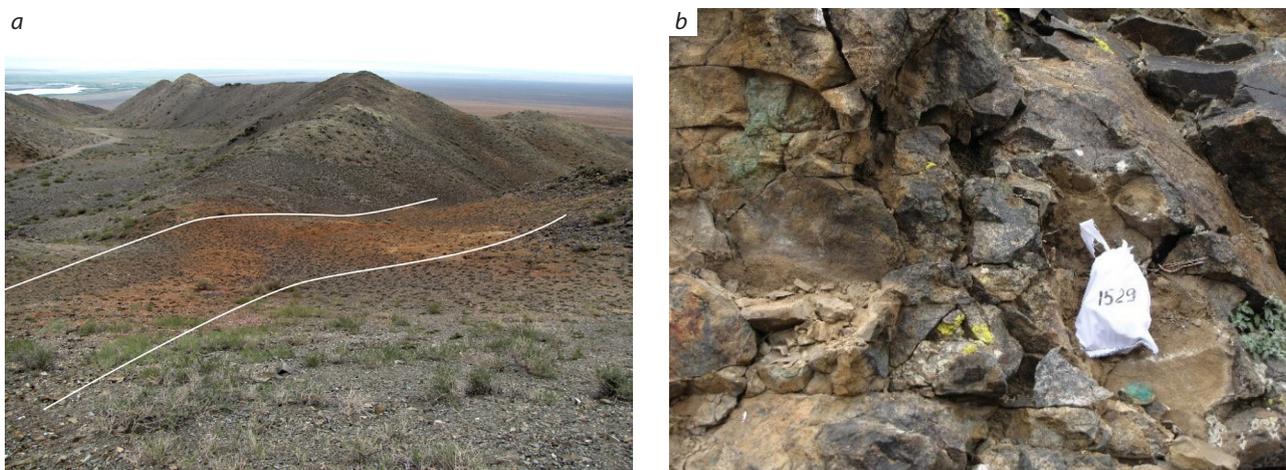


Рис. 10. Ак-Чаринское золотосодержащее медно-порфировое проявление:

линейная зона лимонитизации (бурое) по вкрапленной халькопирит-пиритовой минерализации в гранодиоритах таннуольского комплекса (а), лимонитизированные и малахитизированные гранодиориты второй фазы таннуольского комплекса с вкрапленной халькопирит-пиритовой минерализацией (б)

Fig. 10. Ak-Charinsk gold-containing porphyry copper occurrence:

a – linear zone of limonitization (brown) after disseminated chalcopyrite-pyrite mineralization in granodiorites, *b* – limonitized and malachitized granodiorites of the second phase of the Tannuola complex with disseminated chalcopyrite-pyrite mineralization

ольского комплекса, прорывающему вулкани-ты серлигской свиты и перекрытому в южной части кайнозойскими отложениями. Тело гранитов вытянуто в субмеридиональном направлении. В его центральной части находится зона дробления и гидротермальной проработки шириной 50–150 м, протяжённостью более 2 км, насыщенная кварцевыми прожилками (рис. 10). В пределах зоны распространена вкрапленная пиритовая и халькопиритовая минерализация. По данным геохимических работ С. А. Ярового (1990 г.), минерализованная зона трассируется вторичными ореолами Cu (0,01–0,3 %), Mo (до 0,0004 %), Zn (0,01–0,04 %), Ag. По результатам опробования на разных участках зоны в коренных породах содержатся Cu 0,03–0,6 % (максимально до 4,5 %), Mo до 0,008 %, Au 0,06–0,15 г/т (в отдельных пробах до 1,17 г/т). По результатам пунктирно-бороздowego опробования (по данным С. А. Ярового) вквост простирания зоны установлен интервал длиной 127 м со средним содержанием Cu 0,44 %, Au 0,2 г/т.

Закономерности распространения и металлогенические эпохи формирования золотого и золотосодержащего оруденения. Анализ геологических, геохимических, геофизических, металлогенических и изотопно-геохронологических данных позволяет предполагать, что определяющими для формирования золотого и золотосодержащего оруденения ВТРР и его локализации являются магматический, структурно-тектонический, литолого-стратиграфический, метасоматический и геохимический металлогенические факторы.

Магматический фактор – наиболее значимый для формирования золотосодержащего колчеданно-полиметаллического и молибден-медно-порфирового, золото-скарнового и золото-сульфидно-кварцевого типов оруденения.

Золотосодержащее колчеданно-полиметаллическое оруденение связано с вулканизмом в условиях энсиматической островной дуги и его поствулканической гидротермальной деятельностью. Наблюдается отчётливая приуро-



ченность полиметаллической минерализации к вулканитам в пределах Ирбитейского узла.

Признаки золотосодержащей молибден-медно-порфировой минерализации распространены в полях развития пород второй фазы таннуольского и арголикского комплексов, прорывающих раннекембрийские вулканогенно-осадочные породы.

Формирование золотого жильного и прожилково-жильного оруденения связывается с преобразованием вмещающих пород (эпидотизация, скарнирование, окварцевание) при внедрении массивов майнского комплекса и первой фазы таннуольского комплекса и формированием кварцевых жил из гидротермальных растворов при внедрении тел второй фазы. Наиболее благоприятны для локализации золотого оруденения – приконтактные и надкровельные зоны интрузивов. Скарны с магнетитовой и золотой минерализацией приурочены преимущественно к экзоконтактным зонам извилистых границ пород майнского и таннуольского комплексов. На участках пространственного совмещения скарнированных пород, окварцевания и кварцевых жил наблюдается повышение содержания золота и меди.

Структурно-тектонический фактор – наиболее важный для контроля оруденения, приуроченного к зонам разломов, сопровождающихся интенсивной трещиноватостью, брекчированием и рассланцеванием пород. Для наиболее изученных рудных полей установлена их приуроченность к тектонически осложнённым складчатым структурам. Рудные поля расположены в участках пересечения крупных разломов, главным образом субширотного и северо-восточного направлений. Обе системы разломов сопровождаются более мелкими разломами. Тектонические зоны рассматриваются как благоприятные структуры для циркуляции гидротермальных растворов и участков их разгрузки. Развитие многочисленных разноориентированных, неоднократно подновляемых разломов среди различных по петрографическому составу и физико-механическим свойствам пород послужило хорошей средой для формирования жильно-прожилковых зон и штокверков сульфидно-кварцевого состава.

Значимость *литолого-стратиграфического фактора* выражается приуроченностью многих признаков золотоносности к раннекембрийским вулканогенно-осадочным породам, которые характеризуются благоприятными набором пород и их вещественным составом. Для вулканитов характерны повышенные содержания рудных компонентов – Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Fe. В этой связи породы кадвойской, серлигской, ирбитейской и манайлыгской свит могут рассматриваться как рудоматеринские.

В разрезах наблюдается частая смена прослоев различного состава – известняков, туфопесчаников, туфов, алевролитов, туфоалевролитов, базальтов, риолитов, андезитов и др. Кроме того, раннекембрийские разрезы насыщены многочисленными разновозрастными субвулканическими и интрузивными телами. При коллизионных событиях и формировании складчатости эти породы подвергались интенсивной дислокации. Так, в раннекембрийских вулканогенно-осадочных породах формировались многочисленные проницаемые для гидротермальных растворов зоны. Такие особенности строения раннекембрийских толщ, вероятно, отражают разные палеофациальные условия их формирования и частую смену условий осадконакопления. Пёстрые по составу вулканогенно-осадочные породы, характеризующиеся разными физикомеханическими свойствами, рассматриваются как благоприятная среда для формирования многочисленных трещин, к которым приурочены более поздние жилы и прожилки.

Метасоматический фактор является определяющим для тех видов полезных ископаемых, которые связаны с формированием метасоматических пород – железо, медь, свинец, цинк, золото. Из рудоносных метасоматических пород в пределах ВТРП известны скарны, кварц-серицитовые метасоматиты, кварциты и березиты. Известковые скарны широко распространены в экзоконтактных, реже эндоконтактных частях массивов майнского комплекса и первой, реже второй фазы таннуольского комплекса. Как правило, они эпидот-гранат-пироксенового состава и сопровождаются повышенным количеством магнетита. На уча-

стках наложения на скарны медной сульфидной и кварцевой минерализации наблюдается значительное увеличение содержания золота.

Кварц-серицитовые метасоматиты и кварциты наиболее широко проявлены в пределах Ирбитейского узла среди вулканитов среднего и кислого составов. С полем развития кварц-серицитовых метасоматитов пространственно связана полиметаллическая минерализация.

Березиты формируют линейные зоны, приуроченные к тектоническим нарушениям золоторудных полей Деспенское, Чумуртукское и Проездное. Они характеризуются пирит-альбит-серицит-кварцевым составом и образуют зоны мощностью до первых десятков метров, протяжённостью сотни метров. Для березитов отмечаются повышенные содержания золота (сотые доли г/т, до 0,5 г/т), однако рудные тела пока не установлены.

Геохимический фактор рассматривается как один из наиболее важных для металлогенической специализации ВТРР. На основе геохимических материалов ГДП-200/2 (М-46-Х) и данных геохимических поисков предшественников можно сделать вывод о том, что раннекембрийские вулканогенно-осадочные породы ВТРР характеризуются повышенным содержанием рудных компонентов, таких как Cu, Pb, Zn, Cr, Fe, Ag, Sb. Сидеро-халькофильная специализация раннекембрийских эффузивов основного и среднего составов во многом определила металлогенические особенности ВТРР. Повышенное содержание халькофильных и сидерофильных элементов также отмечается в габбро, диоритах и даже гранитоидах майнского и таннуольского комплексов, в меньшей степени арголикского. Вероятно, породы кадвойской, серлигской, ирбитейской и манайлыгской свит могли быть отчасти источником рудных компонентов.

Анализ геологических, минералогических и изотопно-геохронологических данных позволяет предполагать, что формирование золото- и золотосодержащего оруденения ВТРР происходило в каледонскую металлогеническую эпоху на двух стадиях – ранней раннекембрийской (541–515 млн лет) и поздней среднекембрийско-ордовикской (510–445 млн лет). В по-

следующие временные этапы отмечается воздействие локально проявленного герцинского магматизма на ранее сформированную золотую минерализацию. Например, для Овур-Онгешского золоторудного поля установлено повышение пробности золота до 990–1000 ‰ в местах, где золотоносные кварцевые жилы прорываются дайками предположительно торгалыкского комплекса.

На ранней стадии в связи с образованием вулканитов серлигской, ирбитейской, манайлыгской свит и гидротермальной деятельностью в палеовулканических структурах формировалось оруденение золотосодержащей колчеданно-полиметаллической формации. Пункты минерализации и геохимические аномалии Cu, Pb, Zn, Ag, Ba, Cd распространены по территории всего района в поле вулканогенно-осадочных пород и концентрируются в Ирбитейском и Харалыгском узлах. Предполагается, что раннекембрийские породы с повышенным содержанием элементов сидерофильной и халькофильной групп часто являлись рудовмещающей средой и источником рудного вещества для более поздних рудообразующих событий и во многом определили металлогеническую специализацию всей Таннуольско-Улугуйской металлогенической зоны.

С породами майнского комплекса связано формирование золото-сульфидно-кварцевых жил и маломощных зон скарнирования. К плагиогранитам майнского комплекса приурочены маломощные, обычно менее 1 м, кварцевые жилы и прожилки с халькопиритовой, реже пирит-халькопиритовой минерализацией. Также известны пункты минерализации с магнетитом в скарнированных породах кадвойской и серлигской свит. Сравнительно небольшое распространение пород майнского комплекса определяет его небольшое значение для рудного потенциала ВТРР. Однако наличие островодужного субвулканического и интрузивного магматизма, вероятно, играло важную роль для концентрации и перераспределения рудных элементов раннекембрийских вулканогенно-осадочных толщ. Как правило, именно в ареалах развития раннекембрийских даек и небольших массивов майнского комплекса на



более поздней кембрийско-ордовикской стадии формировалось наиболее богатое золотое оруденение.

Среднекембрийско-ордовикская стадия имеет большое значение в формировании золоторудного потенциала ВТРР. С одной стороны, это обусловлено более масштабным магматизмом, с другой – интенсивными складчато-разрывными дислокациями раннекембрийских пород при их аккреции в среднем–позднем кембрии, что привело к формированию многочисленных разломов, зон брекчирования и трещиноватости, благоприятных для циркуляции гидротермальных растворов.

Тектонический «рисунок», вероятно, сформировался на аккреционной стадии эволюции региона в среднем–позднем кембрии. Затем в ордовике, раннем девоне и мезозое активизировались существующие и заложились новые разломы различных порядков. На среднекембрийско-ордовикской стадии сформирована большая часть проявлений золота и меди жильного золото-сульфидно-кварцевого типа, а также золота, меди и железа в скарнах. Образование гидротермально-метасоматических пород связано с внедрением массивов первой и второй фаз таннуольского комплекса диорит-гранодиорит-плагиогранитной формации в раннекембрийские вулканогенно-осадочные породы кадвойской, серлигской, ирбитейской и манайлыгской свит.

Исходя из геологических и минералого-геохимических данных можно предположить, что масштабное формирование скарнов с магнетитом связано с образованием крупных массивов первой фазы таннуольского комплекса. С внедрением массивов второй фазы связано формирование зон окварцевания, кварцевых жил и прожилков. На участках пространственного совмещения скарновой и кварцевожильной минерализации наблюдается повышение содержания золота и меди. Это обусловлено тем, что скарны, с одной стороны, являясь более хрупкими породами, чем вмещающие известняки и туфогенные породы, служили благоприятной средой для образования зон трещиноватости. С другой стороны, они были геохимическим барьером для золото- и медьсодержащих крем-

некислотных растворов, которые формировались на поздней стадии кристаллизации гранитоидных массивов. В единичных случаях отмечается свинцовая (галенитовая) минерализация в барит-кварцевых жилах свинцово-цинковой жильной формации (сайт Свинцовый), образование которой, возможно, связано с регенерацией раннекембрийской свинцово-цинковой минерализации из вулканогенных пород. Кроме того, на отдельных участках (Подперевальный) наблюдается перекристаллизация полиметаллической минерализации, связанная с внедрением кембрийско-ордовикских пород таннуольского комплекса.

Полученные нами данные и анализ материалов предшествующих работ позволяют предполагать, что формирование минерализации молибден-медно-порфировой формации происходило на средне-позднекембрийской стадии. Имеющиеся данные свидетельствуют о приуроченности порфировой минерализации к небольшим массивам, преимущественно плагиогранитного и гранодиоритового составов, второй фазы таннуольского комплекса. При этом обращает на себя внимание тот факт, что в некоторых случаях проявления молибден-медно-порфировой формации встречаются на участках совмещения небольших массивов второй фазы таннуольского и более позднего арголикского комплексов. С учётом трудности визуального разделения гранитоидов этих комплексов не исключено, что оруденение порфирового типа может быть связано и с породами арголикского комплекса.

Геолого-структурное положение, геологическое строение, особенности металлогении и золотоносности Восточно-Таннуольского рудного района схожи с другими рудными районами Алтае-Саянской минерагенической провинции – Мартайгинским, Коммунарским, Мрасским, Ольховско-Чибеевским. Однако в отличие от них ВТРР менее изучен. На основании сопоставления условий золотоносности этих районов и имеющихся материалов по золотоносности ВТРР можно предполагать его высокие перспективы в отношении наличия промышленного золотого оруденения. Сейчас суммарные апробированные прогнозные ре-

сурсы золота ВТРР составляют по категории P_2 62,1 т, что, конечно, не отражает его золоторудный потенциал, а территория района требует дальнейшего изучения с постановкой прогнозно-минерагенических и поисковых работ.

Итак, Восточно-Таннуольский район имеет хорошо выраженную металлогеническую специализацию на Au, Cu, Pb, Zn, Ag, Fe, Mo. Анализ комплекса геологических, геофизических, геохимических и металлогенических данных предшественников и вновь полученные материалы позволили выделить однотипные золоторудные Элегест-Межегейский, Аптаринский, Шивилигский узлы и золотосодержащие колчеданно-полиметаллические Ирбитейский и Харалыгский. В пределах золоторудных узлов установлено несколько в разной степени изученных золоторудных полей – Деспенское, Овур-Онгешское, Чумуртукское и др. Кроме того, за пределами узлов выявлены прогнозируемые Улуг-Сайлыгское и Ак-Чаринское золотосодержащие молибден-медно-порфиновые рудные поля.

В пределах района распространены прямые и косвенные поисковые признаки золотого и золотосодержащего оруденения четырёх типов – золото-сульфидно-кварцевого (жильного, жильно-прожилкового и в березит-лиственитовых метасоматитах), золото-скарнового, золотосодержащего колчеданно-полиметаллического и молибден-медно-порфинового.

Наибольшая концентрация признаков золотого оруденения установлена в тектонически осложнённых складчатых структурах, сложенных раннекембрийскими вулканогенно-осадочными породами, прорванными породами майнского и таннуольского комплексов. Оруденение золото-сульфидно-кварцевого типа локализуется в тектонических зонах в приконтактных и надкровельных частях интрузивных массивов. Предполагается, что формирование кварцевых жил в разной степени связано с гидротермальной деятельностью при образовании пород майнского комплекса, первой и второй фаз таннуольского и арголикско-

го комплексов. К интрузивным породам приурочены преимущественно одиночные кварцевые жилы или их группы, к зонам дислокаций в вулканогенно-осадочных толщах – кварцевые штокверки и жильно-прожилковые зоны.

Одна из характерных особенностей ВТРР – наличие многочисленных участков скарнирования, связанных со становлением разновозрастных гранитоидных интрузий. К скарнам приурочены непромышленные проявления магнетитовых руд и потенциально промышленное золотое оруденение. Предполагается, что с породами первой фазы таннуольского комплекса связано формирование гранат-пироксеновых скарнов преимущественно с магнетитовой минерализацией, породами второй фазы – образование скарнов с наложенной золото-сульфидно-кварцевой минерализацией.

Формирование золотосодержащего колчеданно-полиметаллического оруденения сопровождается с вулканогенно-гидротермальной деятельностью с образованием пород серлигской и ирбитейской свит. Перекристаллизация полиметаллического оруденения и формирование на отдельных участках зон обогащения могут быть обусловлены метаморфизмом пород и внедрением гранитоидов в кембрийско-ордовикское время.

Формирование оруденения золотосодержащей молибден-медно-порфировой формации предположительно связано с породами второй фазы таннуольского комплекса и мелкими телами арголикского комплекса.

С учётом степени изученности территории ВТРР здесь рекомендуется постановка прогнозно-минерагенических и поисковых работ. Прогнозно-минерагенические работы следует проводить на золотосодержащее колчеданно-полиметаллическое оруденение в пределах Харалыгского узла и на золотосодержащее молибден-медно-порфиговое – в пределах всего ВТРР. Поисковые работы – на золотосодержащее колчеданно-полиметаллическое оруденение на Подперевальном участке Ирбитейского узла, на золото – на Овур-Онгешском участке Аптаринского узла и на Чумуртукском участке Элегест-Межегейского.



Список литературы

1. *Ветров Е. В., Уваров А. Н., Вишневецкая И. А., Червяковская М. В., Ветрова Н. И., Жимулев Ф. И., Андреева Е. С.* Строение, возраст, геохимический и изотопно-геохимический (Sm/Nd) состав серлигской свиты кембрия Таннуольского террейна Тувы // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2020. – № 1. – С. 81–94.
2. *Ветров Е. В., Черных А. И.* Эволюция гранитоидного магматизма Восточно-Таннуольского района Тывы в раннем палеозое: синтез геологических, геохимических, геохронологических и металлогенических данных // Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии. Том 2. Материалы I Тектонического совещания. – 2018. – С. 388–390.
3. *Ветров Е. В., Черных А. И., Бабин Г. А.* Раннепалеозойский гранитоидный магматизм Восточно-Таннуольского сектора Тувинского магматического пояса: геодинамическая позиция, возраст и металлогения // Геология и геофизика. – 2019. – № 5. – С. 641–665.
4. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист М-46 – Кызыл. Объяснительная записка. – СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. – 349 с.
5. *Монгуш А. А., Лебедев В. И., Ковач В. П., Сальникова Е. Б., Дружкова Е. К., Яковлева С. З., Плоткина Ю. В., Загорная Н. Ю., Травин А. В., Серов П. А.* Тектономагматическая эволюция структурно-вещественных комплексов Таннуольской зоны Тувы в позднем венде – раннем кембрии // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 2, № 5. – С. 649–665.
6. *Попов В. А., Монгуш А. А., Аюнова О. Д.* Горно-металлургическое производство в Древней Туве (предварительные итоги работ 2004 г.) // Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. Геоэкология природной среды и общества. – Кызыл : ТуВИКОПР СО РАН. – 2005. – Вып. 8. – С. 108–122.
7. *Руднев С. Н.* Раннепалеозойский гранитоидный магматизм Алтае-Саянской складчатой области и Озёрной зоны Западной Монголии / отв. ред. Г. В. Поляков. – Новосибирск : СО РАН. – 2013. – 300 с.
8. *Черных А. И.* Металлогения Восточно-Таннуольского рудного района Алтае-Саянской складчатой области (Республика Тыва) // Геология, геофизика и минеральное сырьё Сибири. Сборник тезисов 2-ой научно-практической конференции. – Новосибирск, 2015. – С. 202–204.
9. *Черных А. И.* Особенности распределения и перспективы освоения золотого оруденения Восточно-Таннуольского района, Республика Тыва // Руды и металлы. – 2014. – № 5. – С. 10–18.
10. *Черных А. И., Ветров Е. В., Пихутин Е. А.* Геологическое строение и металлогения западной части Восточно-Таннуольского рудного района (Республика Тыва) – на основе новых изотопно-геохронологических данных // Отечественная геология. – 2017. – № 2. – С. 4–21.
11. *Черных А. И., Ширококов А. Ю., Викторов М. В., Меркулов В. В., Ласутин А. О., Шеин М. А.* Геологическое строение и условия локализации золотого оруденения Деспенской площади Восточно-Таннуольского района (Республика Тыва) // Геология, геофизика и минеральное сырьё Сибири. Сборник тезисов 2-ой научно-практической конференции. – Новосибирск, 2015. – С. 204–206.
12. *Chernykh A. I.* Eastern Tannu-Ola ore district of the Altai-Sayan folded area (Republic Tuva, Russia): the structural features and metallogeny // Electronic publishing 35 International Geological Congress. – URL: www.35igc.org. 2016 (дата обращения: 06.07.2021).
13. *Chernykh A. I.* Gold Mineralization in the Eastern Tannu-Ola ore district of the Altai-Sayan folded area (Russia) // The 14th quadrennial international association on the genesis of the ore deposits symposium. – Kunming, China, 2014. – V. 88, I. 2. – P. 679–680.

References

1. *Vetrov E. V., Uvarov A. N., Vishnevskaya I. A., Chervyakovskaya M. V., Vetrova N. I., Zhimulev F. I., Andreeva E. S.* Stroenie, vozrast, geokhimicheskii i izotopno-geokhimicheskii (Sm/Nd) sostav serligskoi svi-ty kembriya Tannuol'skogo terreina Tuvy [Building, age, geochemical and isotope-geochemical (Sm/Nd)

- Composition of the Serliga Sweet Cambrian Tannuol Tyva Terrene], *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri* [Geology and mineral resources of Siberia], 2020, No 1, pp. 81–94. (In Russ.).
2. Vetrov E. V., Chernykh A. I. Evolyutsiya granitoidnogo magmatizma Vostochno-Tannuol'skogo raiona Tyvy v rannem paleozoe: sintez geologicheskikh, geokhimicheskikh, geokhronologicheskikh i metallogenicheskikh dannyykh [Evolution of granitoid magmatism of the East Tannuol district of Tyva in early Paleozoic: synthesis of geological, geochemical, geochronological and metallogenetic data], *Problemy tektoniki i geodinamiki zemnoi kory i mantii. Tom 2. Materialy L Tektonicheskogo soveshchaniya* [Problems of tectonics and geodynamics of the earth's crust and mantle. Volume 2. Materials 50 (L) of the tectonic meeting], 2018, pp. 388–390. (In Russ.).
 3. Vetrov E. V., Chernykh A. I., Babin G. A. Rannepaleozoiskii granitoidnyi magmatizm Vostochno-Tannuol'skogo sektora Tuvinskogo magmaticheskogo poysa: geodinamicheskaya pozitsiya, vozrast i metallogeniya [Early Paleozoic granitoid magmatism of the East Tannuol sector of the Tyvinian magmatic belt: geodynamic position, age and metal], *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2019, No 5, pp. 641–665. (In Russ.).
 4. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Altae-Sayanskaya. List M-46 – Kyzyl. Ob'yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1 000 000 (third generation). A series of Altai Sayan. Sheet M-46-kyzyl. Explanatory letter], St. Petersburg, Kartograficheskaya fabrika VSEGEI Publ., 2008, 349 p.
 5. Mongush A. A., Lebedev V. I., Kovach V. P., Sal'nikova E. B., Druzhkova E. K., Yakovleva S. Z., Plotkina Yu. V., Zagornaya N. Yu., Travin A. V., Serov P. A. Tektonomagmaticheskaya evolyutsiya strukturnoveshchestvennykh kompleksov Tannuol'skoi zony Tyvy v pozdnem vende – rannem kembrii [Tectonic-magmatic evolution of structural complexes of Tannuol Tyva Zone in Late Wende – Early Cambrian], *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2011, V. 2, No 5, pp. 649–665. (In Russ.).
 6. Popov V. A., Mongush A. A., Ayunova O. D. Gorno-metallurgicheskoe proizvodstvo v Drevnei Tuve (predvaritel'nye itogi rabot 2004 g.) [Mining and metallurgical production in the ancient Tyva (preliminary results of the work of 2004)], *Sostoyanie i osvoenie prirodnnykh resursov Tuvy i sopredel'nykh regionov Tsentral'noi Azii. Geoekologiya prirodnoi sredy i obshchestva* [The condition and development of the natural resources of Tyva and the adjacent regions of Central Asia. Geoecology of the natural environment and society], Kyzyl, TuvIKOPR SO RAN Publ., 2005, V. 8, pp. 108–122.
 7. Rudnev S. N. Rannepaleozoiskii granitoidnyi magmatizm Altae-Sayanskoi skladchatoi oblasti i Ozeranoi zony Zapadnoi Mongolii [Early Paleozoic granitoid magmatism Altai-Sayan folded area and lake zone of Western Mongolia], Novosibirsk, SO RAN Publ., 2013, 300 p.
 8. Chernykh A. I. Metallogeniya Vostochno-Tannuol'skogo rudnogo raiona Altae-Sayanskoi skladchatoi oblasti (Respublika Tyva) [Metallogeny of the East Tannuol ore district of Altai-Sayan folded area (Republic of Tyva)], *Geologiya, geofizika i mineral'noe syr'e Sibiri. Sbornik tezisev 2-oi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials of Siberia. Collection of theses of the 2nd Scientific and Practical Conference], Novosibirsk, 2015, pp. 202–204. (In Russ.).
 9. Chernykh A. I. Osobennosti raspredeleniya i perspektivy osvoeniya zolotogo orudneniya Vostochno-Tannuol'skogo raiona, Respublika Tyva [Features of distribution and prospect of development of gold ore deposit of the East Tannuola area, Tyva Republic], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2014, No 5, pp. 10–18. (In Russ.).
 10. Chernykh A. I., Vetrov E. V., Pikhutin E. A. Geologicheskoe stroenie i metallogeniya zapadnoi chasti Vostochno-Tannuol'skogo rudnogo raiona (Respublika Tyva) – na osnove novykh izotopno-geokhronologicheskikh dannyykh [Geological structure and metal generation of the western part of the East Tannuol Ore region (Tyva Republic) – based on new isotope-geochronological data], *Otechestvennaya geologiya* [National Geology], 2017, No 2, pp. 4–21. (In Russ.).
 11. Chernykh A. I., Shirobokov A. Yu., Viktorov M. V., Merkulov V. V., Lakutin A. O., Shein M. A. Geologicheskoe stroenie i usloviya lokalizatsii zolotogo orudneniya Despenskoj ploshchadi Vostochno-Tannuol'skogo raiona (Respublika Tyva) [The geological structure and conditions of the localization of the gold mineralization of the Despan Square of the East Tannuol District (Republic of Tyva)], *Geologiya, geo-*



fizika i mineral'noe syr'e Sibiri. Sbornik tezisov 2-oi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials of Siberia. Collection of theses of the 2nd Scientific and Practical Conference], Novosibirsk, 2015, pp. 204–206. (In Russ.).

12. Chernykh A. I. Eastern Tannu-Ola ore district of the Altai-Sayan folded area (Republic Tuva, Russia): the structural features and metallogeny, *Electronic publishing 35 International Geological Congress*, available at: www.35igc.org. 2016 (Accessed: 06.07.2021).

13. Chernykh A. I. Gold Mineralization in the Eastern Tannu-Ola ore district of the Altai-Sayan folded area (Russia), *The 14th quadrennial international association on the genesis of the ore deposits symposium*, Kunming, China, 2014, V. 88, I. 2, pp. 679–680.

Авторы

Черных Александр Иванович

кандидат геолого-минералогических наук
генеральный директор¹
tsnigri@tsnigri.ru

Широбоков Алексей Юрьевич

заведующий отделом²
shiro@sniigims.ru

Арсентьева Ирина Викторовна

кандидат геолого-минералогических наук
старший научный сотрудник¹
arsenteva@tsnigri.ru

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва

² АО «Сибирский НИИ Геологии, Геофизики и Минерального сырья», г. Новосибирск

Authors

Chernykh Alexander Ivanovich

PhD
General Director¹
tsnigri@tsnigri.ru

Shirobokov Alexey Yurievich

Head of Department²
shiro@sniigims.ru

Arsentieva Irina Viktorovna

PhD
Senior researcher¹
arsenteva@tsnigri.ru

¹ FSBI Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow, Russia

² Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials, Novosibirsk, Russia



30.07-10.08 ЕКАТЕРИНБУРГ

Всероссийская открытая полевая олимпиада юных геологов

МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА, ПОИСКОВ,
ОЦЕНКИ И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.411:553.08:550.9 (571.56+571.65)

Новые данные по золото-редкометалльному оруденению Центрально-Колымского золотоносного района: возраст, условия образования, состав, рудоконтролирующие факторы

New data on the reduced intrusion-related Au mineralization of Central Kolyma gold region: age, formation conditions, composition, ore-controlling factors

**Пачерский Н. В., Кряжев С. Г., Наумов Е. А.,
Десятова Д. Ю., Двуреченская С. С.,
Самойленко М. В.**

**Pachersky N. V., Kryazhev S. G., Naumov E. A.,
Desyatova D. Yu., Dvurechenskaya S. S.,
Samoilenko M. V.**

Представлены новые данные об условиях формирования и возрасте золото-редкометалльного оруденения Ветренской площади Центрально-Колымского района. Золото-редкометалльное оруденение преимущественно приурочено к участкам пересечения позднеюрских малых интрузивных тел системами трещин северо-восточного направления и представлено зонами маломощных кварцевых прожилков, которые сопровождаются околожильными серицит-кварцевыми метасоматитами. Главным рудным минералом является золотоносный арсенопирит (до 10 %), второстепенными – лёллингит, пирит, халькопирит, пирротин. Микроскопически видимое низкопробное самородное золото находится в парагенезисе с минералами висмута (висмутин, самородный висмут, теллуриды Bi и Au) в виде микровключений (1–10 мкм) в арсенопирите. Изохронный Re-Os возраст золотоносного арсенопирита составляет 137–117 млн лет, по времени формирования оруденение значительно оторвано от вмещающих гранитоидов (147–153 млн лет). По сравнению с золото-кварцевыми объектами золото-редкометалльные сформировались на меньших глубинах, а по сравнению с редкометалльными (W, Mo) – при меньших температурах.

Ключевые слова: Центрально-Колымский район, Ветренская площадь, золото, висмут, вольфрам, молибден, абсолютный возраст, Re-Os, флюидные включения, золото-редкометалльная формация, RIRGS.

New data are presented on the formation conditions and ages of the reduced intrusion-related Au mineralization of the Vetrenskaya area in the Central Kolyma region. The mineralization is predominantly confined to intersections of Late Jurassic minor intrusive bodies and NE-trending fracture systems and is represented by zones of thin quartz veinlets with sericite-quartz halos. The major ore mineral is gold-bearing arsenopyrite (up to 10%), while minor minerals are represented by lellingite, pyrite, chalcopyrite, and pyrrotite. Microscopic native gold of a low fineness is paragenetically associated with bismuth minerals (bismuthine, native bismuth, and tellurides of Bi and Au), forming microinclusions (1–10 μ) in the arsenopyrite. Isochronous Re-Os age of the gold-bearing arsenopyrite is 137–117 Ma, which suggests the mineralization was formed significantly later than the hosting granitoids (147–153 Ma). The reduced intrusion-related Au ore deposit was formed at shallower depths in comparison with orogenic Au deposits, and at lower temperatures in comparison with rare metal (W, Mo) ore deposits.

Keywords: Central Kolyma region, Vetrenskaya area, gold, bismuth, tungsten, molybdenum, absolute age, Re-Os, fluid inclusions, reduced intrusion-related Au ore formational type, RIRGS.

Для цитирования: Пачерский Н. В., Кряжев С. Г., Наумов Е. А., Десятова Д. Ю., Двуреченская С. С., Самойленко М. В. Новые данные по золото-редкометалльному оруденению Центрально-Колымского золотоносного района: возраст, условия образования, состав, рудоконтролирующие факторы. Руды и металлы. 2021. № 2. с. 68–90. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10011.

For citation: Pachersky N. V., Kryazhev S. G., Naumov E. A., Desyatova D. Yu., Dvurechenskaya S. S., Samoilenko M. V. New data on the reduced intrusion-related Au mineralization of Central Kolyma gold region: age, formation conditions, composition, ore-controlling factors. Ores and metals, 2021, № 2, pp. 68–90. DOI: 10.24411/0869-5997-2020-10011.



Золото-редкометалльный формационный тип оруденения – второй по распространённости в Центрально-Колымском золотоносном районе (ЦКР) Верхояно-Колымской минералогической провинции после золото-кварцевого. Оруденение золото-кварцевой формации имеет основное промышленное значение, главные объекты этого типа (Наталка, Павлик и др.) широко освещены в геологической литературе. Потенциал золото-редкометалльной формации до конца не ясен. В последние годы были оценены небольшие месторождения (Тэутэджак, Бутарное, Древний и др.), но условия формирования и закономерности локализации минерализации данного типа изучены всё ещё недостаточно. Новые материалы по золото-редкометалльному оруденению получены авторами при проведении ГДП-200 на Ветренской площади (листы Р-55-XXIV, Р-56-XIX, Магаданская область) ФГБУ «ЦНИГРИ» и ФГБУ «ВСЕГЕИ» (К. Н. Мазуркевич, 2020 г.).

Ветренская площадь расположена в 60 км к востоку от Наталкинского месторождения в юго-восточной части ЦКР (рис. 1) вблизи её границы с Охотско-Чукотским вулканоплутоновым поясом (ОЧВП). На площади известны среднее коренное месторождение золота Ветренское, непромышленные месторождения золота Экспедиционное и вольфрама Бохапчинское, многочисленные золото-кварцевые, золото-редкометалльные и редкометалльные (W, Mo) рудопроявления и пункты минерализации (рис. 2).

Геологическая позиция. Оруденение золото-редкометалльного типа представлено прожилками и прожилковыми зонами с золото-висмут-арсенопиритовой минерализацией преимущественно в малых интрузивных телах (штоках, крупных дайках) и в их экзоконтактах. Многочисленные пункты минерализации известны в Чалбыканской и Малтанской группах штоков басугуньинского комплекса гранит-гранодиоритового состава. В результате ГДП-200 выделено проявление золото-редкометалльной минерализации в одиночном штоке Хилтан того же комплекса; установлено присутствие золото-редкометалльной минерализации на непромышленном месторожде-

нии Экспедиционное, локализованном в крупной дайке диорит-порфиров неро-бохапчинского комплекса. Отдельную немногочисленную группу представляют проявления золото-редкометалльной минерализации на контактах и внутри крупных гранитных массивов (Ярыга и Больших Порогов) сибердикского и колымского комплексов (см. рис. 2). Все указанные интрузивы близкого возраста и состава составляют региональный Главный Колымский батолитовый пояс, сформированный в позднеюрский этап коллизионного (орогенного) развития территории.

Составы рудовмещающих интрузивных пород Ветренской площади приведены на схематическом графике зависимости степени фракционирования (отношение Rb / Sr) от степени окисления (Fe_2O_3 / FeO) для интрузивных пород, связанных с минерализацией Cu-Au, W-Mo, Au-(Bi) и Sn [11] (рис. 3). Практически все фигуративные точки лежат в области «восстановленных» гранитоидов ильменитовой серии, с которыми связаны магматогенно-гидротермальные Au-(Bi) месторождения RIRGS-типа (Reduced Intrusion Related Gold Systems). Данный тип оруденения выделен зарубежными геологами более 20 лет назад [21]. В настоящее время термин получил широкое распространение в мире и активно используется российскими геологами [2, 22, 23]. С месторождениями типа RIRGS в Верхояно-Колымской провинции сопоставляется золото-редкометалльное оруденение, для которого характерны преобладание арсенопирита в составе сульфидов и присутствие минералов висмута в ассоциации с самородным золотом [3].

Структурно-вещественная характеристика. Золотоносные сульфидно-кварцевые и кварц-сульфидные прожилки рассекают граниты с различным шагом. Прожилки прямые, ровные, непротяжённые, мощностью от нитевидных до первых сантиметров. Контакты прожилков не тектонизированы. Группы субпараллельных прожилков образуют прожилковые зоны. Ширина зон первые метры, десятки метров. Редко они включают небольшие жилы мощностью до 0,5 м. По своим морфологическим особенностям близки по описанию к сис-

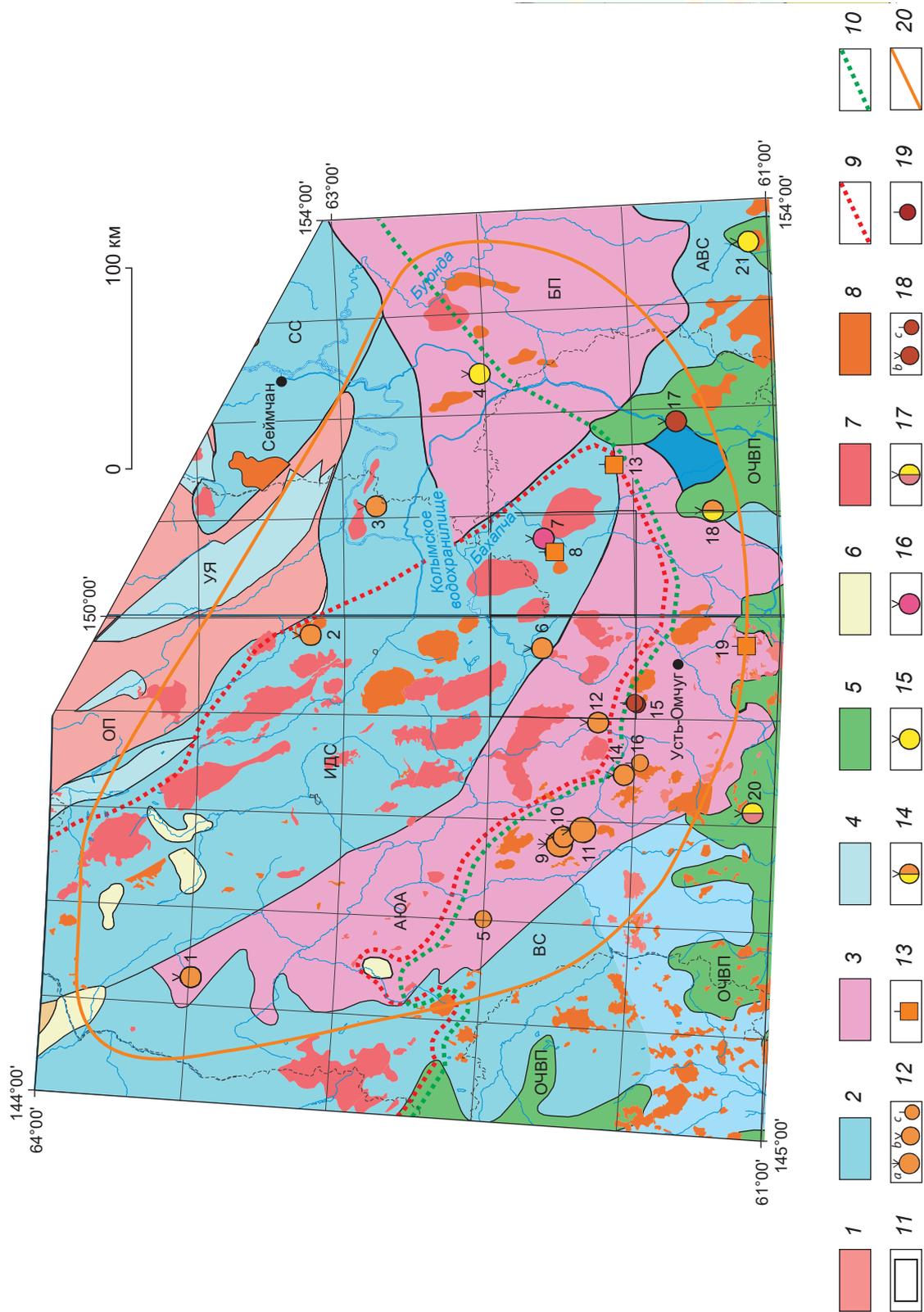


Рис. 1. Схема тектонического районирования и размещения месторождений полезных ископаемых, по материалам ГК-1000/3 листов P-55 [10] и P-56 [8] с добавлениями:

Верхояно-Чукотская складчатая область (1 – Омүлөвское складчато-блоковое поднятие (ОП) Индигиро-Колымской складчатой системы); Яно-Колымская складчатая система (2 – синклинии: Верхнеиндигирский (ВС), Иньяли-Дебинский (ИДС), Сугойский (СС), Арmano-Вилигинский (АВС)); 3 – цепь внутренних антиклинорий, поднятий (Аян-Юрхский антиклинорий (АЮА), Балыгычанское поднятие (БП)); 4 – позднеюрский Уяндино-Ясачинский вулканический пояс (УЯ); 5 – Охотско-Чукотский ранне-позднеоловой окраинно-континентальный вулканогенный пояс (ОЧВП); 6 – кайнозойские континентальные впадины Момского и Охотско-Анадырского рифтов; интрузивные комплексы: 7 – коллизионные позднеюрские-раннемеловые, 8 – ранне-позднеоловые плутонические; границы плутонических поясов: 9 – позднеюрского Главного Колымского, 10 – мелового Приохотского; 11 – Ветренская площадь; месторождения: 12 – золота (золото-кварцевой формации), здесь и далее *a* – крупное, *b* – среднее, *c* – малое (13 – золота, 19 – урана); редкометалльной формации), 14 – золота, серебра, 15 – серебра, 16 – вольфрама, 17 – сурьмы, серебра, 18 – олова, 19 – урана); 20 – Центральнo-Колымский золотоносный район; основные месторождения и их номера на карте: 1 – Верхне-Хакчанское (Au), 2 – Штурмовское (Au), 3 – Утинское, 4 – Ветвистое (Ag), 5 – Дегдекан (Au), 6 – Ветренское (Au), 7 – Бохапчинское (W), 8 – Экспедиционное (Au), 9 – Наталка (Au), 10 – Омчакское (Au), 11 – Павлик (Au), 12 – Школьное (Au), 13 – Древнее (Au), 14 – Игуменовское (Au), 15 – Бутугычач (Sn, U), 16 – Родионовское (Au), 17 – Хета (Sn), 18 – Агаатовское (Au, Ag), 19 – Тэутэдзжак (Au), 20 – Утро (Sb, Ag), 21 – Нявлена (Ag, Au)

Fig. 1. Schematic map showing the tectonic zoning and mineral deposit location (compiled using materials of GK-1000/3, sheets P-55 [10] and P-56 [8], with modifications):

Verkhoyansk-Chukotka fold area: 1 – Omulevsky folded-block uplift (OP) of the Indigirka-Kolyma fold system; Yana-Kolyma fold system: 2 – synclines: Verkhneindigirsky (BC), Inyali-Debinsky (IDC), Sugoiyky (SC), Armano-Viligin'sky (ABC); 3 – chain of internal anticlinoriums and uplifts: Ayan-Yuryakh anticlinorium (AYOA), Balygychan uplift (BP); 4 – Late Jurassic Uyandina-Yasachnaya volcanic belt (UYA); 5 – Early-Late Cretaceous continental marginal Okhotsk-Chukotka volcanic belt (OCHVP); 6 – Cenozoic continental basins of the Moma and Okhotsk-Anadyr rifts; intrusive complexes: 7 – collisional, Late Jurassic-Early Cretaceous; 8 – plutonic, Early-Late Cretaceous; boundaries of plutonic belts: 9 – Main Kolyma of the Late Jurassic, 10 – Priokhotsky of the Cretaceous; 11 – Vetreenskaya area; ore deposits: 12 – gold (orogenic type), 13 – gold (reduced intrusion-related Au type), 14 – gold and silver, 15 – silver, 16 – tungsten, 17 – antimony and silver, 18 – tin, 19 – uranium (*a* – large, *b* – medium, *c* – small); 20 – Central Kolyma gold-bearing region; the principal ore deposits and their numbers on the map: 1 – Verkhne-Hakchanskoe (Au), 2 – Shturmovskoe (Au), 3 – Utinskoe, 4 – Vetvistoe (Ag), 5 – Degdekan (Au), 6 – Vetreenskoe (Au), 7 – Bokhapchinskoe (W), 8 – Ekspeditsionnoe (Au), 9 – Natalka (Au), 10 – Omchakskoe (Au), 11 – Pavlik (Au), 12 – Shkol'noe (Au), 13 – Drevnee (Au), 14 – Igumenovskoe (Au), 15 – Butugychag (Sn, U), 16 – Rodionovskoe (Au), 17 – Kheta (Sn), 18 – Agatovskoe (Au, Ag), 19 – Teutedzhak (Au), 20 – Utro (Sb, Ag), and 21 – Nyavlenka (Ag, Au)

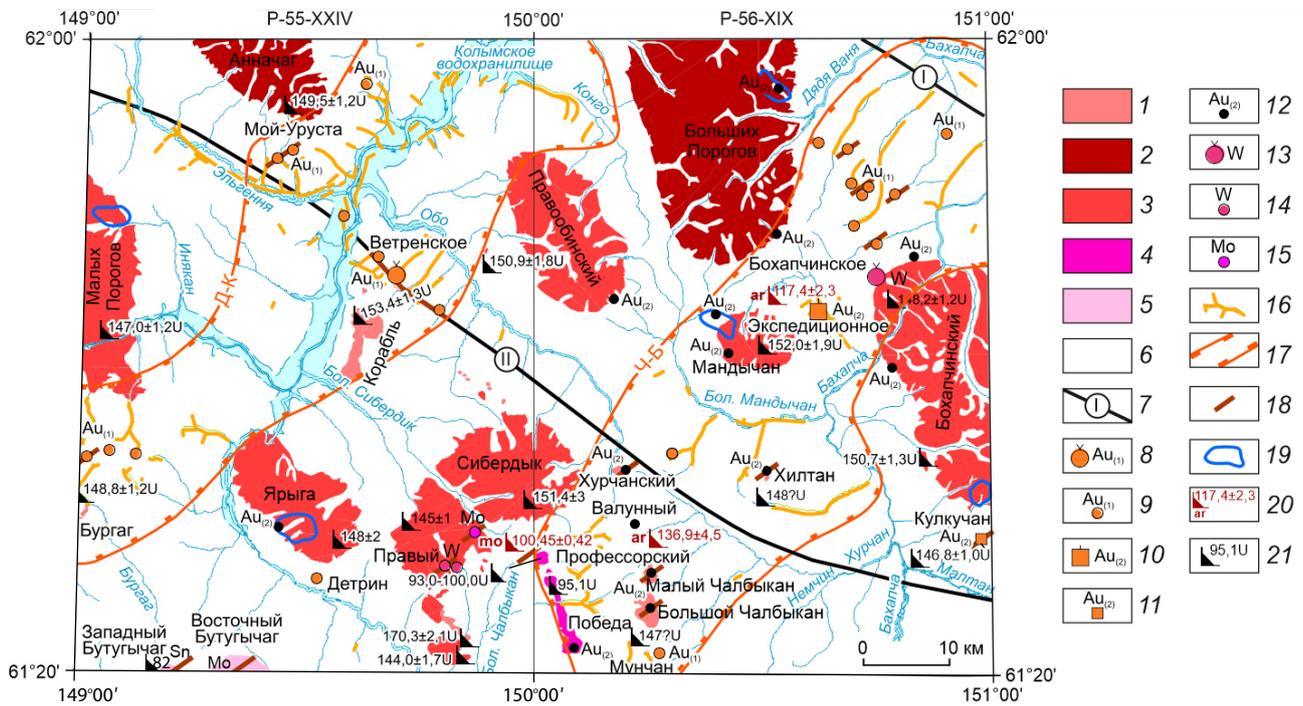


Рис. 2. Схема размещения золотого и редкометалльного оруденения с результатами ГДП-200 на Ветренской площади:

позднеюрские интрузивные комплексы: 1 – басугуньинский, 2 – колымский, 3 – сибердикский; позднемеловые интрузивные комплексы: 4 – иретьско-малкачанский, 5 – верхне-ямский; 6 – терригенно-осадочные породы поздней перми, триаса, нижней юры; 7 – региональные разломы: I – Умарский, II – Чай-Юрьинский; золото-кварцевая формация: 8 – среднее месторождение Ветренское, 9 – рудопоявления; золото-редкометалльная формация: 10 – непромышленное месторождение Экспедиционное, 11 – проявление Кулчучан, 12 – пункты минерализации; 13 – месторождение вольфрама Бохачинское; 14 – рудопоявления вольфрама; 15 – рудопоявления молибдена; 16 – россыпи золота; 17 – зоны максимальной продуктивности рудной и россыпной золотоносности (Д-К – Дусканынско-Колымская, Ч-Б – Чалбыкано-Бохачинская); 18 – направление рудных жил, прожилков, зон; 19 – вторичные геохимические аномалии золото-редкометалльного типа в пределах батолитов; пункты определения абсолютного возраста: 20 – изохронным Re-Os методом рудных минералов (ar – арсенопирит, мо – молибденит), 21 – U-Pb SHRIMP-методом интрузивных пород (с индексом «U» – результаты ГДП-200, без – данные прошлых лет [8, 10])

Fig. 2. Map of mineral resources with the results of additional geological study (GDP-200) at the Vetrenskaya area:

Late Jurassic intrusive complexes: 1 – Basuguninsky, 2 – Kolymsky, 3 – Siberdikiysky; Late Cretaceous intrusive complexes: 4 – Iretsk-Malkachansky, 5 – Verkhne-Yamsky; 6 – Late Permian, Triassic, Lower Jurassic terrigenous sedimentary rocks; 7 – regional faults: I – Umarsky, II – Chai-Yuriy; orogenic Au formational type: 8 – Vetrenskoe middle-sized ore deposit, and 9 – mineral occurrences; reduced intrusion-related Au ore formational type: 10 – Ekspeditsionnoe subeconomic ore deposit, 11 – Kulkuchan occurrence, and 12 – mineral occurrences; 13 – Bokhapchinskoe tungsten deposit; 14 – tungsten occurrences; 15 – molybdenum occurrences; 16 – gold placers; 17 – zones of the maximum productivity of lode and placer gold; 18 – orientation of ore veins, veinlets, and zones; 19 – secondary Au-Bi-As metal geochemical anomalies within batholiths; absolute dating locations: 20 – Re-Os isochron (ar – arsenopyrite, mo – molybdenite), 21 – U-Pb SHRIMP method of intrusive rocks (index U indicates the results of the geological additional study of regions (GDP-200), no index denotes previous data)

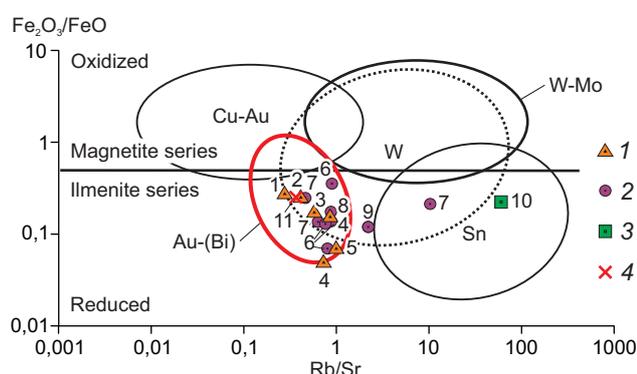


Рис. 3. Составы интрузивных пород на диаграмме $Fe_2O_3 / FeO - Rb / Sr$ [11]:

интрузивный комплекс, его возраст и название массива: 1 – басугунинский, J_3 (1 – Курум, 2 – Хилтан, 3 – Бургагинский, 4 – Большой Чалбыкан, 5 – Каприз); 2 – сибердикский, J_3 (6 – Сибердык, 7 – Малых Порогов, 8 – Ярыга, 9 – Бохапчинский); 3 – иретьско-малкачанский, K_1 (10 – Профессорский); 4 – верхне-ямский, K_2 (11 – Восточный Бутугычаг)

Fig. 3. $Fe_2O_3 / FeO - Rb / Sr$ diagram for intrusive rocks [11]:

intrusive complex, its age and name: 1 – Basuguninsky, J_3 (1 – Kurum, 2 – Khiltan, 3 – Burgaginsky, 4 – Bolshoi Chalbykan, 5 – Kapriz); 2 – Teberdinsky, J_3 (6 – Siberdyk, 7 – Malye Porogi, 8 – Yaryga, 9 – Bokhaphchinsky); 3 – Iretsk-Malkachansky, K_1 (10 – Professorskiy); 4 – Verkhne-Yamsky, K_2 (11 – Vostochny Butugychag)

темам прожилкования (послойные «sheeted», или листовидные) на месторождениях провинции Тинтина (Аляска) [15]. Характерна локализация золото-арсенопиритовых прожилков в системах тектонических трещин и зон дробления северо-восточного направления, секущих штоки или проходящих по их контактам.

Наиболее типичным признаком золото-редкометалльной минерализации является развитие вкрапленного, прожилкового, агрегатно-гнездового арсенопирита (рис. 4). В отдельных участках прожилков его количество составляет до 50 % и более, до образования мономинеральных прожилковидных выделений по плоскостям трещин. В меньшем количестве развиты пирит, лёллингит, пирротин, халькопирит,

шеелит, редко – молибденит. Прожилки сопровождаются маломощными (до первых сантиметров) оторочками метасоматитов серицит-кварцевого состава с вкрапленностью метакристаллов пирита и арсенопирита и спорадически проявленной карбонатизацией (кальцит, анкерит).

Рудные образования характеризуются в целом невысокой золотоносностью (0,1–3,0 г/т). В отличие от золото-кварцевого формационного типа, часто, наряду с золотом, фиксируются повышенные до 10–50 г/т и более содержания серебра, отсутствуют экстремально высокие содержания золота. Повышенные (до 15 г/т) содержания золота по штучному опробованию, как правило, связаны с обогащением проб арсенопиритом. Участки развития сульфидно-кварцевого прожилкования в штоках сопровождаются интенсивными вторичными геохимическими аномалиями Au-As-Bi-W с высокой корреляцией этих элементов. Нередки крупные ореолы золота с содержанием > 0,1 г/т. В ручьях развиты шлиховые ореолы золота и шеелита.

В результате минералого-петрографических исследований установлен однотипный вещественный состав рудной минерализации и сопутствующих околорудных метасоматитов на всех изученных проявлениях.

Золотоносность руд определяется проявлением интенсивной гнездово-вкрапленной лёллингит-арсенопиритовой минерализации с тонкодисперсной (< 10 мкм) вкрапленностью минералов висмута (висмутин, самородный висмут и др.) и низкопробного самородного золота (электрума) (рис. 5). Рудная минерализация представлена двумя последовательно сформированными продуктивными ассоциациями.

Ранняя пирит-арсенопиритовая минерализация входит в состав околорудных метасоматитов. Пирит образует метакристаллы размером 0,5–1,0 мм. Ромбовидные кристаллы арсенопирита-1 имеют меньшие размеры (от 0,25 до 0,5 мм), иногда содержат включения халькопирита. Арсенопирит-2, характерной особенностью которого является отсутствие кристаллографических форм, образует мономинеральные прожилки и крупные (до 1 см) выделения



Рис. 4. Арсенопирит (ar) гнездово-вкрапленный в кварце (q) на месторождении Экспедиционное

Fig. 4. Nested-disseminated arsenopyrite (ar) in quartz (q) at the Ekspeditsionnoye deposit

неправильной формы в жильном и прожилковом кварце. Возможно, арсенопирит-1 и арсенопирит-2 отлагались близодновременно в различных зонах метасоматической колонки при разной степени пресыщения растворов рудообразующими компонентами. В ассоциации с арсенопиритом-2 закономерно встречается лёллингит. Золотоносность руд зависит от содержания в них арсенопирита-2, которое варьирует от 1 до 10 %.

Поздняя продуктивная ассоциация – индикаторная для данного типа оруденения – представлена минералами висмута в парагенезисе с самородным золотом (см. рис. 5). Характер наблюдаемых взаимоотношений свидетельствует о более позднем отложении золото-редкометалльной минерализации по отношению к арсенопириту-2: чаще всего она приурочена к интерстициям в катаклазированных агрегатах этого минерала.

Среди висмутовых минералов по оптическим свойствам уверенно диагностируются висмутин и самородный висмут. Присутствуют также теллуриды золота, теллуриды и сульфотеллуриды висмута. В большинстве случаев размеры их выделений, как и самородного золота, составляют 1–10 мкм. Весьма вероятно, что значительное количество золота и его спут-

ников находится в арсенопирите в виде субмикроскопической примеси. Судя по насыщенности цвета в аншлифах, самородное золото имеет низкую пробность (электрум, 500–700 ‰).

Околорудная метасоматическая зональность на всех изученных проявлениях практически идентична (рис. 6).

Вмещающие гранодиориты во внешней зоне изменений хлоритизированы и окварцованы, структура пород гипидиоморфнозернистая порфириовидного облика. Вкрапленники представлены таблитчатыми кристаллами альбитизированного, карбонатизированного и серицитизированного плагиоклаза. В промежуточной зоне темноцветные минералы полностью замещены хлоритом, плагиоклаз вкрапленников полностью альбитизирован, карбонатизирован и интенсивно серицитизирован. Отмечается анкерит. Интерстиционное пространство выполнено кварцем в виде ксеноморфных отдельных зёрен или мелких агрегатов, часто с тонкорассеянной вкрапленностью сульфидов и тонкими чешуйками хлорита. Сульфиды представлены арсенопиритом-1, пиритом, пирротинном, халькопиритом. Как правило, пирротин и халькопирит образуют мелкие выделения, приуроченные к полностью замещённым тёмноцветным минералам. Арсенопирит и пирит

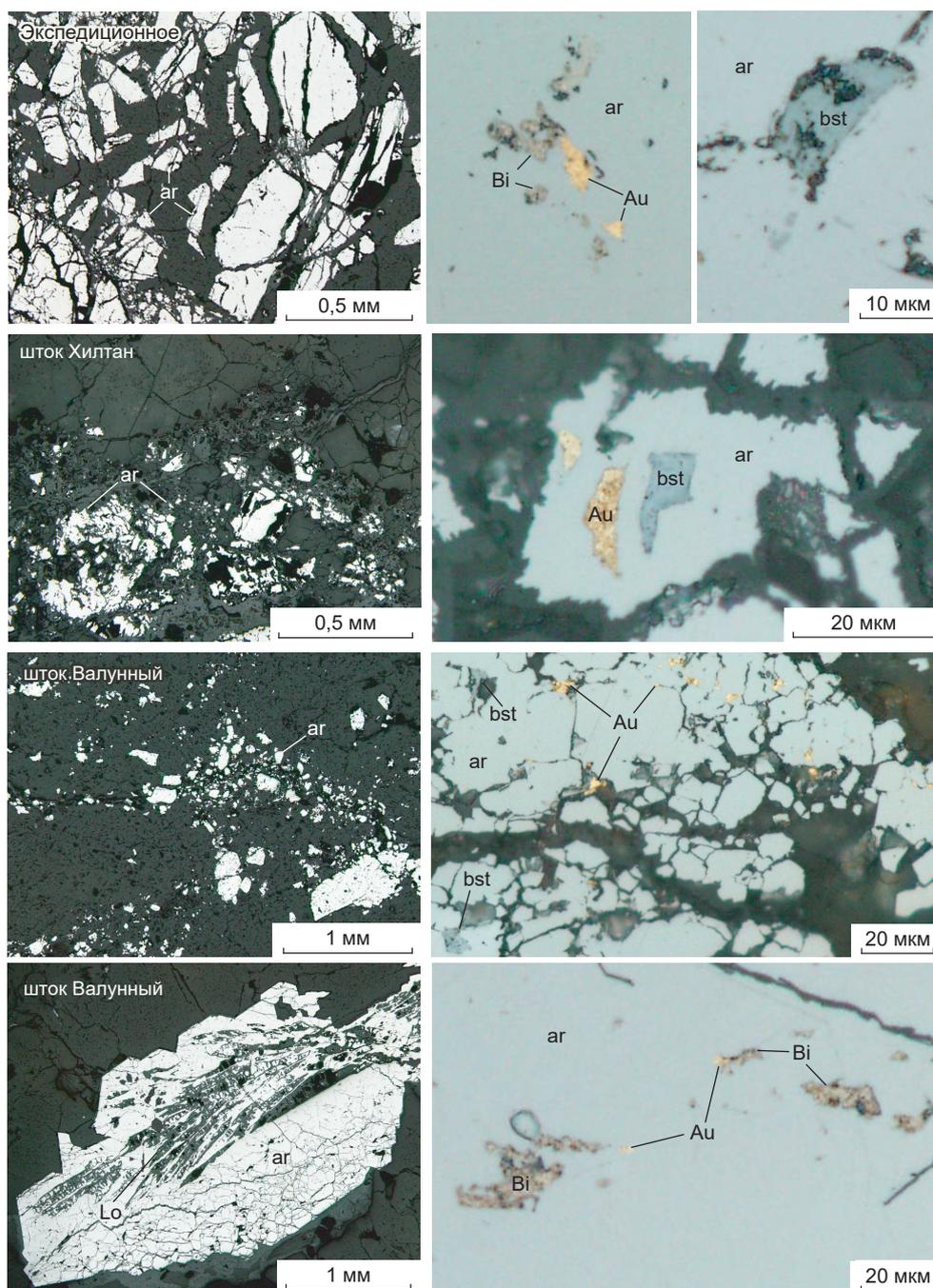


Рис. 5. Золото-редкометалльная минерализация (фото аншлифов):

минералы: ar – арсенопирит, Lo – лёллингит, bst – висмутин, Bi – самородный висмут, Au – самородное золото

Fig. 5. Au-Bi mineralization (reflected light photos of polished sections):

minerals: ar – arsenopyrite, Lo – loellingite, bst – bismuthine, Bi – native bismuth, Au – native gold

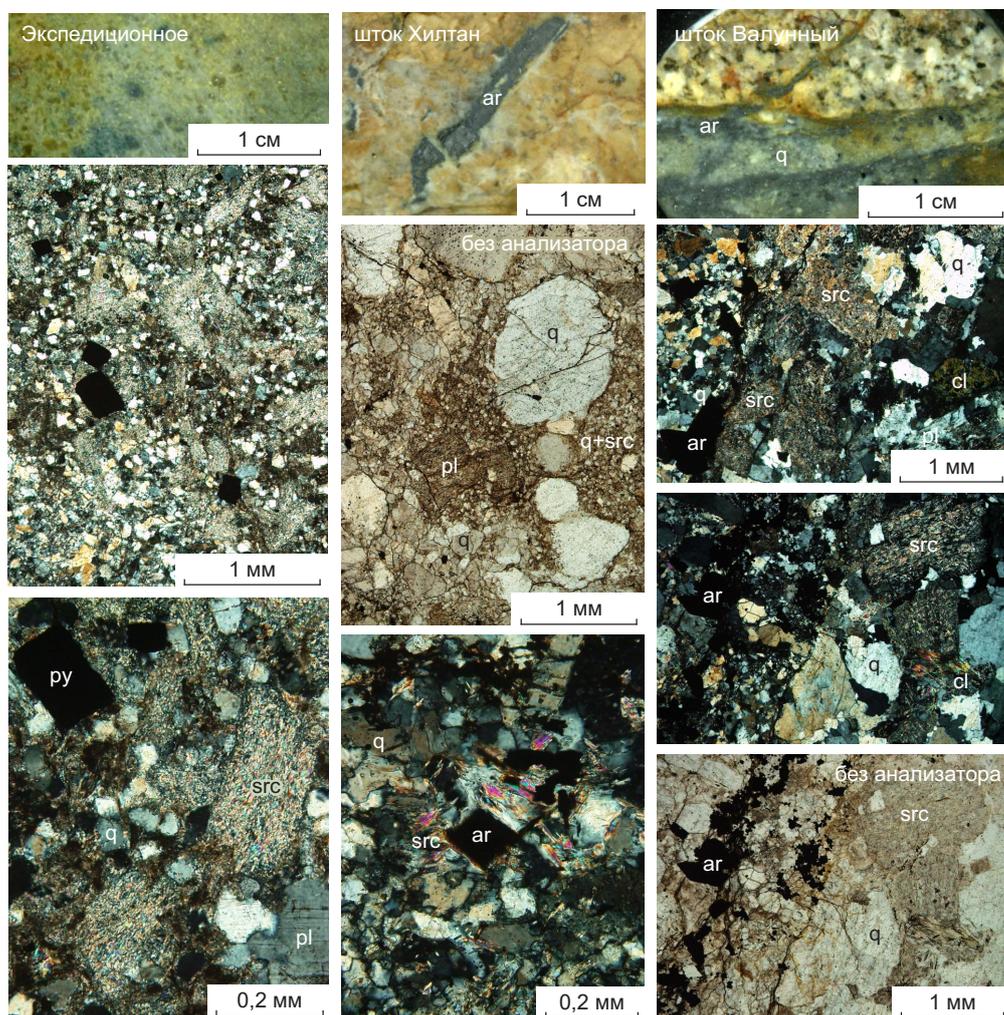


Рис. 6. Березиты, вмещающие золото-редкометалльную минерализацию (фото образцов и прозрачных шлифов):

минералы: q – кварц, pl – плагиоклаз, cl – хлорит, src – серицит, ar – арсенопирит, py – пирит

Fig. 6. Beresites hosting Au-Bi mineralization (photos of hand samples and thin sections):

minerals: q – quartz, pl – plagioclase, cl – chlorite, src – sericite, ar – arsenopyrite, py – pyrite

присутствуют в виде редких хорошо сформированных метакристаллов. Во внутренней зоне изменений увеличивается количество кварца (до 40–60 %) и серицита (30–40 %). Структура породы становится аллотриоморфнозернистой. Метасоматиты состоят из мелкозернистого агрегата серицит-кварцевого состава, в котором наблюдаются редкие скопления ре-

ликтового хлорита и таблитчатые кристаллы серицитизированного альбита. В этой зоне располагаются кварцевые прожилки мощностью до 5 см, несущие золото-редкометалльную минерализацию (арсенопирит-2, минералы висмута, самородное золото). Мощность метасоматических ореолов сопоставима с мощностью кварцевых прожилков (первые сантиметры).

Околорудные метасоматические изменения, сопровождающие золотоносную минерализацию, соответствуют низкотемпературным околожильным кислотным метасоматитам серицит-(анкерит-пирит)-кварцевого состава. В отечественной литературе подобные метасоматиты относятся к березитам и березитизированным породам [5].

Условия образования. Для определения физико-химических условий минералообразования изучены флюидные включения в жильном кварце проявлений золото-редкометалльной минерализации на месторождении Экспедиционное, в штоках Хилтанский и Валунный, а также в кварце золото-кварцевых и редкометалльных (W, Mo) проявлений Ветренской площади. Их исследование позволит сравнить закономерности эволюции рудообразующих флюидных систем, продуктивных на тот или иной тип оруденения.

Образцы жильного кварца для термобарогеохимических исследований отобраны сотрудниками ЦНИГРИ. В большинстве образцов обнаружены флюидные включения, размеры которых дали возможность выполнить цикл необходимых микротермометрических измерений (рис. 7). Результаты анализов представлены в табл. 1.

Микротермометрические анализы индивидуальных включений проводились в прозрачно-полированных пластинках с использованием криотермокамеры УМТК+ конструкции ЦНИГРИ, позволяющей выполнять охлаждение и нагревание препаратов от -180 до $+650$ °С с измерением температур фазовых переходов во включениях посредством хромель-алюмелевой термопары. Камеру калибровали при температурах тройной точки чистой CO_2 ($-56,6$ °С), температурах плавления льда в стандартных растворах NaCl (от -18 до -1 °С), температурах плавления AgNO_3 (210 °С) и K_2CrO_7 (398 °С).

Установлено, что золото-редкометалльная минерализация сформирована в интервале температур от 340 до 285 °С, который согласуется с наблюдаемым низкотемпературным характером околорудных изменений и присутствием в рудах самородного висмута (темпера-

тура плавления 270 °С). Давление при рудообразовании составляло $0,5$ – $0,3$ кбар, что в условиях литостатического градиента соответствует глубинам 2 – 1 км, гидростатического – 5 – 3 км. В рудоносных растворах содержится значительное количество метана (отношение $\text{CO}_2 / \text{CH}_4$ варьирует от 3 до $0,7$), что может свидетельствовать о поступлении золотоносных растворов из глубинных очагов восстановленной магмы. На восстановительные условия рудоотложения указывает также наличие ассоциации арсенопирита с пирротинном и лёллингом.

По физико-химическим параметрам формирования изученные золото-редкометалльные проявления Ветренской площади могут быть сопоставлены с малоглубинными среднетемпературными Au-Vi месторождениями Яно-Колымской провинции [22].

Золото-кварцевый тип представлен убогосульфидными кварцевыми жилами и прожилками в углеродисто-терригенных породах. Околорудные изменения выражены слабо и преимущественно заключаются в карбонатизации, серицитизации и окварцевании. Продуктивные ассоциации – арсенопирит-пиритовая и халькопирит-галенитовая с относительно крупным ($0,1$ – 1 мм) высокопробным самородным золотом.

Исследования флюидных включений показали, что золото-кварцевая минерализация сформирована в интервале температур 300 ± 20 °С и давлений $1,3$ – $1,4$ кбар при участии разбавленных (1 – 2 мас. % NaCl-экв.) существенно углекислотных растворов (отношение $\text{CO}_2 / \text{CH}_4$ значительно превышает 10). Рудообразование протекало на глубинах свыше 5 км от палеоповерхности (давление $1,3$ – $1,4$ кбар). Таким образом, по структурно-вещественным и термобарогеохимическим признакам золото-кварцевая минерализация Ветренской площади в полной мере соответствует оруденению так называемого орогенного типа [14, 18]. Предполагается, что в Яно-Колымском поясе подобные объекты имеют плутоногенно-метаморфогенное происхождение [4].

Редкометалльный тип оруденения включает проявления шеелитовой, вольфрамито-

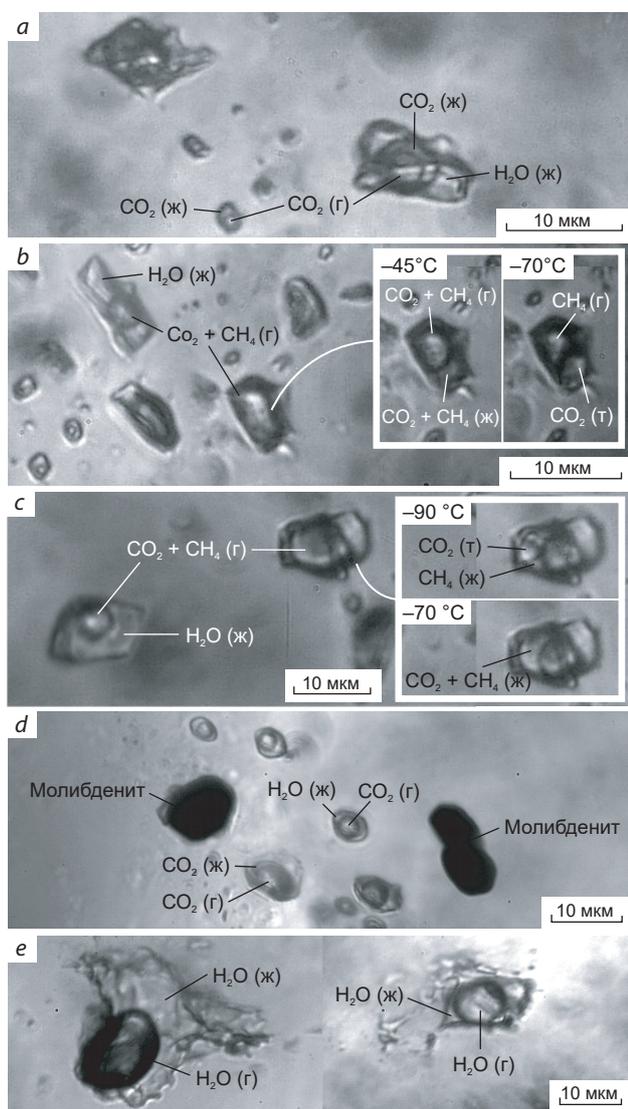


Рис. 7. Ассоциации флюидных включений в кварце месторождений и рудопроявлений различных типов:

типы минерализации: *a* – золото-кварцевый (Мой-Уруста), *b* – золото-редкометалльный (Валунный), *c* – шеелит-кварцевый (Сибердык), *d* – молибденит-кварцевый (Профессорский), *e* – кварц грейзенов (Профессорский); фазы: CO₂ – углекислота твёрдая (т), жидкая (ж), газообразная (г), CH₄ – метан жидкий и газообразный, H₂O – водно-солевой раствор (ж) и пар (г)

Fig. 7. Associations of fluid inclusions in quartz from the ore deposits and mineral occurrences of various types:

mineralization types: *a* – orogenic Au (Moy-Urusta), *b* – reduced intrusion-related Au (Valunny), *c* – scheelite-quartz (Siberdik), *d* – molybdenite-quartz (Professorsky), *e* – greisen quartz (Professorsky); phases: CO₂ – carbon dioxide: solid (т), liquid (ж), gaseous (г), CH₄ – methane liquid (ж) and gaseous (г), H₂O – water-salt solution (ж) and vapor (г)

вой и молибденитовой минерализации в кварцевых прожилках, локализованных в грейзенизированных гранитах. Сопряжённая с грейзенами молибденит-кварцевая минерализация изучена в штоке Профессорский. В жильном кварце здесь выявлены флюидные включения двух генераций. Включения ранней генерации первичны по отношению к кварцу, а их состав и свойства полностью соответствуют условиям грейзенизации [1]. Минералообразующие водно-солевые растворы во включениях имеют характерную концентрацию (10 мас. % NaCl-экв.) и были захвачены при температуре 450 ± 5 °C. Включения второй генерации со-

провожают выделения молибденита и характеризуют условия его кристаллизации. У них более низкая температура (380 ± 10 °C); присутствует газообразная углекислота с примесью метана ($CO_2 / CH_4 > 10$). Обе генерации образованы при относительно низком давлении (400 бар), которое в условиях литостатического градиента отвечает глубинам порядка 1,5 км.

Молибденит-кварцевые прожилки в штоке Каприз (Кулкучанское рудопроявление) характеризуются близкими *PT*-условиями формирования (380 °C, 550 бар) при существенно метановом составе рудоносных флюидов ($CO_2 / CH_4 = 0,25$).

Табл. 1. Параметры флюидных включений в кварце рудопроявлений Ветренской площади

Table 1. Parameters of fluid inclusions in quartz from the ore occurrences of the Vetrenskaya area

Месторождения, рудопроявления	Температуры фазовых переходов, °С					Расчётные параметры		
	Тип ФВ	$T_{гр}$	$T_{пл\ CO_2}$	$T_{гом\ C}$	$T_{гом}$	$H_2O : CO_2 : CH_4$, моль. %	NaCl, мас. %-экв.	P , бар
<i>Золото-кварцевые</i>								
Мой-Уруста	LC	9,2	-56,6	24,0 (ж)	310–320	82 : 18 : 0	1,7	1300
	C	–	-56,6	23,2 (ж)	–	15 : 85 : 0	–	
Мунчан	LC	6,5	-56,7	23,6 (ж)	290–300	88 : 12 : 0	6,6	1300
Ветренское	LC	9,0	-58,7	10,4 (ж)	280–290	80 : 19 : 1	2,0	1400
	C	–	-58,9	8,0 (ж)	–	25 : 70 : 5	–	
<i>Золото-редкометалльные</i>								
Шток Хилтан	LC	10,5	–	–	295–305	96 : 3 : 1	–	300
	C	–	-59,5	-1 (г)	–	60 : 30 : 10	–	
Экспедиционное	LC	11,8	–	–	285–315	94 : 3 : 3	–	350
	C	–	-61,8	-15 (г)	–	54 : 23 : 23	–	
Шток Валунный	LC	11,2	–	–	330–340	90 : 4 : 6	–	500
	C	–	-65,0	-30 (г)	–	25 : 30 : 45	–	
<i>Молибденит-кварцевые</i>								
Шток Профессорский	L	-6,6*	–	–	445–455	100 : 0 : 0	10,0	400
	LC	8,7	-57,5	21,1 (г)	370–390	91,5 : 8 : 0,5	2,7	400
Кулкучан	LC	9,4	-69,0	-63 (г)	375–385	90 : 2 : 8	> 4,5	550
<i>Шеелит-кварцевые</i>								
Правый (массив Сибердык)	LC	15,5	–	–	350–400	90 : 2 : 8	–	750
	C	–	-71,7	-62,8 (ж)	–	25 : 15 : 60	–	
<i>Вольфрамит-кварцевые</i>								
Бохапчинское	LC	9,7	-57,5	13,0 (ж)	315–330	74 : 25 : 1	1,0	1600
	C	–	-58,0	2,8 (ж)	–	13 : 84 : 3	–	

Примечание. Типы флюидных включений (ФВ): LC – углекислотно-водные, C – углекислотные, L – водные; измеренные температуры: $T_{гр}$ – плавления газогидрата (* – плавления льда), $T_{пл\ CO_2}$ – плавления углекислоты, $T_{гом\ C}$ – гомогенизации углекислоты в газовую (г) или жидкую (ж) фазу, $T_{гом}$ – полной гомогенизации включения путём растворения газов в воде. Расчётные параметры: $H_2O : CO_2 : CH_4$ – мольные доли (%) флюидных компонентов во включениях, оцененные по плотности газов и степени наполнения, NaCl – концентрация солей в водном растворе, определённая по $T_{гр}$; P – давление, оценённое по плотности существенно углекислотных включений и температуре гомогенизации водно-углекислотных включений, а также по растворимости CO_2 в растворе NaCl при $T_{гом}$ [7]. В каждой группе проанализировано не менее пяти индивидуальных включений.

Шеелит-кварцевая минерализация изучена на рудопроявлении Правое в эндоконтакте Сибердыкского массива гранитов. Процессы грейзенизации в породах массива протекали в условиях относительно низких температур (350–400 °С) и повышенных давлений (около 750 бар), что соответствует глубинам не ме-

нее 3 км от палеоповерхности. При этом минералообразующие растворы имели восстановленный характер с существенным преобладанием метана над углекислотой ($CO_2 / CH_4 = 0,25$).

Для вольфрамит-кварцевой жилы, залегающей в типичных мусковитовых грейзенах на

месторождении Бохапчинское, определены условия кристаллизации крупнокристаллического вольфрамита, которые соответствуют температурам 315–330 °С и давлению 1,6 кбар. В отличие от проявления вольфрама шеелитового типа Сибердыкского массива, основным газовым компонентом флюидов здесь является углекислота (отношение $\text{CO}_2 / \text{CH}_4$ значительно превышает 10).

По физико-химическим условиям формирования все изученные рудные объекты отчетливо разделяются на три группы (рис. 8). Объекты первой группы были сформированы при температурах 330–280 °С в условиях высокого давления (1,3–1,6 кбар), что фиксируется по наличию во флюидных включениях фазы жидкой углекислоты. В группу входят проявления золото-кварцевого типа в углеродисто-терригенных породах и вольфрамит-кварцевые жилы в грейзенах месторождения Бохапчинское.

Вторая группа объединяет проявления золото-редкометалльного (штоки Валунный и Хилтанский, Экспедиционное месторождение и др.) и редкометалльного оруденения (шеелитовая минерализация Сибердыкского массива, молибденитовая минерализация Кулкучанского рудопроявления). Данные объекты сформированы при относительно низких давлениях (золото-редкометалльные – 0,5–0,3 кбар, $T = 340\text{--}285$ °С, редкометалльные – 0,75–0,55 кбар, $T = 400\text{--}350$ °С) при участии восстановленных флюидов, что фиксируется по присутствию во флюидных включениях фазы газообразного метана.

Выявленное существенное различие *PT*-условий формирования объектов золото-редкометалльного и редкометалльного типов может рассматриваться как элемент термобарогеохимической зональности единой рудно-магматической системы. Согласно существующим представлениям [6], в верхней части подобных систем происходит преимущественное накопление золото-мышьяковистых (в данном случае золото-редкометалльных) руд.

К третьей группе относится проявление молибденитовой минерализации в грейзенизированных гранитах штока Профессорский. Кварц грейзенов кристаллизовался при тем-

пературе 450 ± 5 °С и давлении 0,4 кбар из водно-солевых растворов при отсутствии углеродсодержащих газов. Отложение молибденита происходило после снижения температуры до 380 °С из окисленных растворов, на что указывает наличие во включениях фазы газообразной углекислоты.

Значительная разница давлений минералообразующих флюидов позволяет предполагать, что рудные объекты выделенных групп сформированы на разных глубинах от палеоповерхности (от 5–6 до 2–3 км) и, таким образом, принадлежат к разным этапам (эпохам) рудообразования. При этом наблюдаемые различия состава рудоносных растворов (вариации отношений $\text{CO}_2 : \text{CH}_4 : \text{H}_2\text{O}$) могли быть обусловлены особенностями состава их источников – глубинных флюидно-магматических очагов.

Возраст оруденения. Традиционно в качестве рудогенерирующего для золото-редкометалльного оруденения в регионе рассматривается позднеюрский этап магматизма, так как большинство проявлений этого типа локализовано в малых интрузиях (штоки, дайки, небольшие массивы) гранитов и гранодиоритов позднеюрского возраста (см. рис. 2).

Изотопно-геохронологические характеристики интрузивных комплексов в пределах Ветренской площади и в целом в Магаданской области изучены достаточно полно. Получены также единичные оценки возраста рудных образований на основе Ar-Ar определения возраста слюд из околорудных метасоматитов. В частности, для Ветренского месторождения получена датировка 125 млн лет, для Школьного – 135,2 млн лет [13, 17]. Однако Ar-Ar метод является косвенным, поскольку синхронность образования слюд и рудных минералов не всегда однозначна.

С целью определения возраста оруденения и установления его связей с геологическими событиями и магматизмом, в 2020 г. в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ проведены изотопно-геохронологические исследования изохронным Re-Os методом [16], который признан наиболее достоверным при датировании сульфидных руд [20].

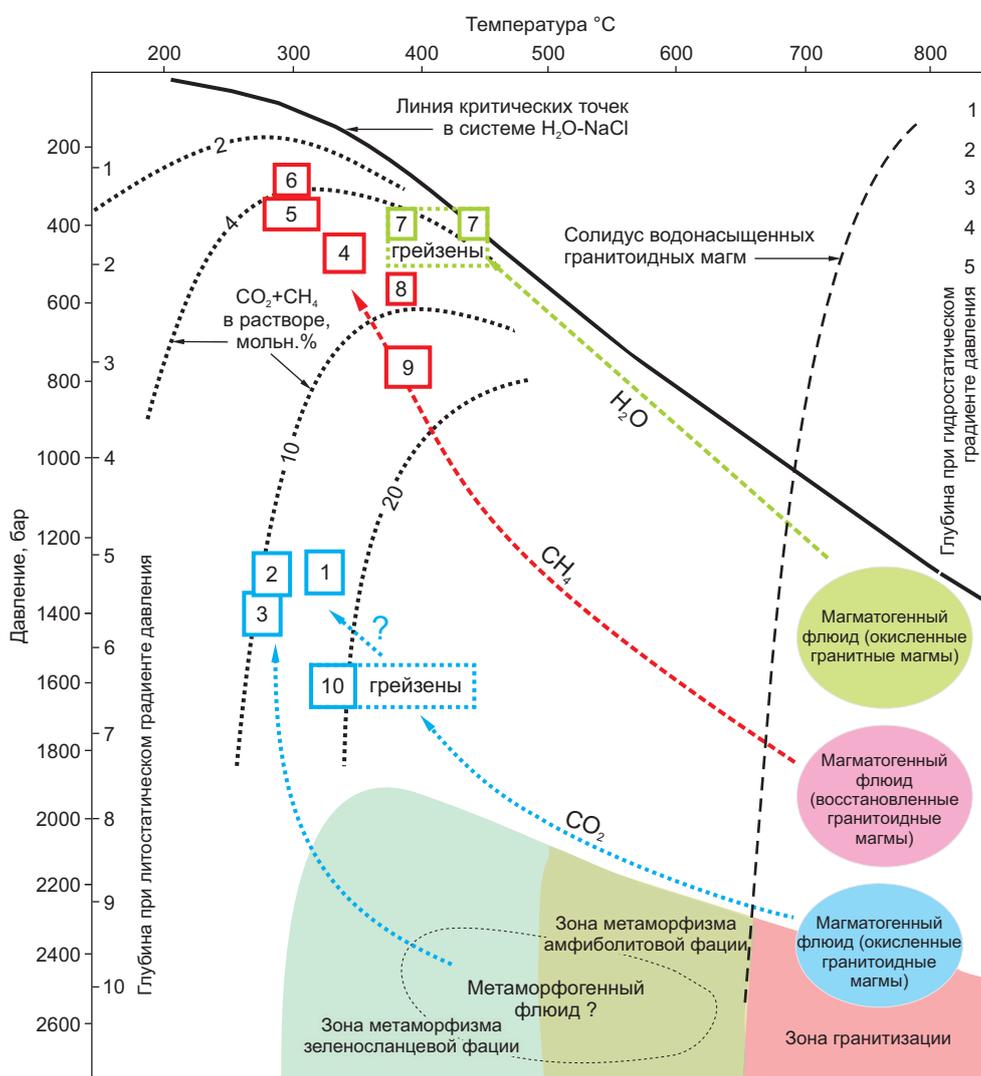


Рис. 8. *PT*-условия формирования рудной минерализации Ветренской площади:

линии и поля на диаграмме, по [19]; показаны вероятные тренды эволюции рудообразующих флюидов; типы минерализации (участки, месторождения): золото-кварцевый (1 – Мой-Уруста, 2 – Мунчан, 3 – Ветренское), золото-редкометалльный (4 – Валунный, 5 – Экспедиционное, 6 – Хилтан), молибденит-кварцевый (7 – Профессорский, 8 – Кулкучан), шеелит-кварцевый (9 – Правый), вольфрамит-кварцевый (10 – Бохапчинское)

Fig. 8. *PT* conditions of the ore mineral formation at the Vetrenskaya area:

lines and fields in the diagram, after [19]; probable trends of evolution of the ore-forming fluids are shown; mineralization types (mineralized zones, ore deposits): orogenic Au (1 – Moy-Urusta, 2 – Munchan, 3 – Vetrenskoe), reduced intrusion-related Au (4 – Valunnyi, 5 – Ekspeditsionnoe, 6 – Khiltan), molybdenite-quartz (7 – Professorsky, 8 – Kulkuchan), scheelite-quartz (9 – Pravyi), and wolframite-quartz (10 – Bokhapchinskoe)

Поскольку арсенопирит-2 – главный минерал-концентратор золота в рудах золото-редкометалльного типа, его изотопный возраст наиболее близок к времени рудообразования. Для геохронологических исследований отобраны четыре пробы арсенопирита-2 из проявления штока Валунный и пять проб из проявления Экспедиционное. В сравнительном плане проанализирован также молибденит из редкометалльного проявления штока Профессорский (шесть проб).

Выделение и очистку Re и Os для изотопного анализа выполняли по общепринятой методике [12]. Изотопный состав осмия измерен на твёрдофазном мультиколлекторном масс-спектрометре Triton на ионном счётчике в динамическом режиме в отрицательных ионах. Для коррекции на масс-фракционирование использовано отношение $^{192}\text{Os} / ^{188}\text{Os} = 3,092016$. Значение внутреннего стандарта $^{187}\text{Os} / ^{188}\text{Os} = 0,11997 \pm 0,00001$. Для измерения изотопного состава Re использован масс-спектрометр с индуктивно-связанной плазмой Element-2. Полученные результаты представлены в таблице 2.

По результатам Re-Os изохронного датирования возраст арсенопирита из руд месторождения Экспедиционное составил $117,6 \pm 2,3$ млн лет, арсенопирита из золотоносных арсенопирит-кварцевых прожилков в гранодиоритах штока Валунный – $137,1 \pm 4,5$ млн лет, молибденита из кварц-молибденитовых прожилков в гранитах штока Профессорский – $100,6 \pm 0,4$ млн лет (рис. 9).

Изотопный состав серы датированных арсенопиритов определён в ЦНИГРИ. Серу сульфидов переводили в SO_2 посредством реакции с CuO при 760°C в вакууме с последующими криогенной очисткой газа и анализом изотопного состава серы на масс-спектрометре МИ-1201. Результаты пересчитаны по отношению к метеоритному стандарту CDT. В качестве эталонов использовали лабораторный стандартный образец ЦНИГРИ «Пирит Гайского месторождения» с $\delta^{34}\text{S} = +0,7\text{‰}$ и стандартный образец сфалерита NBS 123 с $\delta^{34}\text{S} = +17,3\text{‰}$. Точность измерений составляет $\pm 0,2\text{‰}$. Образец 2195-4 (Валунный) показал значение $\delta^{34}\text{S} =$

$-7,2\text{‰}$, в образце 2350-9 (Экспедиционное) $\delta^{34}\text{S} = -4,9\text{‰}$.

Рудовмещающий шток Валунный не датирован, но для соседнего штока Большой Чалбыкан аналогичного состава того же басугуньинского комплекса возраст 147 млн лет определён U-Pb методом по циркону (ЦИИ ВСЕГЕИ). Крупная рудовмещающая дайка диорит-порфиров на месторождении Экспедиционное не имеет датировок. По геологическому положению и составу её можно отнести к нера-бохалчинскому или к басугуньинскому комплексу с возрастом порядка 150 млн лет. Полученные датировки арсенопирита свидетельствуют о более молодом возрасте рудной минерализации. Разрыв между возрастными арсенопиритов и вмещающих интрузивных пород в случае с рудами месторождения Экспедиционное очень значителен и составляет ~ 40 млн лет, в штоке Валунный он меньше – ~ 10 млн лет.

Полученный интервал возрастов арсенопирита (137–117 млн лет) соответствует времени формирования серицита из околорудных метасоматитов на ряде золоторудных (в том числе золото-редкометалльных) объектов Яно-Колымского пояса [9].

По результатам литохимического опробования донных отложений и почв ЦНИГРИ установлены комплексные золото-редкометалльные (Au-As-Bi-W-Sn) аномалии на гранитах массива Ярыга сибердикского комплекса (J_3) в верховьях руч. Крутой (рис. 10). Концентрация золота в пробах почв достигает 0,9 г/т. Наложение вторичных геохимических аномалий золото-редкометалльной ассоциации на крупные интрузивные массивы сибердикского и колымского комплексов также свидетельствует о постбатолитовом возрасте золото-редкометалльного оруденения.

Важной особенностью, установленной в результате работ, является ведущее значение в контроле размещения проявлений золото-редкометалльной минерализации системы тектонических трещин, разрывов, зон дробления северо-восточного направления. Северо-восточное направление прожилковых зон отмечено в пределах штоков Чалбыканской и Малтанской групп, в штоке Хилтан и в рудовмещаю-



Табл. 2. Результаты изотопного Re-Os анализа сульфидов

Table 2. Results of Re-Os isotopic analysis of sulfides

Номера образцов	Содержание		$^{187}\text{Re} / ^{188}\text{Os}$	Погрешность $\pm 2\sigma$, %	$^{187}\text{Os} / ^{188}\text{Os}$	Погрешность $\pm 2\sigma$, %	Изохронный возраст, млн лет
	Re, ppm	Os, ppb					
<i>Арсенопирит (Валунный)</i>							
2198-1a-1	0,213	0,036	29,87	1,338	0,452	0,54679	137,1 \pm 4,5
2195-4-2	0,229	0,029	40,14	0,034	0,832	0,56951	
2195-2-3	0,504	0,026	100,60	0,546	1,170	0,70756	
2198-1-5	0,710	0,035	103,44	0,381	0,855	0,71502	
<i>Арсенопирит (Экспедиционное)</i>							
2350-9-1	0,297	0,030	50,89	0,221	0,697	0,62430	117,6 \pm 2,3
2350-9-2	0,397	0,035	57,79	0,241	1,241	0,63831	
2350-9-3	0,879	0,031	148,50	0,417	0,577	0,81958	
2350-9-4	0,459	0,046	50,67	0,478	0,677	0,62488	
2350-9-5	1,023	0,028	193,09	0,104	0,632	0,90034	
<i>Молибденит (Профессорский)</i>							
6059	20,1	36,8	6394	0,089	0,420	11,20	100,6 \pm 0,4
6060	51,0	70,3	15389	0,199	0,813	26,39	
6061	10,5	29,3	2894	0,067	0,489	5,340	
6062	60,7	83,4	15549	0,080	0,697	26,64	
6063	17,1	31,0	6608	0,169	0,264	11,56	
6064	48,4	154	2356	0,129	0,576	4,471	

щей дайке на месторождении Экспедиционное (см. рис. 2). При этом главное рудоконтролирующее направление для золото-кварцевого оруденения в регионе – северо-западное (месторождения Ветренское, Наталка, Павлик и др.).

Северо-восточное направление имеют зоны максимальной продуктивности россыпной золотоносности (см. рис. 2), которая наиболее объективно отражает площади развития золоторудной минерализации в коренных породах.

Широкое площадное развитие и выдержанность направления данных структур позволяют выделить региональную рудоконтролирующую систему северо-восточной рассеянной трещиноватости. Эта система является рудоносной не только для золото-редкометалльного типа минерализации, но и контролирует размещение широкого спектра других полезных ископаемых в рассматриваемом районе.

В поздне меловом гранитном массиве Западный Бутугычаг северо-восточные разрывы являются рудовмещающими для оловянного

и уранового оруденения (Бутугычагское месторождение), в массиве Восточный Бутугычаг вмещают молибденит-кварцевые жилы, в позднеюрском Сибердыкском массиве контролируют кварц-шеелитовые (проявление руч. Правый) и кварц-молибденитовые прожилки и жилы (проявление Семёновский), в районе поздне мелового штока Профессорский – молибденовую, урановую, серебряную минерализацию. Вольфрамоворудное месторождение Бохапчинское представлено линейным штоком северовосточного простирания (см. рис. 2).

Северо-восточные зоны имеют значительные протяжённость и ширину, нечёткие границы, слабо выраженные в геологических и геофизических полях. «Вспышки» оруденения наблюдаются только в пределах наложения зон на интрузивные тела различного размера (массивы, штоки, дайки) и, в подчинённом количестве, на роговики и песчаники (месторождение Экспедиционное) в экзоконтактах этих тел.

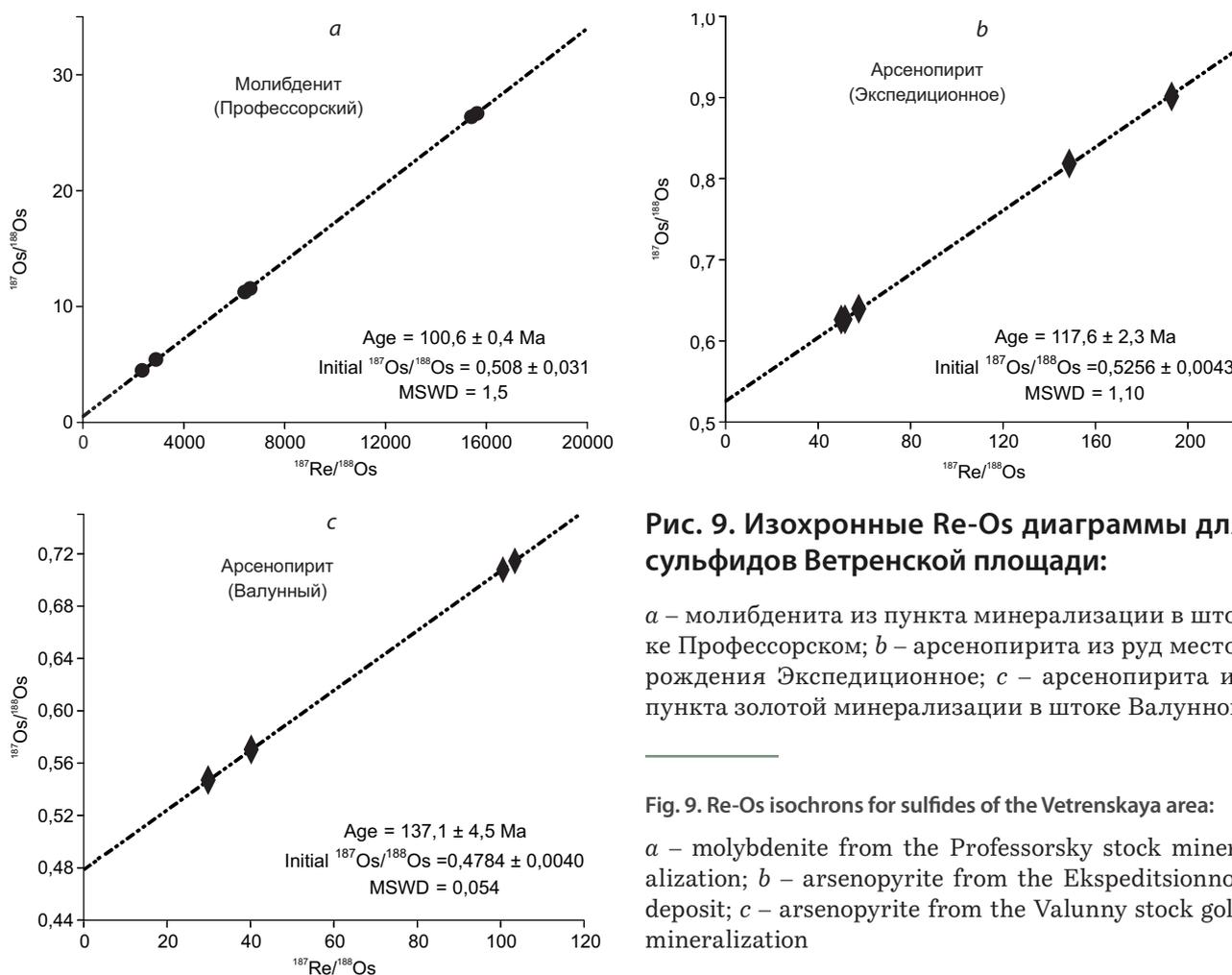


Рис. 9. Изохронные Re-Os диаграммы для сульфидов Ветренской площади:

a – молибденита из пункта минерализации в штоке Профессорском; *b* – арсенопирита из руд месторождения Экспедиционное; *c* – арсенопирита из пункта золотой минерализации в штоке Валунном

Fig. 9. Re-Os isochrons for sulfides of the Vetrenskaya area:

a – molybdenite from the Professorsky stock mineralization; *b* – arsenopyrite from the Ekspeditsionnoe deposit; *c* – arsenopyrite from the Valunnyy stock gold mineralization

В монотонных толщах преимущественно алевролитового состава такая система не выражена.

Однотипные морфологические особенности, серебро-золото-редкометалльная рудная специализация, развитие на большой площади показывают, что изучаемая система рудоносных трещин могла приоткрыться и стать проницаемой для рудоносных растворов в обособленный этап функционирования регионального поля напряжений, сопряжённого с определённым рудно-тектоническим этапом. Они могут интерпретироваться как региональная система трещин отрыва, механизм образования которой до конца не ясен. Возможно, она возникла при продольном растяжении (в направлении северо-запад – юго-восток) и изгибе при подъёме территории относительно зо-

ны будущего ОЧВП. В этом случае находят объяснение рассеянный характер трещиноватости, её мало- и безамплитудность, приуроченность к крупным поверхностям раздела (боковые зоны магматогенных валов) и преимущественное развитие в более компетентных породах (гранитах, песчаниках).

Подъём территории подтверждается различной глубиной формирования золото-кварцевого оруденения (син- или постбатолитового), оцениваемой в 5–6 км, и золото-редкометалльной минерализации (2–3 км), при том, что в современном положении они находятся на одном гипсометрическом уровне. Интересно также отметить, что более ранняя золото-редкометалльная минерализация штока Валунный (137 млн лет), по сравнению с проявлениями

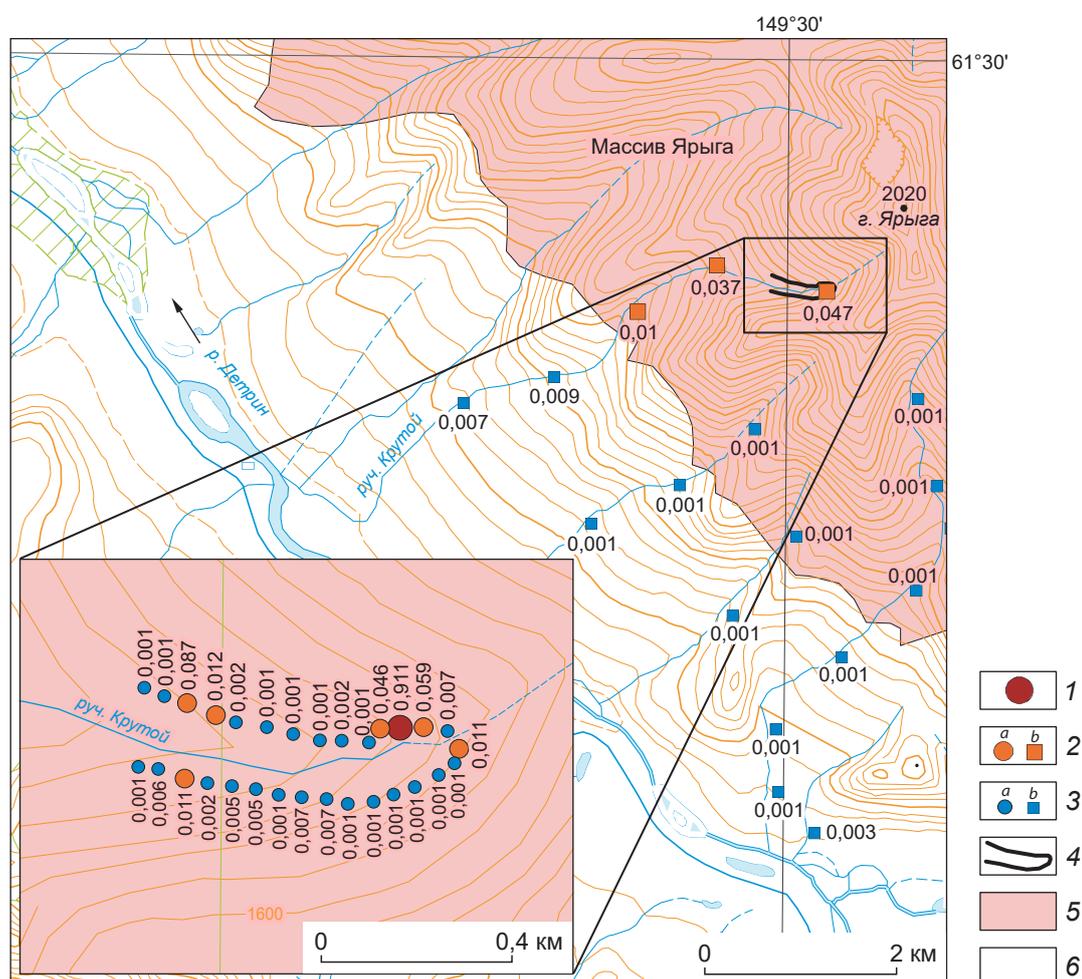


Рис. 10. Литохимические аномалии золота в донных отложениях и почвах в пределах гранитного массива Ярыга:

концентрация золота, г/т: 1 – >0,1, 2 – 0,01–0,1, 3 – 0,001–0,01 (а – в почвах, б – в донных отложениях); 4 – профиль оборотовочного литохимического опробования почв; 5 – граниты сибердикского комплекса, J₃; 6 – роговики и терригенно-осадочные породы триаса

Fig. 10. Lithochemical gold anomalies in the bottom sediments and soils within the Yaryga granite massif:

gold concentration, g/t: 1 – >0.1, 2 – 0.01–0.1, 3 – 0.001–0.01 (a – in soils, b – in bottom sediments); 4 – profile of lithochemical soil sampling; 5 – granites of the Siberdiksky complex, J₃; 6 – Triassic hornfels and terrigenous-sedimentary rocks

штока Хилтан, и месторождения Экспедиционное (117 млн лет) характеризуется относительно повышенными температурами, давлением и отношением CH₄ / CO₂ при рудообразовании (см. табл. 1).

Таким образом, система рудоконтролирующих северо-восточных нарушений имеет пеструю металлогеническую специализацию переходного типа (включая золото-редкометалльную) и наложена на интрузивы Главного Ко-

лымского батолитового пояса в переходной зоне к ОЧВП. Это подтверждается данными датирования рудных минералов, показывающих значительный отрыв между временем их образования и рудовмещающих позднеюрских штоков, наложением геохимических золото-редкометалльных аномалий на крупные гранитные массивы (см. рис. 2, 10) и малоглубинным характером золото-редкометалльного оруденения. По всем вышеперечисленным данным время формирования золото-редкометалльной минерализации в пределах листа Р-56-ХІХ может быть отнесено к меловому этапу тектоно-магматической активизации Верхояно-Колымской складчатой области [9].

В заключение приведём основные выводы.

1. Оруденение золото-редкометалльной формации, распространённое на Ветренской площади Центрально-Колымского золотоносного района, преимущественно приурочено к участкам пересечения малых интрузивных тел басугуньинского комплекса системами трещин северо-восточного направления.

2. Золото-редкометалльное оруденение представлено зонами маломощных кварцевых прожилков, которые сопровождаются около-

жилковыми серицит-кварцевыми метасоматитами. Главные рудные минералы – золотоносный арсенопирит, количество которого в рудах достигает 10 %, второстепенные – лёллингит, пирит, халькопирит, пирротин. Микроскопически видимое низкопробное самородное золото находится в тесном парагенезисе с минералами висмута (висмутин, самородный висмут, теллуриды Вi и Au) в виде микровключений (1–10 мкм) в арсенопирите.

3. Изохронный Re-Os возраст золотоносного арсенопирита составляет 137–117 млн лет. По времени формирования золото-редкометалльная минерализация значительно оторвана от вмещающих гранитоидов (около 150 млн лет).

4. Золото-редкометалльная минерализация Ветренской площади была сформирована в интервале температур от 340 до 290 °С и давлений от 0,5 до 0,3 кбар при участии восстановленных углекислотно-метановых флюидов (CO₂ / CH₄ от 0,7 до 3). По составу рудообразующих флюидов и по *PT*-параметрам она существенно отличается от золотокварцевого оруденения (как менее глубинная) и от редкометалльного (W, Mo) оруденения (как более низкотемпературная).

Список литературы

1. Бортников Н. С., Аранович Л. Я., Кряжев С. Г., Смирнов С. З., Гоневчук В. Г., Семеняк Б. И., Дубинина Е. О., Гореликова Н. В., Соколова Е. Н. Баджальская оловоносная магматогенно-флюидная система (Дальний Восток, Россия): переход от кристаллизации гранитов к гидротермальному отложению руд // Геология рудных месторождений. – 2019. – Т. 61, № 3. – С. 3–31.
2. 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. – DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-84-99.
3. Гамянин Г. Н. Минералого-генетические аспекты золотого оруденения Верхояно-Колымских мезозойд. – М. : ГЕОС, 2001. – 221 с.
4. Горячев Н. А. Происхождение золото-кварцевых жильных поясов Северной Пацифики. – Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 2003. – 143 с.
5. Жариков В. А., Русинов В. Л., Маракушев А. А., Зарайский Г. П., Омеляненко Б. И., Перцев Н. Н., Расс И. Т., Андреева О. В., Абрамов С. С., Подлеский К. В. Метасоматизм и метасоматические породы. – М. : Научный мир, 1998. – 492 с.
6. Кряжев С. Г. Гидродинамическая модель золотоносных флюидных систем в углеродисто-терригенных толщах (на примере месторождений Енисейского кряжа) // Цветные металлы и минералы – 2019 : сборник докладов Одиннадцатого международного конгресса. – 2019. – С. 670–676.
7. Кряжев С. Г. Современные проблемы теории и практики термобарогеохимии // Руды и металлы. – 2010. – № 2. – С. 38–45.



8. Кузнецов В. М., Жигалов С. В. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Р-56 (Сеймчан). – СПб., 2008.
9. Прокопьев А. В., Борисенко А. С., Гамянин Г. Н., Фридовский В. Ю., Кондратьева Л. А., Анисимова Г. С., Трунилина В. А., Васюкова Е. А., Иванов А. И., Травин А. В., Королева О. В., Васильев Д. А., Пономарчук А. В. Возрастные рубежи и геодинамические обстановки формирования месторождений и магматических образований Верхояно-Колымской складчатой области // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59, № 10. – С. 1542–1563.
10. Шпикерман В. И., Васькин А. Ф., Желебогло О. В. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Р-55 (Сусуман). – СПб., 2016.
11. Baker T., Pollard P. J., Mustard R., Mark G., Graham J. L. A comparison of granite-related tin, tungsten, and gold-bismuth deposits: implications for exploration // Society of Economic Geologists Newsletter. – 2005. – № 61. – P. 5–17.
12. Birck J. L., Barman M. R., Campas F. Re-Os isotopic measurements at the femtomole level in natural samples // Geostandards Letters. – 1997. – V. 20, № 1. – P. 19–27.
13. Goryachev N. A., Pirajano F. Gold deposits and gold metallogeny of Far East Russia // Ore Geology Reviews. – 2014. – № 59. – P. 123–151.
14. Groves D. I., Goldfarb R. J., Gebre-Mariam M., Hagemann S. G., Robert F. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationships to other deposit types // Ore Geology Reviews. – 1998. – № 13. – P. 7–27.
15. Hart C. J. R., Goldfarb R. J. Distinguishing intrusion-related from orogenic gold systems // Proceedings of the 2005 New Zealand Minerals Conference (Auckland, 13–16 November, 2005). – P. 125–133.
16. Luck J. M., Allegre C. J. The study of molybdenites through the ^{187}Re - ^{187}Os chronometer // Earth and Planetary Science Letters. – 1982. – V. 61. – P. 291–296.
17. Newberry R. J., Layer P. W., Gans P. B., Goncharov V. I., Goryachev N. A., Voroshin S. V. Preliminary chronology analysis of Mesozoic magmatism, tectonics and ore mineralization on North-East Russia according $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and trace elements data on igneous and ore rocks // Gold Mineralization and Granitoid Magmatism of North Pacific: Proceedings of the All-Russia Meeting (Magadan, 4–6 September, 1999). – Magadan: NEISRI FEB RAS, 1999. – P. 181–205.
18. Ridley J. R., Diamond L. W. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models // Reviews in Economic Geology. – 2000. – V. 13. – P. 141–162.
19. Soloviev S. G., Kryazhev S. G., Dvurechenskaya S. S., Trushin S. I. The large Bakyrchik orogenic gold deposit, eastern Kazakhstan: Geology, mineralization, fluid inclusion, and stable isotope characteristics // Ore Geology Reviews. – 2020. – V. 127. – P. 1–28.
20. Stein H. J., Morgan J. W., Markey R. J., Hannah J. L. An introduction to Re-Os: What's in it for the mineral industry? // Society of Economic Geologists Newsletter. – 1998. – № 32. – P. 8–15.
21. Thompson J. F. H., Sillitoe R. H., Baker T., Lang J. R., Mortensen J. K. Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces // Mineralium Deposita. – 1999. – V. 34. – P. 197–217.
22. Vikent'eva O. V., Prokofiev V. Y., Gamyagin G. N., Bortnikov N. S., Goryachev N. A. Intrusion-related gold-bismuth deposits of North-East Russia: PTX parameters and sources of hydrothermal fluids // Ore Geology Reviews. – 2018. – № 102. – P. 240–259.
23. Zaitsev A. I., Fridovsky V. Yu., Kudrin M. V. Granitoids of the Ergelyakh Intrusion-Related Gold-Bismuth Deposit (Kular-Nera Slate Belt, Northeast Russia): Petrology, physicochemical parameters of formation, and ore potential // Minerals. – 2019. – № 9, 297. – DOI: 10.3390/min9050297.

References

1. Bortnikov N. S., Aranovich L. Ya., Kryazhev S. G., Smirnov S. Z., Gonevchuk V. G., Semenyak B. I., Dubinina E. O., Gorelikova N. V., Sokolova E. N. Badzhal'skaya olovonosnaya magmatogenno-flyuidnaya sistema (Dal'nii Vostok, Rossiya): perekhod ot kristallizatsii granitov k gidrotermal'nomu otlozheniyu rud [Bajal Tin Magmato-Fluid System (Far East, Russia): Transition from crystallization of granites to hydrothermal deposition of ores], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits],

- 2019, V. 61, No 3, pp. 3–31. (In Russ.).
2. Volkov A. V., Sidorov A. A. Prognozno-poiskovaya model' mestorozhdenii zolota, svyazannykh s intruzivami granitoidov arkticheskoi zony Rossii [Forecast search model of gold deposits associated with the intruded granitoids of the Arctic zone of Russia], *Arktika: ekologiya i ekonomika [Arctic: Ecology and Economics]*, 2018, No 3 (31), pp. 84–99, DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-84-99. (In Russ.).
 3. Gamyarin G. N. Mineralogo-geneticheskie aspekty zolotogo orudneniya Verkhoyano-Kolymykh mezo-zoid [Mineralogical and genetic aspects of gold mineralization of the Verkhoyansk-Kolyma Mesozoids], Moscow, GEOS Publ., 2001, 221 p.
 4. Goryachev N. A. Proiskhozhdenie zoloto-kvartsevykh zhil'nykh pojasov Severnoi Patsifiki [The origin of gold-quartz residential belts of the Northern Pacific], Magadan, SVKNII DVO RAN Publ., 2003, 143 p.
 5. Zharikov V. A., Rusinov V. L., Marakushev A. A., Zairaiskii G. P., Omel'yanenko B. I., Pertsev N. N., Rass I. T., Andreeva O. V., Abramov S. S., Podlesskii K. V. Metasomatizm i metasomaticheskie porody [Metasomatism and metasomatic rocks], Moscow, Nauchnyi mir Publ., 1998, 492 p.
 6. Kryazhev S. G. Gidrodinamicheskaya model' zolotonosnykh flyuidnykh sistem v uglerodisto-terrigennykh tolshchakh (na primere mestorozhdenii Eniseiskogo kryazha) [Hydrodynamic model of gold-bearing fluid systems in carbon-terrigenous strata (on the example of the Yenisei ridge deposits)], *Tsvetnye metally i mineraly – 2019 : sbornik dokladov Odinnadtsatogo mezhdunarodnogo kongressa [Nonferrous metals and minerals – 2019: Collection of reports of the eleventh International Congress]*, 2019, pp. 670–676.
 7. Kryazhev S. G. Sovremennye problemy teorii i praktiki termobarogeokhimi [Modern problems of theory and practice of thermobarogeochemistry], *Rudy i metally [Ores and Metals]*, 2010, No 2, pp. 38–45. (In Russ.).
 8. Kuznetsov V. M., Zhigalov S. V. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Verkhoyano-Kolymyanskaya. List R-56 (Seimchan) [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1,000,000 (third generation). Verkhoyansk-Kolymyanskaya series. Sheet R-56 (Seimchan)], St. Petersburg, 2008.
 9. Prokop'ev A. V., Borisenko A. S., Gamyarin G. N., Fridovskii V. Yu., Kondrat'eva L. A., Anisimova G. S., Trunilina V. A., Vasyukova E. A., Ivanov A. I., Travin A. V., Koroleva O. V., Vasil'ev D. A., Ponomarchuk A. V. Vozrastnye rubezhi i geodinamicheskie obstanovki formirovaniya mestorozhdenii i magmaticheskikh obrazovaniy Verkhoyano-Kolymyanskoi skladchatoi oblasti [Age ranges and geodynamic settings for the formation of deposits and magmatic formations of the Verkhoyansk-Kolyma fold region], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2018, V. 59, No 10, pp. 1542–1563. (In Russ.).
 10. Shpikerman V. I., Vas'kin A. F., Zheleboglo O. V. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Verkhoyano-Kolymyanskaya. List R-55 (Susuman) [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1,000,000 (third generation). Verkhoyansk-Kolymyanskaya series. Sheet P-55 (Susuman)], St. Petersburg, 2016.
 11. Baker T., Pollard P. J., Mustard R., Mark G., Graham J. L. A comparison of granite-related tin, tungsten, and gold-bismuth deposits: implications for exploration, *Society of Economic Geologists Newsletter*, 2005, No 61, pp. 5–17.
 12. Birck J. L., Barman M. R., Campas F. Re-Os isotopic measurements at the femtomole level in natural samples, *Geostandards Letters*, 1997, V. 20, No 1, pp. 19–27.
 13. Goryachev N. A., Pirajano F. Gold deposits and gold metallogeny of Far East Russia, *Ore Geology Reviews*, 2014, No 59, pp. 123–151.
 14. Groves D. I., Goldfarb R. J., Gebre-Mariam M., Hagemann S. G., Robert F. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationships to other deposit types, *Ore Geology Reviews*, 1998, No 13, pp. 7–27.
 15. Hart C. J. R., Goldfarb R. J. Distinguishing intrusion-related from orogenic gold systems, *Proceedings of the 2005 New Zealand Minerals Conference (Auckland, 13–16 November, 2005)*, pp. 125–133.
 16. Luck J. M., Allegre C. J. The study of molybdenites through the ^{187}Re - ^{187}Os chronometer, *Earth and Planetary Science Letters*, 1982, V. 61, pp. 291–296.
 17. Newberry R. J., Laver P. W., Gans P. B., Goncharov V. I., Goryachev N. A., Voroshin S. V. Preliminary chronology analysis of Mesozoic magmatism, tectonics and ore mineralization on North-East Russia according $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and trace elements data on igneous and ore rocks, *Gold Mineralization and Granitoid Magmatism of North Pacific: Proceedings of the All-Russia Meeting (Magadan, 4–6 September, 1999)*,



- Magadan, NEISRI FEB RAS Publ., 1999, pp. 181–205. (In Russ.).
18. Ridley J. R., Diamond L. W. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models, *Reviews in Economic Geology*, 2000, V. 13, pp. 141–162.
19. Soloviev S. G., Kryazhev S. G., Dvurechenskaya S. S., Trushin S. I. The large Bakyrchik orogenic gold deposit, eastern Kazakhstan: Geology, mineralization, fluid inclusion, and stable isotope characteristics, *Ore Geology Reviews*, 2020, V. 127, pp. 1–28.
20. Stein H. J., Morgan J. W., Markey R. J., Hannah J. L. An introduction to Re-Os: What's in it for the mineral industry?, *Society of Economic Geologists Newsletter*, 1998, No 32, pp. 8–15.
21. Thompson J. F. H., Sillitoe R. H., Baker T., Lang J. R., Mortensen J. K. Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces, *Mineralium Deposita*, 1999, V. 34, pp. 197–217.
22. Vikent'eva O. V., Prokofiev V. Y., Gamyarin G. N., Bortnikov N. S., Goryachev N. A. Intrusion-related gold-bismuth deposits of North-East Russia: PTX parameters and sources of hydrothermal fluids, *Ore Geology Reviews*, 2018, No 102, pp. 240–259
23. Zaitsev A. I., Fridovsky V. Yu., Kudrin M. V. Granitoids of the Ergelyakh Intrusion-Related Gold-Bismuth Deposit (Kular-Nera Slate Belt, Northeast Russia): Petrology, physicochemical parameters of formation, and ore potential, *Minerals*, 2019, No 9, 297, DOI: 10.3390/min9050297.

Авторы

Пачерский Николай Викторович

старший научный сотрудник¹
pachersky@tsnigri.ru

Кряжев Сергей Гаврилович

доктор геолого-минералогических наук
заведующий отделом минералогии и изотопной геохимии¹
kryazhev@tsnigri.ru

Наумов Евгений Анатольевич

кандидат геолого-минералогических наук
заместитель генерального директора по научной работе¹
naumov@tsnigri.ru

Десяткова Дарья Юрьевна

научный сотрудник²
dariya_desyatova@vsegei.ru

Двуреченская Светлана Степановна

кандидат геолого-минералогических наук
ведущий научный сотрудник¹
dvurechenskaya@tsnigri.ru

Самойленко Максим Викторович

ведущий инженер¹
samoilenko@tsnigri.ru

¹ ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва

² ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт имени А. П. Карпинского», г. Санкт-Петербург

Authors

Pachersky Nikolay Viktorovich

Senior researcher¹
pachersky@tsnigri.ru

Kryazhev Sergey Gavrilovich

PhD
Head of department of mineralogy and isotope geochemistry¹
kryazhev@tsnigri.ru

Naumov Evgeniy Anatolievich

PhD
Deputy General Director for Research¹
naumov@tsnigri.ru

Desyatova Daria Yurievna

Researcher²
avilova@tsnigri.ru

Dvurechenskaya Svetlana Stepanovna

PhD
Leading researcher¹
dvurechenskaya@tsnigri.ru

Samoilenko Maxim Victorovich

Leading engineer¹
samoilenko@tsnigri.ru

¹ FSBI Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow, Russia

² FSBI Russian Geological Research Institute, Saint Petersburg, Russia

Никелевые аномалии и золото кварцевая минерализация в дунит-гарцбургитовых массивах Первомайско-Верхотуринской площади (Центральный Урал)

Nickel anomalies and gold-quartz mineralization in dunite-harzburgite massifs of the Pervomaisko-Verkhoturinskaya area, Central Urals

Мотов А. П., Малах Ю. Е., Воропаев И. С.

Motov A. P., Malakh Yu. E., Voropaev I. S.

В рудном поле золото-кварц-малосульфидного месторождения Анна, локализованного в выветрелых, окисленных дунит-гарцбургитах первомайского комплекса (σO_2p) Первомайско-Верхотурского района Центрального Урала, так же как и в ряде других золото-кварцевых месторождений Урала, расположены в дунит-гарцбургитовых массивах, установлены повышенные содержания Ni. Пространственная сопряжённость концентраций Au и Ni в дунит-гарцбургитах может быть объяснена частичным унаследованием тектонических нарушений, контролирующих расположение никелевых концентраций, тектоническими нарушениями, локализующими золоторудную минерализацию. Таким образом, наличие ореолов повышенного содержания Ni в дунит-гарцбургитовых массивах вместе с ореолами повышенного содержания Au является благоприятным признаком участков с перспективами обнаружения золото-кварцевой минерализации.

Ключевые слова: никелевые аномалии, дунит-гарцбургиты, золоторудная минерализация, поиски, силикатно-никелевые руды.

Along with some gold-quartz deposits hosted by dunite-harzburgite massifs elsewhere in the Urals, elevated Ni concentrations were revealed within the ore field of the Anna gold-(sulfide)-quartz deposit localized in weathered oxidized dunites and harzburgites of the Pervomaisky complex (σO_2p) in the Pervomaisko-Verkhoturinskaya area of the Central Urals. The spatial association of Au and Ni concentrations in dunites-harzburgites may be attributed to a partial inheritance of Ni-controlling tectonic dislocations by those hosting gold mineralization. Therefore, the combination of halos of Ni and Au concentrations in dunite-harzburgite massifs is a favorable indicator of areas prospective for discovery of gold-quartz mineralization.

Keywords: nickel anomalies, dunite-harzburgite complex, gold mineralization, prospecting and exploration, nickel silicate ore.

Для цитирования: Мотов А. П., Малах Ю. Е., Воропаев И. С. Никелевые аномалии и золото-кварцевая минерализация в дунит-гарцбургитовых массивах Первомайско-Верхотуринской площади (Центральный Урал). Руды и металлы. 2021. № 2. С. 90–98. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10012.

For citation: Motov A. P., Malakh Yu. E., Voropaev I. S. Nickel anomalies and gold-quartz mineralization in dunite-harzburgite massifs of the Pervomaisko-Verkhoturinskaya area, Central Urals. Ores and metals 2021, № 2, pp. 90–98. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10012.

Благоприятными структурами для локализации золоторудной минерализации являются узлы тектонических нарушений, контролирующие расположение сформированных в более ранний этап гидротермальных руд иного рудно-формационного типа. Так, золото-кварц-антимонитовые руды Майского золото-полиметаллического месторождения Чукотки сформированы на месте ранее образованных жильных касситерит-сульфидных и вкрапленных золото-пирит-арсенопиритовых руд [1]. Золото-полиметаллические руды месторождений Канады [14], Швеции [15], Рудного Алтая [3], Урала [6, 7] образовались в результате наложения золотокварцевой минерализации коллизионного этапа на колчеданно-полиметаллические руды более раннего островодужного этапа.

К указанным примерам пространственного совмещения золоторудной минерализации с ранее сформированной рудной минерализацией другого типа может быть добавлен вариант совмещения золото-кварц-малосульфидных руд с силикатно-никелевой минерализацией, наблюдаемый в дунит-гарцбургитовых массивах Урала и других регионах проявления никеленосных дунит-гацбургитов. Фактическими данными, указывающими на совмещение в пространстве рудной минерализации этих двух типов, являются:

- аномально высокие содержания Au (десятые г/т) в силикатно-никелевых рудах месторождений Уфалейское, Еловское, Буруктальское (Урал), Шклярское (Польша), массив Мусонгати (Бурунди) [2, 12, 13];

- аномально высокие содержания Ni (до 0,5 %) в рудах золоторудного месторождения Золотая Гора Урала, локализованного в дунит-гарцбургитах [4];

- приуроченность золоторудной минерализации Кировского месторождения Урала к тектонически нарушенным частям дунит-гарцбургитовых массивов, трассированных антигоритовыми серпентинитами, тремолитовыми и тальк-карбонат-хлоритовыми метасоматитами, в которых наблюдаются сростания самородного золота с никелином, антигоритом, тальком, хлоритом [10, 11];

- аномально повышенные содержания Ni в рудном поле золото-малосульфидно-кварцевого месторождения Анна, расположенном в центрально-восточном секторе Урала (рис. 1), установленные по результатам спектрального анализа в аналитической лаборатории АО «Золото Северного Урала» в 2016-2018 гг. и скорректированные данными количественного анализа методом ICP-AES в лаборатории SGS в 2021 г.

Месторождение Анна представлено крутопадающим (70–80°) на северо-восток рудным штоком с параметрами поперечного сечения 20 × 40 м, прослеженным на глубину до 120 м. Рудное тело сложено золото-малосульфидно-кварцевыми рудами, сопровождаемыми фуксит-карбонат-кварцевыми метасоматитами по дунит-гарцбургитам. До глубины порядка 40 м руды и вмещающие породы окислены и представляют собой рыхлый щебенисто-комковатый материал. Ниже этой глубинной отметки среди скальных вмещающих пород появляются первичные руды золота [5]. Вместе с тем, продукты окисления и выветривания, распространяющиеся вдоль линейных зон тектонических нарушений, прослеживаются в керне колонкового бурения до глубины 104 м. В рудном поле месторождения Анна проявлены положительные аномалии Ni с содержанием этого элемента в диапазоне 0,3–0,6 %, что, по И. В. Таловиной [12], соответствует определению никеленосных пород. В верхних частях вертикального профиля коры выветривания ореолы Ni имеют площадной, стратифицированный характер развития, ниже ореолы Ni приобретают линейную форму и крутопадающее залегание. Возможно, часть глубоко залегающих линейных и крутопадающих ореолов повышенного содержания Ni в дунит-гарцбургитах имеют гидротермальную природу, что соответствует развиваемым в последние десятилетия представлениям о смещённой экзогенно-гипогенной природе формирования концентраций Ni в ультраосновных массивах [9, 13]. Уровень накопления никеля в дунит-гарцбургитах золоторудного поля Анна не достигает уровня силикатно-никелевых руд. Бортовое содержание Ni в силикатно-никелевых рудах

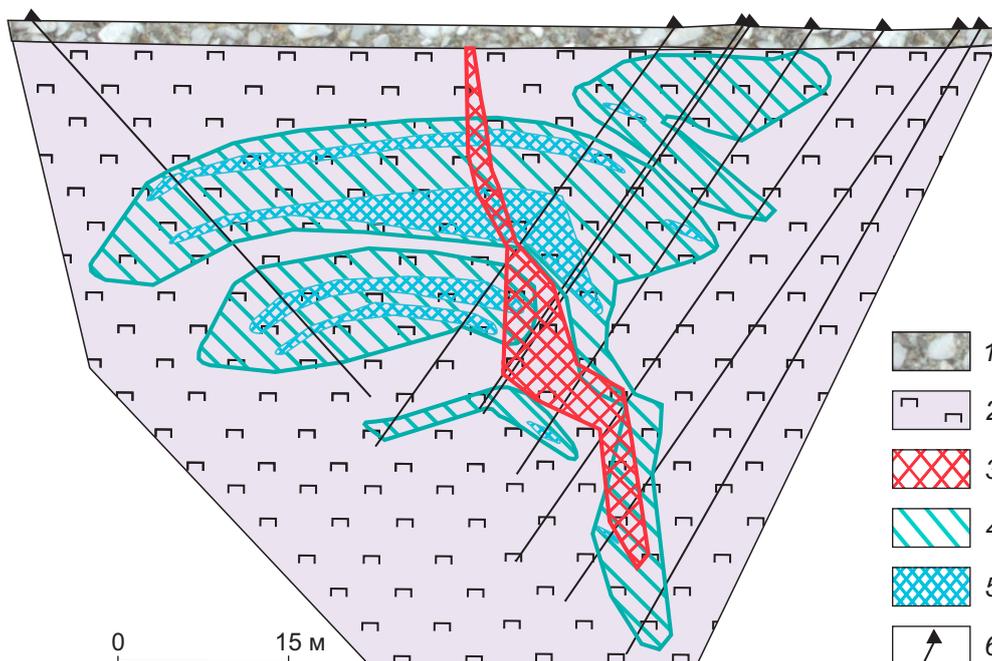


Рис. 1. Разрез рудного тела месторождения Анна и положительных аномалий Ni:

1 – покровно-почвенные отложения; 2 – дунит-гарцбургиты первомайского комплекса ($\sigma\nu O_2p$); 3 – золото-малосульфидно-кварцевые руды; никелевая аномалия: 4 – нижнего уровня $0,5\% > Ni \geq 0,3\%$, 5 – верхнего уровня $0,6\% > Ni \geq 0,5\%$; 6 – скважины колонкового бурения

Fig. 1. Geological section of the Anna deposit orebody and Ni positive anomalies:

1 – soil cover; 2 – dunites-harzburgites of the pervomaisky complex ($\sigma\nu O_2p$); 3 – gold-(sulfide)-quartz ores; Ni anomaly: 4 – lower level ($0.5\% > Ni \geq 0.3\%$), 5 – upper level ($0.6\% > Ni \geq 0.5\%$); 6 – core boreholes

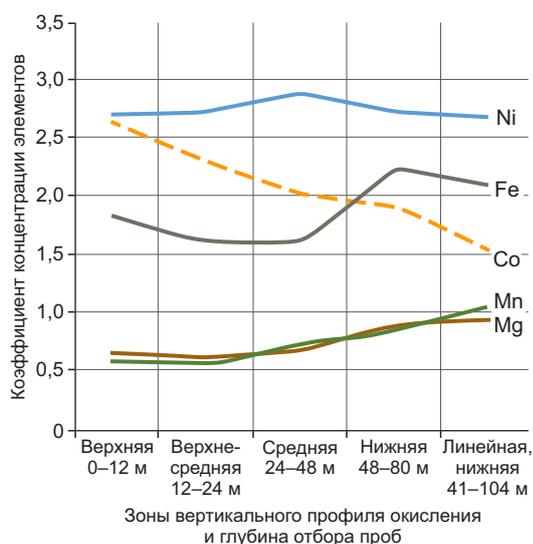


Рис. 2. Изменение коэффициента концентрации химических элементов в вертикальном профиле окисленных никельсодержащих дунит-гарцбургитов рудного поля месторождения Анна

Fig. 2. Variations in the element concentration ratios in the vertical section of oxidized Ni-containing dunites-harzburgites of the Anna ore field

1. Распределение содержаний химических элементов в дунит-гарцбургитах рудного поля месторождения Анна

1. Distribution of chemical elements in dunites-harzburgites of the Anna ore field

Химические элементы		Дунит-гарцбургиты первомайского комплекса					С локально- фоновым содержанием Ni
		Никельсодержащие					
		Зоны вертикального профиля окисления					
		Площадные, пологозалегающие		Линейная, крутопадающая			
		Число проб					
		124	142	211	61	103	106
		Глубина отбора проб, м					
Индекс	Содержание, %	Верхняя, 0–12	Верхне- средняя, 12–24	Средняя, 24–48	Нижняя, 48–80	41–104	40–114
Ni	Среднее	0,46	0,46	0,49	0,46	0,45	0,17
	Минимальное	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,00
	Максимальное	0,60	0,60	0,60	0,60	0,59	0,20
Co	Среднее	0,010	0,009	0,007	0,007	0,006	0,004
	Минимальное	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003	0,000
	Максимальное	0,055	0,026	0,024	0,021	0,010	0,006
Fe	Среднее	4,98	4,41	4,40	6,13	5,77	2,73
	Минимальное	0,50	1,00	0,50	0,50	2,00	0,50
	Максимальное	16,00	10,00	14,00	15,00	14,00	5,00
Mg	Среднее	4,94	4,66	5,21	6,70	7,02	7,58
	Минимальное	2,00	1,00	2,00	2,00	0,50	5,00
	Максимальное	9,00	9,00	11,00	12,00	12,00	10,00
Mn	Среднее	0,123	0,12	0,15	0,18	0,21	0,21
	Минимальное	0,010	0,02	0,01	0,01	0,04	0,02
	Максимальное	1,040	0,44	0,45	0,40	0,40	0,68

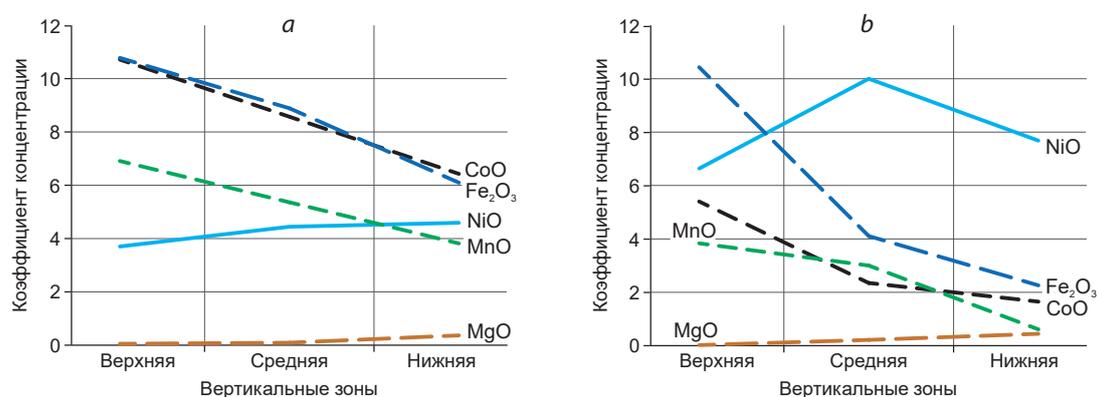


Рис. 3. Изменение коэффициента концентрации химических элементов в вертикальном профиле силикатно-никелевых руд месторождений Буруктальское (а) и Сахаринское (б)

Fig. 3. Variations in the chemical element concentration ratios in the vertical section of nickel silicate ores at the Buruktal (a) and Sakharin (b) ore deposit

2. Распределение коэффициента концентрации химических элементов в вертикальном профиле окисленных никельсодержащих дунит-гарцбургитов рудного поля месторождения Анна

2. Distribution of chemical element concentration ratios in the vertical section of oxidized Ni-containing dunites-harzburgites of the Anna ore field

Химический элемент	Зоны вертикального профиля окисления никельсодержащих дунит-гарцбургитов					Дунит-гарцбургиты с локально-фоновым содержанием Ni
	Число проб					
	124	142	211	61	103	106
	Площадные, пологозалегающие				Линейная, крутопадающая	40–114 м
Верхняя, 0–12 м	Верхне-средняя, 12–24 м	Средняя, 24–48 м	Нижняя, 48–80 м	Линейная, нижняя, 41–104 м		
Ni	2,72	2,73	2,89	2,73	2,68	1,00
Co	2,63	2,30	2,02	1,91	1,53	1,00
Fe	1,82	1,61	1,61	2,24	2,11	1,00
Mg	0,65	0,62	0,69	0,89	0,93	1,00
Mn	0,59	0,55	0,71	0,86	1,02	1,00

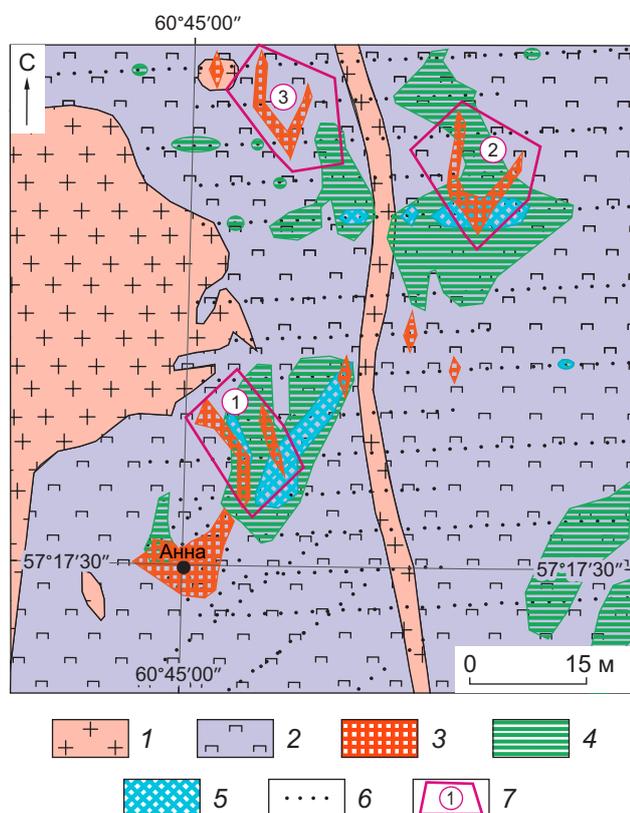


Рис. 4. Схема расположения ореолов привноса Au и Ni ($0,6\% > Ni \geq 0,3\%$) рудного Первомайско-Верхотурского района:

1 – граниты верхисетского комплекса ($\gamma C_{1-2}v$); 2 – дунит-гарцбургиты первомайского комплекса ($\sigma v O_2 p$); 3 – ореолы привноса Au ($\geq 0,1$ г/т); ореолы привноса Ni: 4 – $0,4\% > Ni \geq 0,3\%$, 5 – $0,6\% > Ni \geq 0,3\%$; 6 – точки литохимического опробования; 7 – перспективные на золотокварцевую минерализацию участки

Fig. 4. Schematic map showing positive haloes of Au and Ni ($0,6\% > ni \geq 0,3\%$) in the Pervomaisko-Verkhoturie ore district:

1 – boundaries of the verkhisetsky complex ($\gamma C_{1-2}v$); 2 – dunites-harzburgites of the pervomaisky complex ($\sigma v O_2 p$); 3 – positive au haloes (>0.1 g/t); positive ni haloes: 4 – $0.4\% > ni \geq 0.3\%$; 5 – $0.6\% > ni \geq 0.3\%$; 6 – lithochemical sampling stations; 7 – sites prospective for gold-quartz mineralization

3. Параметры содержания NiO, CoO, Fe₂O₃, MgO, MnO в вертикальном профиле силикатно-никелевых руд Буруктальского и Сахаринского месторождений (Урал), по [12]

3. Concentration parameters of NiO, CoO, Fe₂O₃, MgO, and MnO in the vertical section of nickel silicate ores at the Buruktal and Sakharinskoe ore deposits in the Urals, after [12]

Месторождение	Оксиды	Содержание				Коэффициент концентрации			
		Рудные зоны вертикального профиля окисления			Неокисленные	Рудные зоны вертикального профиля окисления			Неокисленные
		верхняя	средняя	нижняя		верхняя	средняя	нижняя	
		гётитовая	нонтронитовая	лизардитовая		гётитовая	нонтронитовая	лизардитовая	
Буруктальское	NiO	1,00	1,20	1,24	0,27	3,70	4,44	4,59	1,00
	CoO	0,150	0,120	0,090	0,014	10,71	8,57	6,43	1,00
	Fe ₂ O ₃	47,75	39,37	27,02	4,430	10,78	8,89	6,10	1,00
	MgO	2,24	3,86	15,35	41,77	0,05	0,09	0,37	1,00
	MnO	0,760	0,59	0,42	0,11	6,91	5,36	3,82	1,00
Сахаринское	NiO	1,46	2,20	1,69	0,22	6,64	10,00	7,68	1,00
	CoO	0,108	0,047	0,033	0,020	5,40	2,35	1,65	1,00
	Fe ₂ O ₃	66,23	26,08	14,35	6,350	10,43	4,11	2,26	1,00
	MgO	0,81	7,97	16,31	36,66	0,02	0,22	0,44	1,00
	MnO	0,690	0,54	0,11	0,18	3,83	3,00	0,61	1,00

Урала – 0,9 %. Эта цифра, в частности, приводится И. В. Таловиной [12] для кондиций силикатно-никелевых руд Буруктальского месторождения. Распределение содержания рудных (Ni и Co) и петрогенных элементов (Fe, Mg, Mn) в вертикальном профиле никеленосных пород рудного поля золотокварцевого месторождения Анна (табл. 1, рис. 2) и в силикатно-никелевых рудах Буруктальского и Сахаринского месторождений (табл. 2, 3, рис. 3) [8, 12] обладает следующими чертами сходства:

- Ni накапливается в средней и нижней зонах окисления;
- Co и Fe концентрируются в верхней зоне окисления;
- верхняя зона окисления в наибольшей степени обеднена Mg и Mn.

Сходство распределения химических элементов в рудах никелевых месторождений и в

ореоле повышенного содержания Ni на участке золоторудного поля месторождения Анна, близость расположения ореолов привноса Ni и Au, как на месторождении Анна (см. рис. 1), так и шире – в Первомайско-Верхотурском районе (рис. 4) – предполагают пространственную близость тектонических структур, контролирующих как золоторудную минерализацию, так и ореолы накопления Ni.

Заключение. Практическим следствием проведённых наблюдений является выделение и интерпретация участков близкого пространственного расположения геохимических аномалий Ni и Au в дунит-гарцбургитах Первомайско-Верхотуринского и других районов Урала в качестве участков, перспективных на обнаружение золотокварцевой минерализации.

Список литературы:

1. Бортников Н. С., Брызгалов И. А., Кривицкая Н. Н., Прокофьев В. Ю., Викентьева О. В. Майское многоэтапное прожилково-вкрапленное золото-сульфидное месторождение (Чукотка, Россия): минералогия, флюидные включения, стабильные изотопы (О и S), история и условия образования // Геология рудных месторождений. – 2004. – Т. 46, № 6. – С. 475–509.
2. Воронцова Н. И., Таловина И. В. Платиноиды, золото и серебро в месторождениях кор выветривания на офиолитовых массивах с дунит-гарцбургитовым типом субстрата, Урал // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Проблемы геологии и эксплуатации месторождений платиновых металлов (I научные чтения памяти проф. В. Г. Лазаренкова)». – 2016. – СПб. : СПГУ. – С. 111–119.
3. Гусев А. И., Гусев Н. И. Петрология магматических систем золото-обогащённых колчеданных объектов Рудного Алтая и Салаира // Природные ресурсы Горного Алтая. Геология, геофизика, гидрогеология, геоэкология, минеральные и водные ресурсы. – 2015. – № 19, вып. 1–2. – С. 68–78.
4. Мурзин В. В., Варламов Д. А., Пальянова Г. А. Условия образования золотоносных магнетит-хлорит-карбонатных пород Карабашского массива гипербазитов // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58, № 7. – С. 1006–1007.
5. Несис В. Н., Мотов А. П., Бутняков А. В. Вертикальная геохимическая зональность окисленных руд золоторудных месторождений Анна и Шилловское, Центральный Урал // Руды и металлы. – 2019. – № 4. – С. 34–45.
6. Несис В. Н., Мотов А. П., Бутняков А. В. Золото-обогащённое Саумское и Галкинское месторождения, Северный Урал // Руды и металлы. – 2019. – № 2. – С. 73–83.
7. Несис В. Н., Мотов А. П., Бутняков А. В. Соотношение колчеданно-полиметаллической и золоторудной минерализации месторождения Тамуньер (Северный Урал) // Уральская минералогическая школа. – 2019. – Екатеринбург : Универсальная Типография «Альфа Принт». – 2019. – С. 100–103.
8. Никеленосные коры выветривания Урала // под ред. Н. В. Павлова. – М. : Наука, 1970. – 288 с.
9. Сагдиева Р. К., Таловина И. В., Воронцова Н. И. Современные взгляды на формирование никеленосных кор выветривания ультраосновных массивов на Урале // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 16. – С. 278–288.
10. Сазонов В. Н., Мурзин В. В., Огородников В. Н., Волченко Ю. А. Золотое оруденение, сопряжённое с альпинотипными ультрабазитами (на примере Урала) // Литосфера. – 2002. – № 2. – С. 63–77.
11. Сначев В. И., Рыкус М. В., Савельев Д. Е., Грицук А. Н. Благороднометалльное оруденение дунит-гарцбургитовой и черносланцевой формации западного склона Южного Урала // Геологический сборник. – 2001. – № 2. – С. 152–162.
12. Таловина И. В. Геохимия уральских оксидно-силикатных никелевых месторождений. – СПб. : Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2012. – 272 с.
13. Таловина И. В., Лазаренков В. Г., Воронцова Н. И., Пилюгин А. Г., Гайфутдинова А. М. Элементы платиновой группы, золото и серебро в гипергенных никелевых месторождениях на офиолитовых массивах с дунит-гарцбургитовым субстратом // Записки Горного института. – 2013. – Т. 200. – С. 310–320.
14. Dube B., Gosselin P., Hannington M., Galley A. Gold-rich volcanogenic massive sulphide deposits // 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. – 2007. – Special Publication № 5. – P. 75–94.
15. Mercier-Langevin P., McNicoll V., L. Allen R., Blight J. H. S., Dubé B. The Boliden gold-rich volcanogenic massive sulfide deposit, Scellefte district, Sweden: new U-Pb Age constraints and implications at deposit and district scale // Mineralium Deposita. – 2013. – № 48. – P. 485–504.

References:

1. Bortnikov N. S., Bryzgalov I. A., Krivitskaya N. N., Prokof'ev V. Yu., Vikent'eva O. V. Maiskoe mnogostapnoe prozhil'kovo-vkraplennoe zoloto-sul'fidnoe mestorozhdenie (Chukotka, Rossiya): mineralogiya, flyuidnye vklyucheniya, stabil'nye izotopy (O i S), istoriya i usloviya obrazovaniya [Multi-stage vein-



- ned gold-sulfide deposit (Chukotka, Russia): mineralogy, fluid inclusions, stable isotopes (O and S), history and conditions of formation], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits], 2004, V. 46, No 6, pp. 475–509. (In Russ.).
2. Vorontsova N. I., Talovina I. V. Platinoidy, zoloto i srebro v mestorozhdeniyakh kor vyvetrivaniya na ofiolitovykh massivakh s dunit-gartsburgitovym tipom substrata, Ural [Platinoids, gold and silver in the fields of weathering on ophiolitic arrays with a Dunit-Harzburgite type of substrate, the Urals], *Materialy Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Problemy geologii i ekspluatatsii mestorozhdenii platinovykh metallov (I nauchnye chteniya pamyati prof. V. G. Lazarenkova)"* [Proceedings of the All-Russian Conference with the International Participation "Problems of Geology and Operations of Platinum Metal Fields (I Scientific Research in memory of the Prof. V. G. Lazarenkov)"], 2016, St. Petersburg, SPGU Publ., pp. 111–119. (In Russ.).
 3. Gusev A. I., Gusev N. I. Petrologiya magmatischeskikh sistem zoloto-obogashchennykh kolchedannykh ob"ektov Rudnogo Altaya i Salaira [Petrology of magmatic systems of gold-enriched pyrite objects of Ore Altai and Salair], *Prirodnye resursy Gornogo Altaya. Geologiya, geofizika, gidrogeologiya, geoekologiya, mineral'nye i vodnye resursy* [Natural resources of Ore Altai. Geology, Geophysics, Hydrogeology, Geoecology, Mineral and Water Resources], 2015, No 19, I. 1–2, pp. 68–78. (In Russ.).
 4. Murzin V. V., Varlamov D. A., Pal'yanova G. A. Usloviya obrazovaniya zolotonosnykh magnetit-khlorit-karbonatnykh porod Karabashskogo massiva giperbazitov [Conditions for the formation of gold-bearing magnetite chlorite-carbonate rocks of the Karabash massif of hyperbasites], *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2017, V. 58, No 7, pp. 1006–1007. (In Russ.).
 5. Nesis V. N., Motov A. P., Butnyakov A. V. Vertikal'naya geokhimicheskaya zonal'nost' okislennykh rud zolotorudnykh mestorozhdenii Anna i Shilovskoe, Tsentral'nyi Ural [Vertical geochemical zonality of oxidized ores of gold deposits Anna and Shilovskoe, Central Ural], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2019, No 4, pp. 34–45. (In Russ.).
 6. Nesis V. N., Motov A. P., Butnyakov A. V. Zolotoobogashchennoe Saumskoe i Galkinskoe mestorozhdeniya, Severnyi Ural [Gold rich Saum and Galkinskoye deposits, Northern Urals], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2019, No 2, pp. 73–83. (In Russ.).
 7. Nesis V. N., Motov A. P., Butnyakov A. V. Sootnoshenie kolchedanno-polimetallicheskoj i zolotorudnoj mineralizatsii mestorozhdeniya Tamun'er (Severnyi Ural) [The ratio of the pyrit-polymetallic and gold mineralization of the Tamun'er field (Northern Urals)], *Ural'skaya mineralogicheskaya shkola – 2019* [Ural Mineralogical School – 2019], Ekaterinburg, Universal'naya Tipografiya "Alfa Print" Publ., 2019, pp. 100–103.
 8. Nikelenosnye kory vyvetrivaniya Urala [Nicel-bearing weathering crusts of the Urals], Moscow, Nauka Publ., 1970, 288 p.
 9. Sagdieva R. K., Talovina I. V., Vorontsova N. I. Sovremennye vzglyady na formirovanie nikelenosnykh kor vyvetrivaniya ul'traosnovnykh massivov na Urale [Modern views on the formation of nicel-bearing weathering of ultra-basic arrays in the Urals], *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)], 2016, No 16, pp. 278–288. (In Russ.).
 10. Sazonov V. N., Murzin V. V., Ogorodnikov V. N., Volchenko Yu. A. Zolotoe orudnenie, sopryazhennoe s al'pinotipnymi ul'trabazitami (na primere Urala) [Golden mineralization, conjugated with alpinotype ultra-bazites (on the example of the Urals)], *Litosfera* [Lithosphere], 2002, No 2, pp. 63–77. (In Russ.).
 11. Snachev V. I., Rykus M. V., Savel'ev D. E., Gritsuk A. N. Blagorodnometall'noe orudnenie dunit-gartsburgitovoi i chernoslantsevoi formatsii zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala [Noble-metal mineralization of the Dunit-Harzburgite and the Blackshale formation of the Western Slope of the Southern Urals], *Geologicheskii sbornik* [Geological Digest], 2001, No 2, pp. 152–162. (In Russ.).
 12. Talovina I. V. Geokhimiya ural'skikh oksidno-silikatnykh nikelovykh mestorozhdenii [Geochemistry of the Urals oxide-silicate nickel deposits], St. Petersburg, Natsional'nyi mineral'no-syr'evoi universitet "Gornyi" Publ., 2012, 272 p.
 13. Talovina I. V., Lazarenkov V. G., Vorontsova N. I., Pilyugin A. G., Gaifutdinova A. M. Elementy platinovoi gruppy, zoloto i srebro v gipergennykh nikelovykh mestorozhdeniyakh na ofiolitovykh massivakh s dunit-gartsburgitovym substratom [Elements of the platinum group, gold and silver in hypergenic nickel fields on ophiolite arrays with a Dunit-Garzburgite substrate], *Zapiski Gornogo instituta* [Note of the Mining Institute], 2013, V. 200, pp. 310–320. (In Russ.).

14. Dube B., Gosselin P., Hannington M., Galley A. Gold-rich volcanogenic massive sulphide deposits, *Mineral Deposits of Canada: a synthesis of major deposit types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods*, 2007, Special Publication No 5, pp. 75–94.
15. Mercier-Langevin P., McNicoll V., L. Allen R., Blight J. H. S., Dubé B. The Boliden gold-rich volcanogenic massive sulfide deposit, Scellefte district, Sweden: new U-Pb Age constraints and implications at deposit and district scale, *Mineralium Deposita*, 2013, No 48, pp. 485–504.

Авторы

Мотов Андрей Павлович

кандидат геолого-минералогических наук
директор по развитию¹
motovAP@plme.ru

Малах Юрий Ефимович

председатель совета директоров¹
Malakh@plme.ru

Воропаев Илья Станиславович

главный геолог²
voropaevis@yandex.ru

¹ ООО «Февральское», Санкт-Петербург

² ООО «Среднеуральское Поисковое Бюро»,
г. Екатеринбург

Authors

Motov Andrey Pavlovich

PhD
Director of Development¹
motovAP@plme.ru

Malakh Yuriy Efimovich

Chairman of the Board of Directors¹
Malakh@plme.ru

Voropaev Iliya Stanislavovich

Chief Geologist²
voropaevis@yandex.ru

¹ ООО Fevral'skoe, St. Petersburg, Russia

² ООО Sredneural'skoe Poiskovoe Byuro,
Ekaterinburg, Russia



Флотационное обогащение свинцово-флюоритовой руды: влияние характеристик руды и кинетики флотации

Upgrading of a lead-fluorspar ore by flotation: effects of ore characteristics and kinetics of flotation

Эскобар А. Г., Зельтманн Р.,
Бродбент К.* , Робинсон П.

Escobar A. G., Seltmann R.,
Broadbent C., Robinson P.

Компания British Fluorspar Ltd. (BFL) разрабатывает свинец-флюорит-баритовое месторождение в районе Peak Lake (Великобритания), где флюорит – главный продукт, а свинец и барит – попутные продукты. Недавно проведённый анализ концентрата CaF_2 показал высокие содержания вредных примесей (например, Pb, P, S и As), которые влияют на качество продукта. Исследования измельчаемости выявили, что сырьё чрезмерно измельчается до стадии флотации, причём отмечается значительное высвобождение P_2O_5 в основном из-за присутствия флюоритового концентрата.

Данные, полученные в ходе опытной чанной флотации, показали, что при этом извлечение свинца возрастает с 2,33 до 15,03 %, содержание Na_2S снижается до 100 г/т и pH – до 9 в схеме обогащения окисленной свинцовой руды, а также имеет место изменение концентрации P_2O_5 на стадии флотации флюорита с 87 до 91 %, который извлекается в хвосты с использованием 200 г/т CaCl-CuSO_4 в качестве «депрессора» фосфатных минералов.

Ключевые слова: флотация флюорита, свинцово-флюоритовое сырьё, барит, фосфор.

British Fluorspar Ltd (BFL) operates a lead-fluorite-barite deposit located in the Peak Lake District (Derbyshire, UK) with fluorspar as the main product and lead and barite as by-products. Recent analysis of the CaF_2 concentrate showed high values of deleterious elements such as Pb, P, S and As, which affect the quality of the product. Grindability studies showed an overgrinding of material prior to the flotation stage with high liberation of P_2O_5 mainly to the fluorspar concentrate.

Data obtained from bath flotation test indicated an improvement of lead recovery from 2.33% to 15.03%, decreasing Na_2S to 100g/t and pH to 9 in the lead oxide circuit and a depression of P_2O_5 in the fluorspar flotation stage from 87% to 91% recovered in the tailings using 200 g/t of CaCl-CuSO_4 as “depressant” of phosphates related minerals.

Keywords: fluorspar flotation; lead-fluorite; barite; phosphorus.

* Our close friend and colleague Dr. Chris Broadbent coordinated this manuscript to its final stage but sadly passed away prior to its publication. We dedicate this work to him.

Наш близкий друг и коллега доктор Крис Бродбент координировал эту рукопись до последней стадии, но, к сожалению, скончался до ее публикации. Мы посвящаем эту работу ему.

Для цитирования: Эскобар А. Г., Зельтманн Р., Бродбент К., Робинсон П. Флотационное обогащение свинцово-флюоритовой руды: влияние характеристик руды и кинетики флотации. Руды и металлы. 2021. № 2. С. 99–110. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10013.

For citation: Escobar A. G., Seltmann R., Broadbent C., Robinson P. Upgrading of a lead-fluorspar ore by flotation: effects of ore characteristics and kinetics of flotation. Ores and metals, 2021, № 2, pp. 99–110. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10013.

1. INTRODUCTION

Recently, Europe has become increasingly reliant on the import of non-energy solid raw materials although historically Europe has been in front of many innovative projects in mining and mineral processing especially those ones focusing on improvement of competitiveness in the raw materials' sector.

The EU has created a list of raw materials (CRMs) critical to Europe's economy. The CRM's are materials of high importance with a high risk associated with their supply.¹ Fluorspar was included in the list of critical raw materials (CRM) in 2010–2011 due to the risks of supply shortage and their impacts on the economy are higher compared with most of the other raw materials. A high share of the worldwide production mainly comes from a handful of countries; in the fluorspar case China and Mexico². Fluorspar remains on the EU CRM list issued in September 2017³ Asia Pacific accounted for over 60% of the market share in 2014 and is projected to be the fastest growing market in coming years, due to rising demand for fluorspar in steel and aluminium industries. Furthermore, demand of hydrofluoric acid and its derivatives for usage in electronic appliances such as refrigerator, air-conditioners, and other cooling equipment is estimated to boost the consumption of fluorspar in Asia Pacific. Demand for fluorspar in North America and Europe is expected to be sluggish owing to slower growth rate in steel production and aluminium production industries. Each one these industries requiring an ever-higher quality of the final product.

Growing demands on high quality of fluorspar products specifically with lower contents of contaminant elements creates a need for -

a better mineralogical and metallurgical understanding of the ore (s).

The processing of fluorite ores especially those that contain calcite minerals is challenging due to the fact that flotation properties of fluorite, calcite, and other gangue minerals are similar. (Filipova, et al., 2014)

Typically, in the commercial operations, fatty acid collectors (Fuerstenau et al., 2006) are used in fluorspar flotation and water glass as a depressant (Zhou et al., 2013) of silicate gangues; the ore pulps are heated to 35–85 °C in the system (Crozier, 1992). Normally fatty acids are saponified in alkaline medium (i.e. NaOH). Most recently fatty acids are emulsified with the use of a surfactant plus fuel oil. (Baldwin & Wittcoff, 1955)

The type of fatty acid plays an important role in both selectivity and recovery of fluorspar. The activation of fluorspar is (Zhang & Song, 2003) affected by the reaction of an unsaturated fatty acid with the calcium atom of calcium fluoride to form an insoluble film of calcium oleate on the surface of the fluorspar particles. (Rao & Forssberg, 1991)

Unsaturated fatty acids high in oleic and linoleic acids of both vegetable and animal tallow origin are used. The fatty acids of vegetable origin have a typical oleic acid content of about 55%, linoleic 40% and resin acids 1–5%. Fatty acids of tallow origin have an oleic content of 70–80% with 5–8% linoleic and other unsaturated acids. Fatty acids high in oleic acid tend to be a little weak, and those of a resin content of more than 4% tend to make a strong froth of low selectivity. Worldwide, there is a tendency to adapt the flotation process to the fatty acid most readily available. Fluorspar flotation requires the crowding out of gangue minerals from the froth, with a minimum use of frothers. MIBC or similar alcohol frothers are sometimes used to liven up a heavy dead froth to facilitate its removal from the flotation cells. Collectors containing 1–3% of resin acids generally produce optimum froth conditions and no supplemental frothers are necessary. (Weiss, 1985; Bulatovic, 2015)

The pH is varied over a wide range in fluorspar flotation from 8.5–10, with most mills operating in the range of 9.0–9.3. A stronger float results at a

¹ Report on critical raw materials for the EU (European commission document, May 2014)

² Communication from the Commission to The European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and The Committee of the regions, Final Report, 2011

³ Communication from the Commission to The European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and the Committee of the regions on the 2017 list of Critical Raw Materials for the EU 13.09.17

high pH, but with a coarse grind can still be selective. Once the reagent combination is established it is necessary to hold to a closely controlled pH. Soda ash is used for pH control, although sodium silicate when used also contributes to alkalinity. (Weiss, 1985)

Caustic soda has been used on siliceous ores and as a supplement to soda ash.

Temperature is an important tool in fluor spar flotation. Temperatures in the range of 25–90°C are used. Below a temperature of 24°C the fluor spar float is slow and less selective than a higher temperature (Gao et al., 2021). Live steam is injected into the mineral slurry in the conditions and at various points in the flotation circuits. Temperatures above 82°C are used in the boiling process. In this process, live steam is injected into the conditioner, with fatty acid, which results in a strong, selective activation of fluor spar. A heavy, matted froth is produced from which gangue minerals are selectively rejected.

Fluor spar flotation feed receives preliminary treatment in conditioners where reagents are added for pH regulation and gangue depression and dispersion. Live steam is injected for maintaining optimum temperature. Two conditioners in series are sometimes used ahead of the rougher float. Reagents for pH control and dispersion are added to the first conditioner and gangue depressing reagents are added to the second. The flotation feed is then ready for the addition of fatty acid collector at the flotation cells. Conditioning time is generally in the range of 8–15 minutes. (Weiss, 1985)

2. MATERIALS AND EXPERIMENTAL PROCEDURE

2.1 Ore samples

Samples from mineral processing streams from Cavendish Mill (BFL) processing plant in the UK were used during this investigation. 10kg from the Pb flotation feed stream and 15kg from the CaF₂ flotation feed were taken in a period of 3hr, the shortest time possible was used to reduce the variability in the plant feed. These samples were sThe plant feed consists of material from mineral deposits in the South Pennine Orefield (SPO). These have been deposited in dilatant fractures,

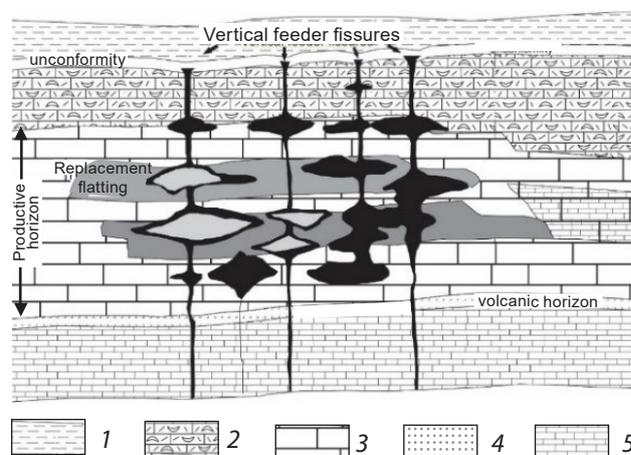


Fig. 1. Fissure vein fill structures and replacement scheme for BFL Mine, UK:

1 – Shale Gint (Kinderscout Group); 2 – Limestone (Eyam Group); 3 – Upper limestone (Monsal Dale Group); 4 – Tuff (Monsal Dale Group); 5 – Lower limestone (Monsal Dale Group)

Рис. 1. Структура жильного выполнения трещин и схема замещения для рудника BFL:

1 – Шале Гинт (Kinderscout Group); 2 – Известняк (Eyam Group); 3 – Верхний известняк (Monsal Dale Group); 4 – Туф (Monsal Dale Group); 5 – Нижний известняк (Monsal Dale Group)

dissolution cavities and zones of metasomatic replacement (Fig. 1). The host rock consists almost exclusively of shallow water carbonates of Asbian-Brigantian (late Dinantian) age (Ford, 2000). The primary mineralization comprises only fluorite, barite, calcite, galena, and sphalerite. Iron sulphides such as pyrite, chalcopyrite and bravoite, are found in microscopic amounts within the main minerals. Nearly all other mineral types described from the SPO are secondary in origin, having resulted from oxidation of the primary minerals. (Quirk, 1993)

2.2 Current plant conditions

Bulk concentrate recoveries in the plant for lead and fluorite varies from 85 to 90%. The lead recovery is 90% and around 6% is lost in the CaF₂ concentrate and 4% in the BaSO₄ concen-

trate. The Pb content in the CaF_2 concentrate represents a contaminant. The CaF_2 recovery varies between 80 to 85%.

The particle size distribution for the flotation feed is shown in the Fig. 2. There is a slight difference between the PbS feed flotation curve and the floated product curves, this difference could be related with kinetics of flotation and the liberation degree of targeted minerals. The sulphides which should float in the first flotation stage due to its properties are more brittle than gangue minerals and it is believed to be finer than the gangue minerals which considering that optimum flotation can be related with mineral density, fine particles of galena should float very well. However, as it is possible to observe in the PSD curve, tailings of PbO flotation (CaF_2 feed) conserve the same distribution and the initial flotation feed and the fine particles are floating better in the fluorite flotation stage. It could mean that fine particles of galena are interlocked with fluorite as suggested in the MLA study done previously (29% of lead floated in the fluorite concentrated was $< 10 \mu\text{m}$).

It was not possible to sample the tailing stream so the effect of particle size in flotation could not be evaluated.

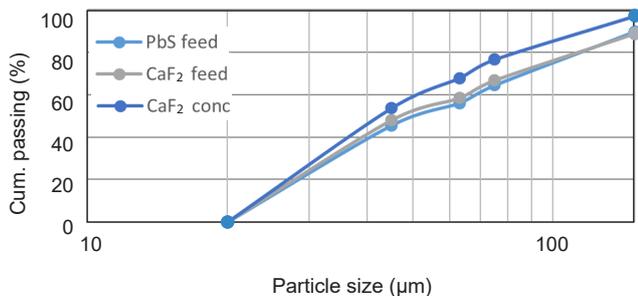


Fig. 2. Particle size distribution curves for PbS feed, CaF_2 feed and CaF_2 concentrate

Рис. 2. Кривые распределения размера частиц для сырья PbS, CaF_2 и концентрата CaF_2

2.3 Chemical reagents

Sodium Isopropyl Xanthate (SIPX), sodium sulphide (Na_2S), MIBC, sodium carbonate, causticized dextrin, sodium metasilicate, tan-X, oleic acid and sodium carbonate were all high-grade chemical reagents.

2.4 Experimental procedures

A 2000 ml Denver sub-aeration flotation cell was used for carrying out the flotation tests of samples. A pulp with 30% solids of samples were added to the cell. The pH of the pulp was adjusted for 3 minutes at pH value of 10.5 for most of the test and varied according to the parameters needed and at temperature value of 20°C during conditioning and flotation by continuously adding the lead and fluor spar reagents. After 3 minutes of mixing the required amount of collector (SIPX) and frother (MIBC) was added, and conditioning continued for three more minutes in absence of air flow. Air was then introduced into the cell and flotation continued until barren froth was observed (2–3 min). The flotation products were collected, filtered, washed, dried, weighed and analysed by XRF.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Lead sulphide and lead oxide flotation

When parameters as the mass flow and the material in feed are fixed, the relation between them can be estimated from the grade vs. recovery curves. The performance of the flotation process will move along these curves when the different parameters vary in the tests.

Test FT1 is a downscale of the current process in flowsheet used at Cavendish Mill and is the starting point for the comparison of the tests. Chemical analysis results from products were used to compare the head grade from the sample with the back calculated grade (Fig. 3.). Relative error was calculated (Table 1) as an indicator of how good back calculated results are relative to the head grade of the sample. Back calculated results and head grade of sample do not present a big difference between them, and its similarity indicates that there was no significant experimental error during the flotation procedure.

3.1.1 Effect of different reagent's dosage

Tests FT1 to FT3 (Table 2) on PbS flotation sample, showed that the current conditions of the plant are the more suitable dosage for the PbS/PbO flotation in terms of high grade and high recovery.

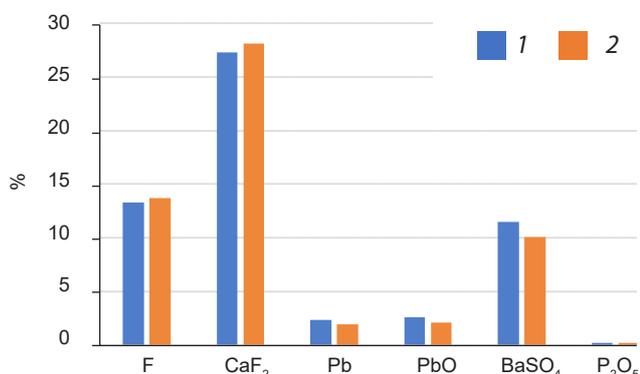


Fig. 3. Head grade sample vs Head grade from products BC = back calculated in lead flotation:
1 – Head Grade Sample (F); 2 – Head Grade from product (BC)

Рис. 3. Образец головного продукта в сравнении с содержанием в головном продукте, BC = обратный расчёт при флотации свинца:

1 – Head Grade Sample (F); 2 – Head Grade from product (BC)

However, as the process simulated two different flotation stages for lead sulphide and lead oxide the selectivity of rougher flotation for lead was examined on grade-recovery curves with cumulative values of 2 to 10 minutes. Following the concept of selective concentration, test FT3 represents more selectivity for lead recovery in the process as shown in the Fig. 4. At industrial scale in Cavendish mill, it is important to achieve higher and selective recovery than higher grades. The

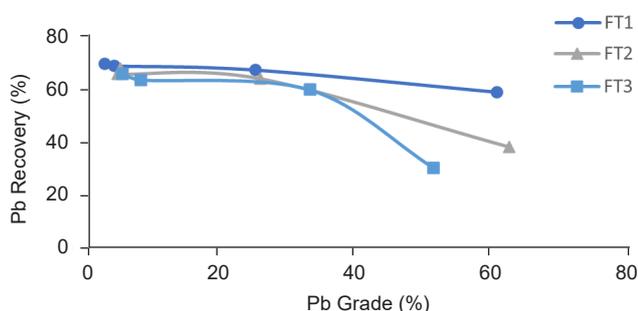


Fig. 4. Grade vs Recovery curve – PbS/PbO flotation different reagent's dosage

Рис. 4. Кривая содержания/извлечения – различное количество реагента для флотации PbS/PbO

Table 1. Head grade sample vs head grade from products – back calculated in lead flotation (%)

Табл. 1. Образец головного продукта в сравнении с содержанием в головном продукте – обратный расчёт при флотации свинца, %

	F	CaF ₂	Pb	PbO	BaSO ₄	P ₂ O ₅
Head grade sample (F)	13.32	27.34	2.39	2.58	11.52	0.19
Head grade from product (BC)	13.7	28.11	1.95	2.1	10.06	0.18
Relative error (BC-F)/F	0.03	0.03	-0.18	-0.19	-0.13	-0.05

curve for FT1 seems to be constant but non-selective for sulphides.

3.1.2 Effect of the pH

It is known that galena (main sulphide mineral in the ore) can float at pH 6.5 and higher. Altering pH from that used currently in the plant was tested to achieve a high recovery of lead and lower contaminants in the concentrate. The flotation tests (FT3, FT4 and FT6) were designed in a way that if successful it did not affect subsequent flotation stages.

Table 2. Reagent's dosage (g/t) for different flotation tests

Табл. 2. Количество реагента (г/т) для различных опытных флотаций

Test	pH	Lime	SIPX	MIBC	Na ₂ S
FT1	10.5	310	350	30	200
FT2	10.5	310	150	25	550
FT3	10.5	240	150	25	100

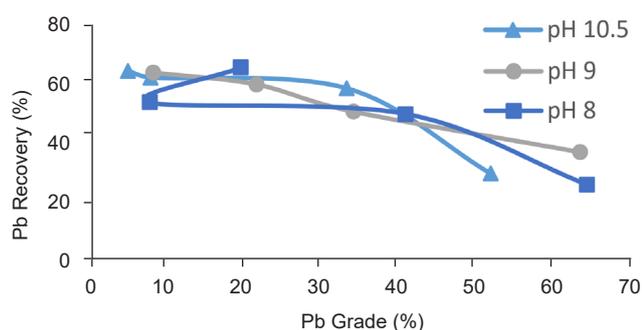


Fig 5. Grade vs Recovery curve – PbS/PbO flotation at different pH

Рис. 5. Кривая содержания/извлечения – флотация PbS/PbO при различном pH

Tests FT3, FT4 and FT6 were performed at pH 10.5 (slightly above galena critical pH), 9 and 8 respectively and with the same reagent's dosage as the FT1 (current conditions of the plant).

The negative effect on the lead sulphide flotation at pH 8 is observed, where the recovery is significantly lower and the lower grade of Pb decrease from the lead sulphide to the lead oxide flotation concentrate. There is a slight difference in recovery between pH 10.5 and 9 with 63.76% and 63.20% respectively. In terms of grade, as shown in the Fig. 5 it is possible to achieve a higher grade of Pb at pH 9 positioning this parameter as the most suitable for the flotation of lead sulphides and lead oxides present in the Milldam ore.

However, maintaining a pulp at a particular pH value does not necessarily provide information regarding the chemistry changes occurring within the plant.

3.1.3 Effect of different pH regulator

Currently, Cavendish Mill uses soda ash as the pH regulator due to its effectiveness in fluorite flotation, however, the lead flotation tests were performed with lime as the most common pH regulator in sulphide flotation. In order to estimate if there are any effect in the flotation process changing the pH regulators test FT4 and FT7 were performed.

Even when the grade-recovery curves (Fig. 6) present a similar trend, it was found that soda ash

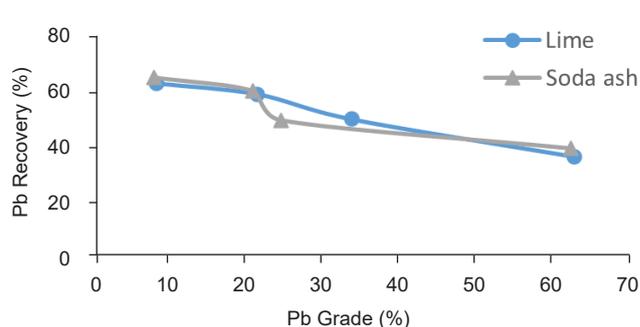


Fig 6. Grade vs Recovery curve – PbS/PbO flotation with different pH regulators

Рис. 6. Кривая содержания/извлечения – флотация PbS/PbO с различными регуляторами pH

affects the Pb oxide flotation with a decrease in both lead grade and recovery.

3.1.4 Effect of Eh control in PbO flotation

The measurement and control of other pulp physical chemistry parameters (Eh, dissolved oxygen and temperature) in base metal flotation plants is somewhat limited.

Greet et al. (2006) suggested that it has been recognized for some time that Eh may impart considerable information about sulphide mineral system under investigation. Authors have dedicated their work to prove the relationship between sulphide minerals surfaces and electrochemical nature (Woods, 1976). Several works demonstrated the possibility of using Eh as a tool to identify mineral oxidation and adsorption of collectors (Winter and Woods, 1973; Woods et al., 1990; Woods et al., 1992). Nevertheless, it is important to mention that Eh readings are better to use in laboratory scale but not in flotation plants, considering that those readings obtained correspond to a mixed potential (Woods, 1976).

It was possible to observe during lab scale that adding sodium silicate to the pulp keep values of Eh stable. The Eh was then monitored adding sodium silicate until a value of -50 was stabilized in the pulp during conditioning time of PbO flotation. However, it is possible to observe that when Eh was controlled the grades and recoveries of lead decreased (Fig. 7).

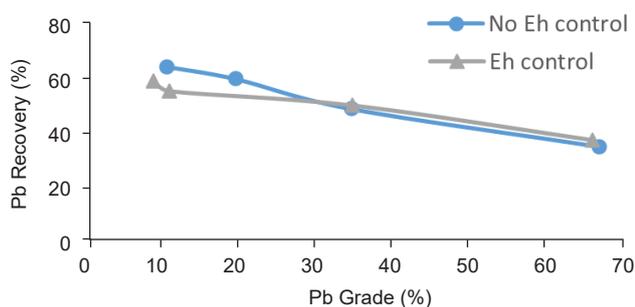


Fig 7. Grade vs Recovery curve – PbS/PbO flotation controlling Eh/mV

Рис. 7. Кривая содержания/извлечения – флотация PbS/PbO с контролем Eh/mV

3.1.5 Effect of combination of reagents

As mentioned previously, the reagents for the lead sulphide flotation are added in the ball mill which means that the sample used for FT5, FT9 and FT10, collected in the flotation feed tank already contains SIPX and MIBC so, Aerophine 3418A promoter was used to increase the selectivity of galena in the presence of arsenic, iron and some non-activated zinc minerals.

Aerophine 3418A promoter is an effective primary collector in the selective flotation of lead, gold silver minerals and complex lead minerals with high silver content or lead minerals where the head grade of lead does not exceed 1.50 percent (product data sheet CYTEC).

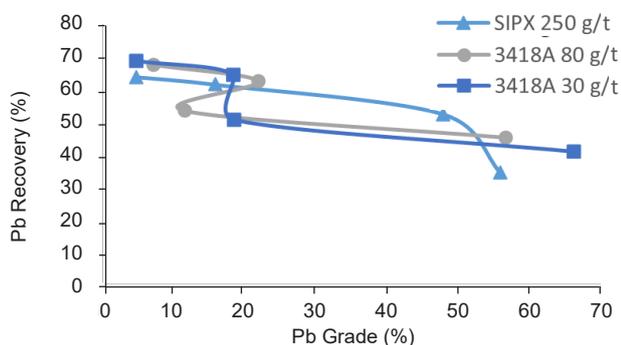


Fig 8. Grade vs Recovery curve – PbS/PbO flotation using different sulphide collector

Рис. 8. Кривая содержания/извлечения – флотация PbS/PbO с использованием различных флотационных собирателей сульфидов

Even when the results (Fig. 8) show a similar behaviour during the sulphide flotation, it is possible to observe the big changes produced in the oxide flotation increasing mainly the lead recovery. For a lower concentration of promoter both recovery and grade increased significantly compared with test undertaken with no promoter added, making these parameters more efficient than current ones used in the plant.

The results indicate that even when the recoveries are higher when promoter 3418A is used the final grade of the concentrate obtained is better when SIPX used.

3.2 Fluorspar flotation

For the CaF_2 flotation stage as in the previous analysis, different parameters were combined in order to find the more suitable conditions for depressing P_2O_5 without affecting CaF_2 grade and recovery.

Chemical analysis results from products were used to compare the head grade from the sample with the back calculated grade (BC). Relative error was calculated as an indicator of how good back calculated results are relative to the head grade of the sample (Table 3). Back calculated results and head grade of sample do not present a big difference between them, and its similarity could

Table 3. Head grade sample vs head grade from products – back calculated in fluorspar flotation (%)

Табл. 3. Образец головного продукта в сравнении с содержанием в головном продукте – обратный расчёт при флотации флюорита, %

	F	Pb	CaF_2	PbO	BaSO_4	P_2O_5
Head grade sample (F)	14.58	0.45	29.93	0.49	11.23	0.19
Head grade from products (BC)	16.04	0.54	32.93	0.58	12.40	0.20
Relative error (BC-F)/F	0.10	0.19	0.10	0.19	0.10	0.05

be related with the same analytical method used in both cases as lead flotation.

3.2.1 Effect of the temperature

Solubility of oleic acid in higher temperature and basic pH is increased therefore its performance as collector for floatation is more selective and better; current conditions in the plant perform floatation in temperatures around 9–18°C. Considering the valuable effect that temperature can produce in fluorite floatation test FT1, FT3, FT4 and FT5 at 19, 30, 40 and 50°C respectively were performed.

Increasing the solubility in the reagents and their selectivity should increase recovery in the floatation cell. As shown in Table 4 the optimum and highest recovery for the CaF_2 floatation is achieved at a temperature = 30°C. Further test at temperatures higher than 50°C should be studied considering that recoveries started to increase again at this point of the graphic.

On the other hand, the aim of our study comprises the behaviour and the recovery of the P_2O_5 in the tails and the decreasing of grade in the concentrate compare with the current conditions of the plant. The graphic in the Fig. 9 shows the effect of temperature in the depression of P_2O_5 during floatation translated into the grade and recovery in the floatation tailings.

Table 4. Grades and recoveries results at different temperatures in CaF_2 floatation

Табл. 4. Содержания и результаты извлечения при различных температурах при флотации CaF_2

Test	Temperature °C	Grade CaF_2 (%)	Recovery CaF_2 (%)
FT1	19	84.65	90.74
FT3	30	76.03	97.14
FT4	40	63.32	94.00
FT5	50	36.48	94.84

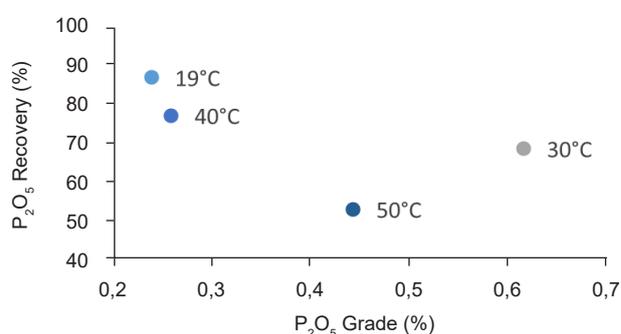


Fig 9. Grade vs Recovery curve – CaF_2 - P_2O_5 floatation at different temperature

Рис. 9. Кривая содержания/извлечения – флотация CaF_2 - P_2O_5 при различной температуре

3.2.2 Effect of pH

As mentioned before the current conditions in the plant are adjusted to work at pH 10.5. Considering that the main gangue of the material is calcite, quartz and phosphates FT1 and FT2 were performed to analyse the effect in the depression of P_2O_5 .

Song et al. (2006) mentioned in their study about improving fluorite floatation that according to the DLVO theory (Verwey and Overbeek, 1947), aggregative stability of colloidal suspensions is due to the existence of a potential energy barrier between particles preventing the proximity of the particles, and the potential energy barrier arises as a result of interaction energies of electrical double layer and van der Waals. For the systems of fluorite-quartz and calcite-quartz in aqueous solutions, the van der Waals interaction between the particles is always attractive and the electrical double layer interaction is also attractive at pH 9.0 because the interacted particles are charged reversely. Therefore, at pH 9.0, the total potential energy of interaction between fluorite and quartz particles or calcite and quartz particles is attractive at every distance.

It was found that the recovery of P_2O_5 in the tailings increases at lower pH as shown in the Figure 10, but when performing the test, it was observed that the froth was not stable at pH 9 and most of the material stayed in the cell. The Table 5

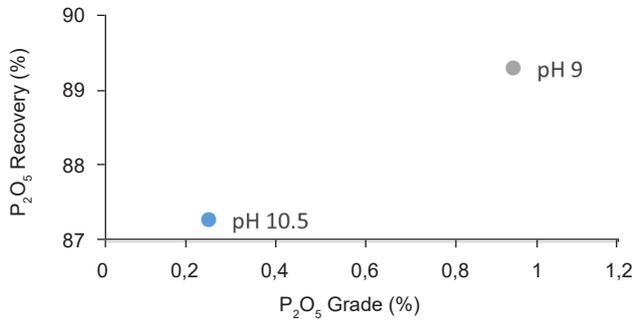


Fig. 10. Grade vs Recovery curve – CaF_2 - P_2O_5 flotation at different pH

Рис. 10. Кривая содержания/извлечения – флотация CaF_2 - P_2O_5 при различном pH

supports these observations as just a 10.74% CaF_2 recovery was achieved in the test at pH 9 against 90.74% recovery at pH 10.5 where the froth was strong and stable.

It is important to mention that both tests were performed at natural temperature as the current plant conditions at around 18°C. In order to ob-

Table 5. Grades and recoveries for CaF_2 at different pH

Табл. 5. Содержания и извлечение CaF_2 при различном pH

Test	pH	Grade CaF_2 (%)	Recovery CaF_2 (%)
FT1	10.5	84.65	90.74
FT2	9	69.24	10.74

Table 6. Grades and recoveries of CaF_2 and P_2O_5 with different dosages of CuSO_4 (g/t)

Табл. 6. Содержания и извлечение CaF_2 и P_2O_5 при различном количестве CuSO_4 (г/т)

test	pH	Grade CaF_2 (%)	Recovery CaF_2 (%)	Grade P_2O_5 (%)	Recovery P_2O_5 (%)	CuSO_4 concentration (g/t)
FT1	10.5	84.65	90.74	0.239	87.27	0
FT8	10.5	85.31	31.43	0.190	90.89	300
FT7	10.5	87.57	74.10	0.227	91.13	200
FT9	10.5	83.77	83.25	0.231	87.25	100
FT10	9	72.48	28.33	0.183	86.88	200

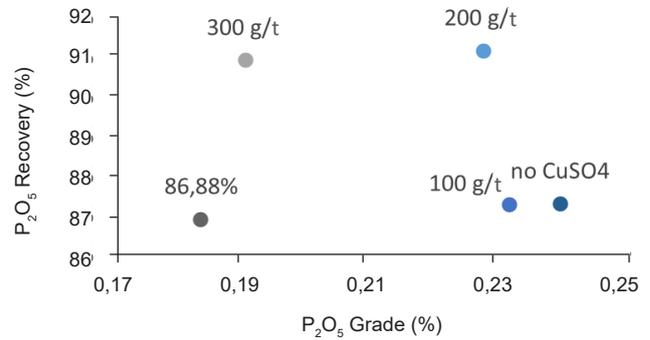


Fig. 11. Grade vs Recovery curve – CaF_2 - P_2O_5 flotation with CuSO_4 as depressant

Рис. 11. Кривая содержания/извлечения – флотация CaF_2 - P_2O_5 с использованием CuSO_4 в качестве депрессора

serve the effect of the combined parameters pH and temperature and additional flotation test was performed at pH 9 and 40°C temperature, finding an increasing in recovery for P_2O_5 in the tailings with a value of 88.13% and a recovery of CaF_2 of 82.99% which is not convenient for the objectives of this study.

3.2.3 Effect of CuSO_4 for removal of phosphates

Test FT7, FT8, FT9 and FT10 were performed using a copper sulphate as possible removal of P_2O_5 in the rougher flotation without affecting the flotation of CaF_2 (Zhang and Zong, 2003).

According to the results, as shown in the Fig. 11 a significant reduction of the content of P_2O_5 in the concentrate translated in a high recovery of P_2O_5 in the tailings was achieved using 200g/t of CuSO_4 at pH 10.5. P_2O_5 recovery increases by 4% com-

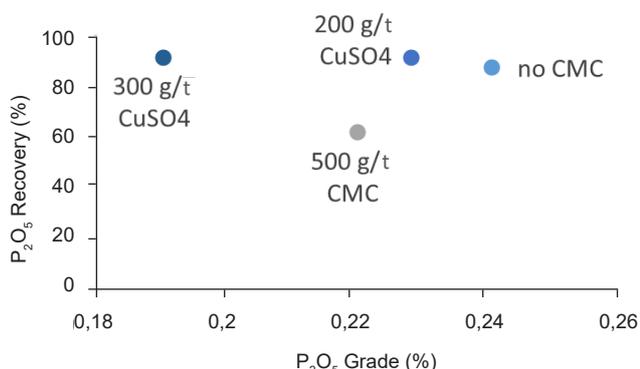


Fig.12. Grade vs Recovery curve – CaF_2 - P_2O_5 flotation with CMC as depressant

Рис. 12. Кривая содержания/извлечения – флотация CaF_2 - P_2O_5 с использованием CMC в качестве депрессора

pared to current conditions in the plant. Table 6 shows the recovery of CaF_2 decreases but the grade resulted with a slightly higher difference with the current conditions.

3.2.4 Effect of CMC as depressant

Song et al. (2006) found that the dispersion processing with CMC as dispersant could effectively improve the fluorite flotation, increasing the fluorite recovery from 72% to 78.5% at the same concentrate grade of 98% CaF_2 . The idea using CMC as depressant has an advantage of elimination of the heterocoagulation considering its flocculation effect between calcite and fluorite particles, in order to improve the beneficiation of the fluorite ore by froth flotation. As mentioned previously the used of different reagent as disperser

Table 7. Grade and recoveries of CaF_2 with CMC as depressant (%)

Табл. 7. Содержания и извлечение CaF_2 с использованием CMC в качестве депрессора (%)

Test	Grade CaF_2	Recovery CaF_2
FT1	84.65	90.74
FT11	56.6	89.62

and depressor was succesful for the authors (Li, 2015), but a different effect was found in the Mill-dam sample.

As shown in Table 7 and Fig. 12, both grade and recovery of CaF_2 decreased with the use of CMC and the addition of $CuSO_4$ keeps being more effective than other depressants. This negative effect in the process could be related with the high dosage of CMC during the flotation test and also to the mineral associations in the ore.

3.2.5 Combined effect of pH, reagent's dosage and $CuSO_4$ as depressant

It is probable that the flotation kinetics is improved when different parameters are combined and not with a change in only one of them. In previous tests was possible to observe how grades and recoveries changes with pH, temperature, reagents and dosages. Tests FT7, FT10, FT12 and FT13 (Table 8) were performed in order to compare the best relation of parameters for the best P_2O_5 recovery achieved.

Table 8. pH, reagents dosage and depressants (g/t) in CaF_2/P_2O_5 flotation tests

Табл. 8. pH, количество реагентов и депрессоры (г/т) при опытной флотации CaF_2/P_2O_5

Test	pH	Soda Ash	Tan-X	R3-3F	Dextrine	Na_2SiO_3	$CuSO_4$
FT7	10.5	825	250	140	320	160	200
FT10	9	825	250	140	320	160	200
FT12	9	200	300	220	400	160	200
FT13	9	250	300	220	400	160	400

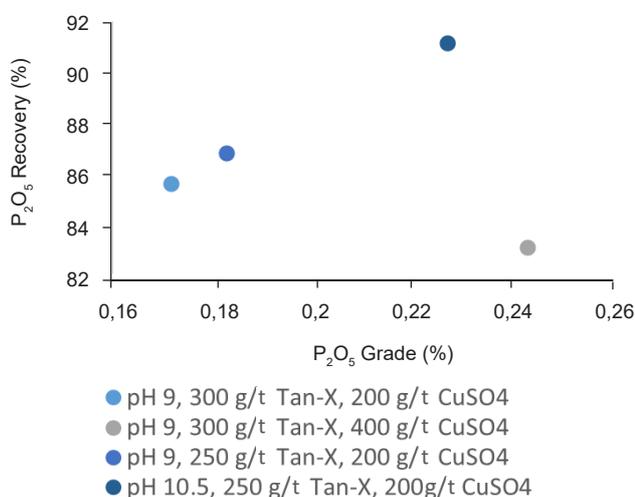


Fig. 13. Grade vs Recovery curve – CaF₂-P₂O₅ flotation at different pH and different reagent's dosages

Рис. 13. Кривая содержания/извлечения – флотация CaF₂-P₂O₅ при различном pH и различных количествах реагента

Fig. 13 shows that the best recovery for P₂O₅ is given at pH 10.5, with the current concentration of Tan-X used in the plant (250 g/t) and adding to the process 200 g/t of CuSO₄ (depressant) with a recovery value of 91.15%, which represents an increase of 3% on current dosage in the plant.

4. DISCUSSION

The fully liberated lead in the fluorspar concentrate can be reduced improving the selectivity and recovery in the PbO flotation stage either (i) adding a promoter (3418A) in the PbS flotation cell by decreasing reagent's dosage (to 100 g/t) and pH (to 9) or (ii) decreasing reagent's dosage (to 100 g/t) and pH (9). Batch flotation test at current conditions in the plant recovered 2.33% Pb in the lead oxide flotation whereas at option (i) recovered 18.03% Pb and at option (ii) recovered 15.71% Pb. It was found that option (i) not only improves the recovery of lead in PbO flotation stage, also improves the recovery of sulphur sulphide in final concentrate which leads to a lower amount of sulphur going to the fluorspar flotation feed. As mentioned previously in this study the company

aims to increase the lead recovery even if the process decreases the lead grade in the concentrate.

The content of calcite and Ca phosphates in the CaF₂ concentrate can be reduced, by adjusting the reagents in the rougher-cleaner system with the current reagents' dosage and including the use of salted-copper sulphate (NaCl-CuSO₄) as “depressant” (effective removal) of gangue minerals specially those ones associated with phosphates (calcite and quartz). The maximum recovery of P₂O₅ (91.13%) in the tailings for fluorspar flotation was achieved with a dosage of 200 g/t in a batch rougher flotation with the current conditions of the plant.

An optimum reduction of the P₂O₅ in the concentrate can be achieved either (iii) adding the CuSO₄ as depressant in the rougher system and cleaner 1 to 3 or (iv) adding the CuSO₄ as depressant in the cleaners.

The proportions to reduce the CuSO₄ from rougher to cleaner or in the cleaner system.

5. CONCLUSIONS

Obtained data from bath flotation test in the PbS/PbO system proposed an improvement of lead recovery from 2.33% to 15.03% by decreasing collector dosage (Na₂S) to 100 g/t and adjusting pH to 9 just in the lead oxide circuit or an improvement from 2.33% to 18.01% adding Aerophine 3418A as a promoter in the lead sulphide flotation.

Results from the fluorspar flotation stage focused on the reduction of P₂O₅ content in the concentrate proposed a depression of P₂O₅ in the fluorspar flotation stage from 87% to 91% recovered in the tailings using 200 g/t of NaCl-CuSO₄ as depressant.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank Professor Lev Filippov from Université de Lorraine (France) and Barrie O'Connell (formerly at WAI, UK) who provided as mentors insight and expertise that assisted this research.

References

1. Baldwin W., Wittcoff H. Fatty acids for chemical specialties, Symposium Proceedings, New York, 1995.

2. Bulatovic S. Handbook of flotation reagents, chemistry, theory and practice, 2015, V. 3, 238 p.
3. Crozier R. D. Flotation: Theory, Reagents and Ore Testing, Oxford, UK, Pergamon Press Publ., 1995, 343 p.
4. Filippova I., Filippov L., Duverger A., Severov V. Synergetic effect of a mixture of anionic and nonionic reagents Ca mineral contrast separation by flotation at neutral pH, *Minerals Engineering*, 2014, V. 66–68, pp. 135–144.
5. Ford T., Rieuwerts J. Lead mining in the Peak District, Ashbourne, Landmark Publ., 2000, 208 p.
6. Fuerstenau D., Bunge R. The complex behavior of fatty acids in fluorite flotation, *XXXIII Mineral Processing Congress*, Istanbul, 2006.
7. Gao Z., Wang C., Sun W., Gao Y., Kowalczyk P. B. Froth flotation of fluorite: A review, *Advances in Colloid and Interface Science*, 2021, V. 290.
8. Greet C. J., Kinal J., Mitchell I. Is measuring pH enough? Perth, W. A., 2006.
9. Li Y. The improvement effect of dispersant in fluorite flotation: Determination by the analysis of XRD and FESEM-EDX, *Journal of spectroscopy*, 2015.
10. Rao K. H., Forsberg K. S. E. Mechanism of fatty acid adsorption in salt-type mineral flotation, *Minerals Engineering*, 1991, V. 4, pp. 879–890.
11. Song S., Lopez-Valdivieso A., Martinez-Martinez C., Torres-Armenta R. Improving fluorite flotation from ores by dispersion processing, *Minerals Engineering*, 2006, V. 19, I. 9, pp. 912–917, available at: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.10.005> (Accessed: 21.07.2021).
12. Verwey E. J. W. Theory of the stability of lyophobic colloids, *The Journal of Physical Chemistry*, 1947, No 51 (3), pp. 631–636.
13. Weiss N. SME Mineral Processing Handbook V. 2, New York, Society of Mining Engineers Publ., 1985.
14. Winter G., Woods R. The relation of collector redox potential to flotation efficiency: Monothiocarbonates, *Separation Science*, 1973, No 8 (2), pp. 261–267, doi:10.1080/00372367308058000.
15. Zhang Y., Song S. Beneficiation of fluorite by flotation in a new chemical scheme, *Minerals Engineering*, 2003, No 16 (7), pp. 597–600.
16. Zhou W., Moreno J. Flotation of fluorite from ores by using acidized water glass as depressant, *Minerals Engineering*, 2013, No 45, pp. 142–145.

Авторы

Эскобар А. Г.

Лиссабонский университет - факультет наук,
Португалия

Зельтманн Р.

Департамент наук о Земле,
музей естественной истории,
Лондон, Великобритания

Бродбент К.

Wardell Armstrong International (WAI), Великобритания

Робинсон П.

British Fluorspar Limited (BFL), Великобритания

Authors

Escobar A. G.

Universidade de Lisboa – Faculdade de Ciências,
Portugal

Seltmann R.

Dept. Earth Sciences,
NHM London, UK

Broadbent C.

Wardell Armstrong International (WAI), UK

Robinson P.

British Fluorspar Limited (BFL), UK