

# ISSN 0869-5997

# металлы **ORES AND METALS**





# Уважаемые коллеги!

От имени Федерального агентства по недропользованию и от себя лично поздравляю редакцию, редколлегию, авторов и читателей научнотехнического журнала «Руды и металлы» с юбилеем – 30-летием со дня основания!

Учреждённый Центральным научно-исследовательским геологоразведочным институтом в декабре 1992 года журнал «Руды и металлы» достойно несёт свою миссию – информировать геологическую общественность о значимых достижениях в области изучения минерально-сырьевых ресурсов России и всего мира. За 30 лет опубликовано более 1750 научных статей ведущих специалистов отечественной геологоразведочной отрасли и исследователей из зарубежных стран. Важной тенденцией последних лет стало вхождение в круг авторов журнала перспективных молодых учёных.

На протяжении трёх десятилетий бессменным издателем журнала «Руды и металлы» остаётся ФГБУ «ЦНИГРИ», и в юбилейные дни выражаю коллегам глубокую признательность за постоянное развитие и обновление издания. Сегодня редакционная коллегия имеет международный состав, что создаёт благоприятные условия для повышения качества публикуемых статей, расширения круга авторов и читательской аудитории.

Уважаемые сотрудники редакции! Вы сохраняете традиции конструктивного диалога между специалистами, продолжаете реализацию новых редакционных проектов для вовлечения в жизнь журнала новых талантливых исследователей – людей, способных решать важнейшие проблемы геологоразведочной отрасли России! Выпуск журнала на таком качественном уровне – огромная ответственность. Ведь обмен научной информацией, анализ и обобщение новых данных являются неотъемлемым условием эффективного воспроизводства минерально-сырьевой базы нашей страны.

От всей души желаю редколлегии и редакции журнала «Руды и металлы» творческой энергии и большого успеха в их деятельности!

Руководитель Федерального агентства по недропользованию

Е. И. Петров

# и руды Ф металлы оres and metals

# BODET



# РУДЫ И МЕТАЛЛЫ 4/2022

#### 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, 2022

Журнал издается 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 заместитель начальника редакционно-оформительского отдела 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** Чешская геологическая служба, г. Прага, Чешская Республика

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

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

**Дементьев Владимир Евгеньевич** генеральный директор АО «Иргиредмет» кандидат технических наук Звездов Вадим Станиславович начальник отдела металлогении ФГБУ «ЦНИГРИ» 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

начальник отдела минералогии и изотопной геохимии ФГБУ «ЦНИГРИ» доктор геолого-минералогических наук

#### Кузнецов Владимир Вениаминович

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

**Ленц Дэвид** профессор, Университет Нью Брунсвик, Канада

**Мишенин Сергей Григорьевич** начальник отдела геофизики ФГБУ «ЦНИГРИ» кандидат геолого-минералогических наук

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

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

Зельтманн Реймар профессор, Музей естественной истории, г. Лондон, Великобритания

Толстов Александр Васильевич 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 4/2022

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, 2022

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 Rosgeolfond, General Director PhD

Alexey G. Volchkov Head of scientific and methodical department, FSBI TsNIGRI PhD

**Anna Vymazalova** Dr., Czech Geological Survey, Czech Republic

Yuri K. Golubev Head of diamond department, FSBI TsNIGRI PhD

**Nikolay A. Goryachev** Chief researcher, NEISRI FEB RAS Corr. Member of RAS

Vladimir E. Dementiev General Director, JSC Irgiredmet PhD Vadim S. Zvezdov Head of metallogeny department, FSBI TsNIGRI PhD

Yuri A. Kalinin Chief researcher, IGM SB RAS PhD

Alexander A. Kremenetsky Advisor to General Director, FSBI IMGRE PhD

Sergey G. Kryazhev Head of mineralogy and isotope geochemistry department, FSBI TsNIGRI PhD

Vladimir V. Kuznetsov Head of base metals department, FSBI TsNIGRI PhD

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

Vasiliy F. Proskurin Head of the eastern Russia regional geology and minerals department, FSBI VSEGEI PhD

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

Alexander V. Tolstov Director, JSC ALROSA (PJSC) PhD

Irina G. Tretiakova Science secretary, FSBI TsNIGRI PhD

**Valery Yu. Fridovsky** Director, IGABM SB RAS PhD, Professor



# СОДЕРЖАНИЕ CONTENTS

# НОВОСТИ, ИНФОРМАЦИЯ

Журналу «Руды и металлы» 30 лет

## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

# Гермаханов А. А., Черных А. И., Гирфанов М. М., Истомин В. А., Сватков А. С.

Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы твёрдых полезных ископаемых Боливарианской Республики Венесуэла

# Кременецкий А. А., Спиридонов И. Г., Пилицын А. Г., Веремеева Л. И.

Минерально-сырьевые кластеры Арктической зоны России и перспективы расширения внешней границы её континентального шельфа

# ПРИКЛАДНАЯ МЕТАЛЛОГЕНИЯ

# Черных А. И., Окулов А. В., Кряжев С. Г., Арсентьева И. В.

Геологическое строение и золотоносность Шаманского рудного узла Алтае-Саянской складчатой области (Республика Хакасия)



# NEWS, INFORMATION

30th Anniversary of the Journal «Rudy i Metally» («Ores and Metals»)

# SUBSOIL USE

# Germakhanov A. A., Chernykh A. I., Girfanov M. M., Istomin V. A., Svatkov A. S.

The state and prospects of development of the mineral resource base of solid minerals of the Bolivarian Republic of Venezuela

# Kremenetsky A. A., Spiridonov I. G., Pilitsyn A. G., Veremeeva L. I.

Mineral-and-energy clusters of the Russian Arctic and prospects for expanding the outer boundary of its continental shelf

# APPLIED METALLOGENY

# Chernykh A. I., Okulov A. V., Kryazhev S. G., Arsentieva I. V.

Geological structure and gold prospectivity of the Shamansky ore cluster of the Altai-Sayan folded region (Republic of Khakassia)

# СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Нуржанов Г. Ж., Кузнецов В. В., Ниценко П. А., Кудрявцева Н. Г., Кузнецова Т. П., Мурзагулов М. М.

Особенности геологического строения и генезиса месторождения Дюсембай Центральный (Саяхат)

## Серавина Т. В., Кузнецова С. В., Филатова Л. К., Донец А. И., Конкин В. Д.

Особенности локализации колчеданно-полиметаллических руд Тушканихинского месторождения (Рудный Алтай)

# СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

Криволуцкая Н. А.

Основы теории магматического рудообразования в трудах М. Н. Годлевского и их современное развитие

Список статей, опубликованных в журнале «Руды и металлы» в 2022 г.



# GEOLOGY OF THE ORE DEPOSITS

# Nurzhanov G. Zh., Kuznetsov V. V., Nitsenko P. A., Kudryavtseva N. G., Kuznetsova T. P., Murzagulov M. M.

Geological features and genesis of the Dyusembay Central (Sayakhat) ore deposit

#### Seravina T. V., Kuznetsova S. V., Filatova L. K., Donets A. I., Konkin V. D.

Localization features of pyrite-polymetallic ores of the Tushkanikhinskoye deposit (Rudny Altai)

# PAGES OF HISTORY

# Krivolutskaya N. A.

Foundations of the theory of magmatic ore formation in works by M. N. Godlevsky and their modern development

«Ores and metals» list of publications 2022



# Журналу «Руды и металлы» 30 лет

В декабре 2022 года исполняется 30 лет со дня выхода в свет первого номера научно-технического журнала «Руды и металлы». Свою историю журнал ведёт с 1992 года: тогда по инициативе заместителя директора Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института цветных и благородных металлов А. И. Кривцова руководство ЦНИГРИ приняло решение о создании нового печатного издания, призванного информировать геологическую общественность о значимых достижениях в области изучения минерально-сырьевых ресурсов России и всего мира. Так ЦНИГРИ стал учредителем и бессменным издателем журнала «Руды и металлы».

Важнейшая роль в развитии периодического издания всегда принадлежит его главному редактору. В период становления и первые 20 лет жизни журнала «Руды и металлы» эту ответственную работу выполнял директор ЦНИГРИ доктор геолого-минералогических наук Игорь Фёдорович Мигачёв. С самого начала лицо журнала во многом определял и заместитель главного редактора доктор геолого-минералогических наук Анатолий Иванович Кривцов. В дальнейшем редколлегию всегда возглавляли директора ЦНИГРИ: в 2012–2015 гг. – кандидат экономических наук Борис Константинович Михайлов, в 2015–2020 гг. – доктор геолого-минералогических наук Анатолий Иннокентьевич Иванов. С 2021 года главным редактором журнала «Руды и металлы» является генеральный директор ФГБУ «ЦНИГРИ» кандидат геолого-минералогических наук Александр Иванович Черных.

В настоящее время с журналом «Руды и металлы» сотрудничают ведущие отечественные и зарубежные учёные. В числе наших авторов – специалисты всех ключевых научных институтов Российской Федерации, вузов, горнорудных компаний, экспедиций. Своими материалами с читателями журнала делятся геологи Узбекистана, Казахстана, Кыргызстана, Азербайджана, Португалии, Великобритании и других стран. На страницах издания обсуждается широкий спектр вопросов, связанных с недропользованием, экономикой и конъюнктурой минерального сырья, методами прогноза, поисков и оценки месторождений, комплексным использованием минерального сырья, технологиями геологоразведочных работ.

За три минувших десятилетия в геологоразведочной отрасли многое изменилось: выросло новое поколение специалистов, усовершенствованы методические основы полевых и лабораторных исследований, появились новые технические возможности, изменились некоторые подходы к решению существующих научных проблем. Но незыблемыми остались принципы работы редакции и редколлегии рецензируемого научного журнала «Руды и металлы», обеспечивающего доступ к качественной научной информации. Невозможно переоценить значение этой деятельности научных изданий для развития научного, технического и технологического потенциала страны.

Редакция журнала придерживается политики максимальной доступности опубликованных материалов для устойчивого развития научного знания. В 2022 году «Руды и металлы» значительно расширил свою читательскую аудиторию, став журналом открытого доступа: все материалы издания ныне представлены на сайте http://rm.tsnigri.ru по лицензии Creative Commons.

# РУДЫ Э МЕТАЛЛЬ



# РУДЫ 🔮 МЕТАЛЛЫ

С 2021 года журнал «Руды и металлы» издаётся при поддержке Международной ассоциации по генезису рудных месторождений (IAGOD), что свидетельствует о высоком авторитете его редакционной коллегии, создаёт благоприятные условия для повышения качества публикуемых статей, расширения круга авторов и читательской аудитории. В журнале «Руды и металлы» публикуются статьи на русском и английском языках. Первая статья на английском языке, представленная международным составом авторов, опубликована в № 3 за 2021 год.

За 30 лет в журнале «Руды и металлы» было опубликовано более 1750 научных статей по многим насущным проблемам воспроизводства минерально-сырьевой базы твёрдых полезных ископаемых России. Наиболее цитируемыми из них стали статьи о методических основах поисков золоторудных месторождений (в частности, об использовании типоморфных особенностей самородного золота при геологоразведочных работах), кимберлитовых тел, изучении платинометалльных месторождений, о результатах тонких минералогических исследований. Особый интерес коллег вызывают публикации, посвящённые изучению условий рудообразования и генезису месторождений.

На протяжении 15-ти лет журнал «Руды и металлы» входит в число периодических научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук и доктора наук (специальность – Науки о Земле и окружающей среде). Специальные номера журнала «Руды и металлы» в разные годы посвящались стратегии развития геологической отрасли в изменяющихся экономических условиях, основным научно-техническим достижениям ЦНИГРИ, переоценке золоторудного месторождения Сухой Лог. Кроме того, вышел ряд выпусков журнала в память о выдающихся учёных-геологах, научном и прикладном значении их творческого наследия. «Руды и металлы» являлся информационным спонсором многих научно-практических конференций, совещаний и симпозиумов по геологической тематике.

Благодаря замечательной работе редакционной коллегии, ответственному подходу авторов к публикуемым материалам и вниманию нашей читательской аудитории журнал «Руды и металлы» постоянно развивается. Теперь он выходит не только в форме печатного издания, но и как онлайн журнал. На его страницах публикуют результаты своих исследований и известные учёные, и молодые специалисты, которые ещё только начинают свой путь в профессии. Редакция и редколлегия журнала «Руды и металлы» считают одной из важнейших своих задач поддержку профессионального роста нового поколения геологов. Наш журнал тоже ещё молод и впереди у нас и наших авторов немало напряжённой, интересной работы!

Редколлегия и редакция научно-технического журнала «Руды и металлы» выражают глубокую благодарность авторам и читателям издания, внёсшим значительный вклад в его становление и развитие! Дорогие коллеги, друзья, поздравляем вас с нашим общим юбилеем и приглашаем к продолжению совместной деятельности во благо российской науки!

# Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ИМГРЭ)

От имени сотрудников Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов поздравляю редакцию журнала «Руды и металлы», весь коллектив ЦНИГРИ с 30-летием научно-технического издания!

Вот уже три десятилетия журнал информирует геологическую общественность о значимых достижениях в области изучения минерально-сырьевых ресурсов России, ближнего и дальнего зарубежья, является площадкой для обсуждения актуальных вопросов геологической и производственной практики, дарит читателям возможность профессионального общения. Авторские публикации на страницах «Руды и металлы» традиционно современны, информативны и полезны. Использование электронной версии издания позволяет читателям оперативно участвовать в обсуждении публикаций, быть в курсе быстро меняющихся новаций в геологической отрасли, оставаться в гуще событий.

Мир меняется, но неизменным остаётся профессионализм редакции журнала, активность авторов и читателей.

Желаю Вашему изданию такой же активности и востребованности, которые сопровождали «Руды и металлы» все годы его работы, работы интересной и нужной! Будьте здоровы и благополучны!

> Генеральный директор ФГБУ «ИМГРЭ» И. Г. Спиридонов

# Общественная организация Российское геологическое общество **(POCFEO)**

Российское геологическое общество от всей души поздравляет Вас и всех сотрудников замечательного научно-технического журнала «Руды и металлы» с 30-летним юбилеем. Вы всегда находитесь на острие актуальных проблем отечественной геологии, размещая на своих страницах материалы по стратегическим вопросам развития минерально-сырьевой базы страны, самым современным теоретическим разработкам по рудогенезу, инновационным методам и технологиям выявления, разведки и геолого-экономической оценки месторождений, глубокого изучения и переработки минерального сырья. Особенно важной для будущего кадрового потенциала отрасли является ваша публикационная поддержка молодых авторов.

Желаем всему коллективу журнала «Руды и металлы» дальнейшего развития и ярких успехов в очень нужной деятельности, здоровья и благополучия на долгие годы.

Президент РОСГЕО Г. А. Машковцев



ОБЩИЕ ВОПРОСЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

УДК 553.04 (87)

# Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы твёрдых полезных ископаемых Боливарианской Республики Венесуэла

The state and prospects of development of the mineral resource base of solid minerals of the Bolivarian Republic of Venezuela

# Гермаханов А. А., Черных А. И., Гирфанов М. М., Истомин В. А., Сватков А. С.

Рассмотрены состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы твёрдых полезных ископаемых (ТПИ) Боливарианской Республики Венесуэла, а также возможности развития российско-венесуэльского сотрудничества в сфере геологии и недропользования. Венесуэла располагает крупнейшими в мире запасами нефти и широким спектром ТПИ (золото, алмазы, никель, бокситы, железные руды, тантал ниобий и другие редкие и цветные металлы, нерудное минеральное сырьё), ресурсная база которых сохраняет перспективы роста. Основное направление развития горнорудной отрасли связывается с правительственной программой геологического изучения и освоения Горнорудного пояса Ориноко в северной части штата Боливар, где выявлены промышленные месторождения и локализованы значительные прогнозные ресурсы ТПИ, требующие переоценки в целях повышения их инвестиционной привлекательности. Заметное место в развитии минерально-сырьевого комплекса Венесуэлы могут занять российские горнорудные компании при участии организаций Российской геологической службы.

Ключевые слова: Боливарианская Республика Венесуэла, Гвианский щит, блок Гуаяна, минеральносырьевая база, добыча минерального сырья, твёрдые полезные ископаемые, золото, никель, кобальт, медь, цинк, алмазы, Горнорудный пояс Ориноко.

# Germakhanov A. A., Chernykh A. I., Girfanov M. M., Istomin V. A., Svatkov A. S.

The status and prospects of the mineral resource base of solid minerals of the Bolivarian Republic of Venezuela, as well as possibilities for developing the Russian-Venezuelan cooperation in the field of geology and mineral resource management are considered. Venezuela has world's largest oil reserves and a wide range of solid minerals (gold, diamonds, nickel, bauxite, iron ores, tantalum and niobium, other rare and base metals, various industrial minerals), which resource base retains significant growth prospects. The main direction of intensification of the mining industry is associated with implementation of a large-scale Governmental program for the geological study and development of the Orinoco Mining Belt in the northern Bolivar State. Within the belt, a number of commercial mineral deposits and much significant potential resources of the solid minerals have been identified and localized, requiring a modern reassessment in order to increase their investment attractiveness for major foreign mining companies. A prominent place in the development of the mineral resource complex of Venezuela can be occupied by Russian mining companies in cooperation with organizations of the Russian Geological Survey.

Keywords: Bolivarian Republic of Venezuela, Guiana shield, Guyana block, mineral resource base, mineral mining, solid minerals, gold, nickel, cobalt, copper, zinc, diamonds, Orinoco Mining Belt.

Для цитирования: Гермаханов А. А., Черных А. И., Гирфанов М. М., Истомин В. А., Сватков А. С. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы твёрдых полезных ископаемых Боливарианской Республики Венесуэла. Руды и металлы. 2022. № 4. С. 10–30. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10020

For citation: Germakhanov A. A., Chernykh A. I., Girfanov M. M., Istomin V. A., Svatkov A. S. The state and prospects of development of the mineral resource base of solid minerals of the Bolivarian Republic of Venezuela. Ores and metals, 2022, № 4, pp. 10–30. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10020



Территория Боливарианской Республики Венесуэла составляет около 916 тыс. км<sup>2</sup>, включая многочисленные острова. Население её почти 31 млн чел. В административном отношении страна разделена на 23 штата и один федеральный округ – район столицы г. Каракас. Венесуэла располагает крупнейшими в мире доказанными запасами нефти (около 48 млрд т, или более 300 млрд баррелей (>17,5 % мировых запасов)), опережая по этому показателю Саудовскую Аравию. Достаточно велики запасы природного газа (5,7 трлн м<sup>3</sup>). Экономика республики основана на добыче нефти, которая давала 95 % экспортных доходов, более 50 % доходной части государственного бюджета и приблизительно 30 % ВВП [9, 14–18, 21, 26–32].

В Венесуэле имеются промышленные, в том числе крупные и сверхкрупные месторождения твёрдых полезных ископаемых (ТПИ) – железных руд, бокситов, тантало-ниобатов, никеля, кобальта, золота, алмазов, урана, угля, цементного сырья и других строительных материалов, самых различных видов химического и индустриального минерального сырья [11, 12]. Однако роль твёрдых полезных ископаемых в экономике страны очень мала – всего около 1 % [16]. Запасы известных месторождений (меди, свинца, цинка, алмазов) исчерпаны, других полезных ископаемых (в том числе золота) – не освоены или требуют применения новых технологий добычи и обогащения. Правительство Боливарианской Республики Венесуэла считает развитие минеральносырьевой базы горнорудной промышленности одним из важнейших источников роста экономики страны. В качестве основного направления развития минерально-сырьевого комплекса рассматривается привлечение иностранных инвестиций при сохранении полного контроля со стороны государства за минеральными богатствами [21, 26].

Как известно, уже более десяти лет назад в Венесуэле наметилась отчётливая тенденция к постепенному снижению добычи сырой нефти – с 1,1 млрд баррелей в 2012 г., после некоторого восстановления в 2009–2011 гг., до 0,58 млрд баррелей в 2018 г. Добыча газоконденсата с 2009 по 2013 г. уменьшилась вдвое (с 78,5 до 42,3 млн т) [9, 14–18, 28–32]. Этот процесс усугубился отказом от закупок венесуэльской нефти со стороны США, что подрывает экономику Венесуэлы, вызывая двузначное сокращение ВВП, рост инфляции, безработицы, товарного дефицита.

Устойчивое снижение добычи отмечается и по другим важнейшим полезным ископаемым Венесуэлы. По железным рудам - с 20,7 млн т в год в 2007-2008 гг. до 2,5 млн т в 2018 г., с резкими снижениями в 1,5-3 раза в 2009 и 2017 гг.; соответственно, сократилось годовое производство чугуна с 8,4 до 0,99 млн т и стали с 5,0 до 0,129 млн т к 2017 г. С 2006 г. неуклонно снижалась добыча бокситов – с 5,9 до 0,55 млн т (производство глинозёма с 1,9 до 0,24 млн т). Ежегодное производство никеля из латеритных руд в 2005–2006 гг. составляло около 20 тыс. т, в 2007-2011 гг. варьировало в диапазоне 15,7–10,9 тыс. т, а с 2012 г. упало ниже 8,1 тыс. т, причём в 2014-2016 гг. не превышало 5 тыс. т в год. Производство ферроникеля, при расчётной технической производительности около 72 тыс. т в год, сохранялось на уровне 57 тыс. т в 2005–2010 гг., после чего начало снижаться и в 2012 г. составляло 31,3 тыс. т, а в 2015 г. – 16,7 тыс. т. Аналогичную динамику демонстрирует и металлургическое производство вторичного свинца, сократившееся с 30-35 тыс. т. в 2010 г. до 9 тыс. т в 2018 г. [9, 14–18, 28–32].

Производство золота в 2005–2009 гг. устойчиво держалось на уровне 10–12 т в год. В 2010–2011 гг. произошёл резкий двух-трёхкратный спад до 7 и 4,6 т соответственно, в 2012–2014 гг. производство снижалось до 1–2 т, а с 2015 по 2018 гг., по официальным данным, составляло от 0,56 до 0,48 т [9, 14–18, 26, 28– 32]. Следует отметить, что по оценкам многих экспертов, с 2016 г. произошло резкое увеличение добычи золота, более чем на порядок превышающее официальные данные.

Таким образом, декларируемое производство золота в стране начало сокращаться в 2011–2012 гг. на фоне максимума цен на золото. В этот период правительство Венесуэлы, как и ряда других развивающихся золотодо-



бывающих стран, приняло решение о перераспределении сверхприбылей в пользу государства за счёт введения правила об обязательной доле государства в капитале крупных золотодобывающих компаний не менее 55 % (Закон-декрет № 8413). Это спровоцировало уход крупных иностранных компаний, таких как Rusoro Mining Ltd., Crystallex International Corp., Anglo American Plc и др. Их место заняла старательская и мелкомасштабная золотодобыча. Поддержка государства выразилась в разрешении организации многочисленных частных золотоизвлекательных фабрик и скупки старательского золота Центральным банком [1]. В последнее время, судя по сообщениям неофициальных источников, снова намечается тенденция к снижению уровня кустарной золотодобычи в Венесуэле в результате как истощения легко доступных источников и роста себестоимости добычи, так и «вытеснения» мелких производителей в пользу привлечения крупных инвесторов.

Данные по добыче алмазов с 2005 г. также свидетельствуют о резком падении их производства – с 45 тыс. кар ювелирных и 70 тыс. кар технических в 2007 г. до 4–6 тыс. кар ювелирных и 5,6–9 тыс. кар технических алмазов в 2010 г. [9, 14–18, 28–32].

Таким образом, существенный спад производства ТПИ произошёл в 2007–2009 гг., что в целом совпадает с периодом мирового экономического кризиса. Однако, как показывает публикуемая статистика, горная промышленность Венесуэлы не смогла в дальнейшем восстановиться и перейти к устойчивому росту. В 2016-2020 гг. в стране обострился экономический и политический кризис, что привело к дальнейшему спаду в минерально-сырьевой отрасли. Тем не менее огромные минеральные богатства Венесуэлы являются основой будущего роста её минерально-сырьевого комплекса. Приведём краткую характеристику геологического строения и полезных ископаемых, отражающую ещё далеко не полностью раскрытый минерально-сырьевой потенциал страны.

В физико-географическом отношении на территории Венесуэлы отчётливо выделяются несколько природных блоков-зон (рис. 1): се-

веро-восточные отроги Анд (хребты Сьерраде-Периха и Кордильера-де-Мерида) – зона Венесуэльские Анды с высотами до 3750 м, обрамляющие впадину оз. Маракайбо (зоны Впадина Маракайбо и Лара-Фалькон); Карибские Анды – зона Прибрежная Кордильера (с межгорными впадинами, в том числе оз. Валенсия); равнины Ориноко в центральной части страны (зона Лос-Льянос), переходящие к востоку в широкую дельту р. Ориноко на побережье Атлантического океана (зона Дельта Ориноко); Гвианское плоскогорье, представляющее собой равнину с останцовыми кряжами и горами высотой до 2800 м и более, занимающее всю территорию крупнейших штатов Боливии – Боливар и Амазонас (зона Гуаяна). Отдельно рассматриваются разрозненные острова Карибского моря (зона Острова) [26].

Территория Венесуэлы покрыта густой сетью рек. Крупнейшей является р. Ориноко, отделяющая Гвианское нагорье с бурными и порожистыми правыми притоками (в том числе р. Карони с крупными гидроэлектростанциями) от р. Льянос со спокойными, часто судоходными левыми притоками [11, 12].

Геологическая изученность территории Венесуэлы неравномерная. Наиболее детально изучена северная горная часть страны, для которой геологами частных компаний и государственных организаций были составлены комплекты средне- и крупномасштабных геологических карт масштабов 1:100 000 и 1:50 000 (Creole Petroleum Corp., 1961), 1:25 000 (проекты IGVSB и FONACIT, 2003-2004 гг.). Для южной части страны составлены геологические карты м-ба 1:250 000 для регионов Амазонас (Министерство общественных работ, 1971 г.) и Гуаяна (Guayana Mining Technique CA, 1987 г.). Полученная геологическая информация была сведена на карте масштаба 1:500 000 для территории к северу от р. Ориноко специалистами Министерства горной промышленности и углеводородов Венесуэлы (А. G. Belizzia et al., 1976), а для Гвианского щита геологами Геологической службы США (P. G. Schruben et al., 1997). В 2005 г. Геологическая служба США в сотрудничестве со Школой геологии, рудного дела и геофизики Центрального университета Венесуэлы и Венесуэльским фондом сейсмо-



# Рис. 1. Схема районирования территории Венесуэлы и размещения площадей, продуктивных на основные виды минерального сырья:

физико-географические блоки: 1 – Венесуэльские Анды, 2 – Прибрежная Кордильера, 3 – впадина Маракайбо, 4 – Лара-Фалькон, 5 – Дельта Ориноко, 6 – Лос-Льянос, 7 – Гуаяна, 8 – Острова; 9 – нефтегазоносные площади; 10 – основные алмазоносные площади; 11 – главные золотоносные площади; месторождения: 12 – золоторудные (а – уникальные, b – крупные и средние), 13 – алмазоносный узел, 14 – кобальт-никелевые, 15 – медно-цинковые, 16 – медные, 17 – бокситовые; цифры – месторождения: 1 – Байладорес, 2 – Ароа, 3 – Лома-де-Йерро, 4 – Пижигуаос, 5 – Гуаниамо, 6 – Чоко 10, 7 – Инкрейбле 6, 8 – Ботанамо, 9 – Эльдорадо, 10 – Сиембра Минера (Кристинас и Брисас)

physiogeographical blocks: 1 – Venezuelan Andes, 2 – Coastal Cordillera, 3 – Maracaibo Depression, 4 – Lara-Falcon, 5 – Orinoco Delta, 6 – Los Llanos, 7 – Guayana, 8 – Islands; 9 – Oil and gas bearing areas; 10 – main diamond-bearing areas; 11 – main gold-bearing areas; 12-17 – ore deposits: 12 – gold ore deposits (a – superlarge, and b – large and medium), 13 – diamond-bearing cluster, 14 – cobalt-nickel deposits, 15 – copper-zinc deposits, 16 – copper deposits, and 17 – bauxite deposits. Numbers: 1 – Bailadores, 2 – Aroa, 3 – Loma de Hierro, 4 – Pijiguaos, 5 – Guaniamo, 6 – Choco-10, 7 – Increible-6, 8 – Botanamo, 9 – Eldorado, 10 – Siembra Minera (Cristinas and Brisas)

Fig. 1. Schematic map showing regionalization of the territory of Venezuela and distribution of areas productive for the main types of mineral raw materials:



логических исследований (FUNVISIS) опубликовали Геологическую карту Венесуэлы на рельефе м-ба 1:750 000 [10].

**Геологическое районирование** Венесуэлы в целом соответствует основным физико-географическим подразделениям. Последние отвечают структурно-формационным блокам, существенно различающимся по геологическому строению (рис. 2) [2].

Горные отроги Венесуэльских Анд на северо-западе страны представляют собой сложно построенную складчатую зону. Наиболее древние образования здесь представлены интенсивно дислоцированными терригенными толщами нижнего палеозоя (к западу, на территории Колумбии, в ядрах складчатых структур выходят неопротерозойские образования). Выше по разрезу залегают менее интенсивно деформированные терригенно-карбонатные и вулканогенно-осадочные образования среднего и позднего палеозоя, перекрытые триас-юрскими красноцветными, меловыми терригенно-карбонатными и палеоген-неогеновыми континентальными отложениями. Этот комплекс пород прорван телами палеозойских и палеогеновых гранитоидов.

Два андийских отрога разделены межгорной впадиной Маракайбо, заполненной морскими песчаниками и сланцами мела, перекрытыми континентальными и морскими угленосными отложениями кайнозоя, вмещающими крупные залежи нефти и газа. К северо-востоку от впадины располагается массив Лара-Фалькон, перекрытый кайнозойским осадочным чехлом.

Прибрежная Кордильера Венесуэлы подразделяется на Центральный и Восточный блоки Карибских Анд, сложенные породами поздней юры, мела и палеогена. Отличаются широким развитием альпинотипной надвиговой тектоники и присутствием позднемеловых габбро-гипербазитовых массивов и малых тел гранитоидов.

Перечисленные выше структурно-формационные блоки с севера замыкают Андийский складчато-надвиговый пояс.

Впадины Льянос и Амакуро (Дельта Ориноко) представляют собой венесуэльскую часть Предандийского платформенного краевого прогиба, сложенного мощной толщей мезозойскокайнозойских отложений, залегающих на докембрийском фундаменте платформы.

Занимающий всю южную часть страны блок Гуаяна отвечает венесуэльской (северо-западной) части Гвианского щита, сложенного здесь архейскими и палеопротерозойскими гнейсами, кристаллическими сланцами, амфиболитами, железистыми кварцитами и зеленокаменными вулканическими породами (палеопротерозойские зеленокаменные пояса), прорванными крупными телами протерозойских гранитоидов. Эти образования несогласно перекрываются неметаморфизованными песчаниками и гравелитами мезопротерозоя (серия Рорайма), прорванными более поздними силлами и дайками долеритов [2, 10–13].

Металлогеническое районирование Венесуэлы определяется геологическим строением страны (см. рис. 2). В пределах Венесуэльских Анд известны мелкие медные месторождения осадочного типа, приуроченные к мезозойским пестроцветным формациям. В Карибских Андах (Прибрежная Кордильера) распространены мелкие стратоидные месторождения полиметаллических (медно-цинковых, свинцово-цинковых) руд колчеданного типа в связи с раннемеловыми вулканогенно-осадочными формациями. Кроме того, здесь выявлены месторождения силикатного никеля, приуроченные к латеритным корам выветривания по мезозойским серпентинитовым (апогарцбургитовым) массивам [2].

Наибольшим разнообразием и богатством характеризуется металлогения блока Гвианского щита. Здесь в докембрийских комплексах пород развито оруденение различных типов, в том числе месторождения железа в связи архейскими железистыми кварцитами, а в латеритных корах выветривания по метаморфическим и интрузивным породам установлены залежи марганца и бокситов, а также россыпные месторождения титана. Важное экономическое значение имеют россыпные и коренные месторождения золота золото-кварцевой формации в связи с докембрийскими зеленокаменными структурами. Кроме того, известны богатые россыпные аллювиальные месторождения алмазов в связи с конгломе-

РУДЫ Ө МЕТАЛЛЫ

ратами формации Рорайма и единичные коренные проявления алмазов кимберлитового типа [3, 11, 12, 26].

Минерально-сырьевая база цветных, благородных металлов и алмазов Венесуэлы.

*Никель.* Месторождения и проявления никеля Венесуэлы относятся к типу гипергенных объектов силикатного никеля и связаны с серпентинизированными ультраосновными породами юрско-мелового офиолитового комплекса, приуроченными к надвиговому поясу в южной окраине Карибской плиты. Офиолиты в Карибских Кордильерах на севере Венесуэлы образуют две полосы вдоль прибрежного (Серрания-де-ла-Коста) и внутреннего (Серрания-дель-Интерьер) горных хребтов к югу от г. Каракас.

Месторождения и рудопроявления латеритных силикатных никелевых руд с кобальтом Лома-де-Йерро и Тинакильо связаны с корой выветривания гипербазитов. Основные месторождения пояса расположены между шт. Миранда и Арагуа, возможно обнаружение таких объектов в шт. Кохедес.

Месторождение Лома-де-Йерро находится в 50 км к югу от Каракаса на высоте около 1300 м над уровнем моря. Участок месторождения протягивается в субширотном направлении на 15 км при ширине 1-7 км. Месторождение связано с корой выветривания латеритного профиля по серпентинизированным гарцбургитовым перидотитам аллохтонного блока Вилья-де-Кура, отнесено к магниево-гидросиликатному подтипу. Основными никеленосными минералами являются никельсодержащий серпентин и существенно пимелитовые гарниериты, концентрирующиеся в сапролитовом горизонте. Средние содержания Ni, по аналогии с однотипными месторождениями, относительно высокие и составляют до 1,8-2,5 %. Руды месторождения содержат Со (до 0,19 % Со<sub>3</sub>О<sub>4</sub>) и Sc (до 40-70 г/т), наибольшие концентрации которых связаны с гидроксидами железа и марганца относительно маломощного лимонитового горизонта [8]. По данным информационноаналитической компании S&P Global Market Intelligence, остаточные запасы месторождения оцениваются в 68 тыс. т, а ресурсы в 98 тыс. т. Месторождение Лома-де-Йерро выявлено в 1941 г., эксплуатировалось с перерывами в течение более 50 лет. В 2012 г. британская компания Anglo American Plc, разрабатывавшая месторождение с 2001 г., не получила разрешение на продление концессионного соглашения. Право разведки и добычи никеля и попутных полезных ископаемых было передано компании Corporacion Venezolana de Mineria S. A. (CVM), которая создала дочернюю компанию Loma de Niquel CA.

По опубликованным данным, производство никеля в 2012 г. составило около 8,1 тыс. т, а в 2014 – уже около 2,5 тыс. т. В настоящее время производство законсервировано [9, 16– 18, 28–30, 32].

Всего, по данным Министерства экологического горного развития Венесуэлы, запасы руд никеля составляют около 28,9 млн т с содержанием Ni 1,41 % (408 тыс. т), выявленные и оценённые ресурсы никелевых руд – 9,15 млн т с содержанием Ni 1,51 % (138 тыс. т), прогнозные ресурсы 6,4 млн т руды с содержанием Ni 1,53 % (98 тыс. т) [26].

Динамика добычи никелевых руд (со средними содержаниями Ni ~ 1,5 %) в Венесуэле до 2016 г., по данным Министерства экологического горного развития Венесуэлы, отражена на диаграмме (рис. 3).

*Медь, свинец, цинк.* Месторождения цветных металлов известны с давних времен в Андийской части Венесуэлы.

Собственно медные месторождения и проявления (Ароа, Себоруко, Серро Моно и др.) относятся к типу медистых песчаников. Такие месторождения размещаются в зоне несогласного контакта юрских (Ла-Кинта) и раннемеловых (Рио-Негро) формаций и образуют пояса, прослеживаемые на расстояние до 60–100 км в широтном и северо-восточном направлениях в Венесуэльских Андах и Прибрежной Кордильере, в том числе на территории Колумбии [27]. В настоящий момент их запасы в значительной степени исчерпаны.

Медь – ценный попутный компонент на ряде золоторудных месторождений Гвианского щита, в том числе Кристинас и Брисас, где её средние содержания составляют ~ 0,1 % (см. раздел «Золото»).





© Гермаханов А. А., Черных А. И., Гирфанов М. М., Истомин В. А., Сватков А. С., 2022 © Germakhanov A. A., Chernykh A. I., Girfanov M. M., Istomin V. A., Svatkov A. S., 2022



# Рис. 2. Схематическая карта полезных ископаемых Венесуэлы. Геологическая основа по [13], с упрощениями:

стратифицированные образования: кайнозой: 1 – четвертичные отложения, 2 – неоген, 3 – палеоген; 4 – мезозой; 5 – палеозой; 6 – мезопротерозой, серия Рорайма; 7 – палеопротерозой; 8 – архей; интрузивные образования: граниты: 9 – докембрийские, 10 – палеозойские; 11 – щелочные интрузии; 12 – габбро и ультрабазиты; 13 – нефтегазоносные площади; 14 – основные золотоносные площади (1 – Эль-Кальяо: месторождения Чоко 10, Инкрейбле 6, Исидоро, Эль-Кальяо, Томи, 2 – Ботанамо: месторождение Ботанамо, 3 – Эльдорадо: месторождения SREP, Сейба, 4 – Сиембра Минера («88-й км»): месторождения Кристинас, Брисас); 15 – алмазоносные площади (1 – Гуаниамо, 2 – Ла-Парагуа, 3 – Сан-Сальвадорде-Пауль, 4 – Уриман, 5 – Икабару); месторождения и рудопроявления ТПИ: золота: 16 – уникальные, 17 – крупные отработанные, 18 – средние, 19 – малые, 20 – малые отработанные, 21 – проявления, 22 – россыпи (в пределах контуров алмазоносных узлов содержат наряду с золотом аллювиальные алмазы); 23 – серебра; 24 – бокситов (а – крупные месторождения, b – малые месторождения и проявления); 25 – никеля и кобальта (а – месторождения, b – проявления); 26 – меди; 27 – меди и цинка (а – месторождения, b – проявления); 28 – свинца и цинка; 29 – тантала и ниобия; 30 – алмазов (а – алмазоносные кимберлиты, b – россыпи)

Fig. 2. Schematic map of mineral resources of Venezuela. Geological background simplified after [13]:

1-8 – Stratified formations: 1-3 – Cenozoic: 1 – Quaternary deposits, 2 – Neogene, 3 – Paleogene; 4 – Mesozoic; 5 – Paleozoic; 6 – Mesoproterozoic, Roraima Series; 7 – Paleoproterozoic; 8 – Archean; 9-12 – *intrusions*: granites: 9 – Precambrian, 10 – Paleozoic; 11 – alkaline intrusions; 12 – gabbro and ultramafic rocks; 13 – oil and gas bearing areas; 14 – main gold-bearing areas (1, El Callao: the Choco-10, Increible-6, Isidoro, El Callao, Tomy, and other gold deposits; 2, Botanamo: the Botanamo gold deposit; 3, Eldorado: the SREP, Ceiba, and other gold deposits; 4, Siembra Minera (Km 88): the Cristinas and Brisas copper-gold deposits); 15 – diamond-bearing areas (1 – Guaniamo, 2 – La Paragua, 3 – San Salvador de Paul, 4 – Uriman, 5 – Icabaru); *solid-mineral deposits and prospects:* gold: 16 – superlarge, 17 – large, exhausted, 18 – medium, 19 – small, 20 – small, exhausted, 21 – occurrences and manifestations, 22 – placers (within the contours of the diamondiferous clusters, all the gold placers contain alluvial diamonds); 23 – silver; 24 – bauxites (a – large deposits, b – small deposits and manifestations); 25 – nickel and cobalt (a – deposits, b – manifestations); 26 – copper; 27 – copper and zinc (a – deposits, b – manifestations); 28 – lead and zinc; 29 – tantalum and niobium; 30 – diamonds (a – diamond-bearing kimberlites, b – diamond placers)

Помимо перечисленных выше, известны собственно меднорудные проявления других типов с неясной рудно-формационной принадлежностью – самородной меди в вулканитах, вкрапленной медной минерализации в связи с интрузивами кислого состава и в метаморфизованных вулканогенно-осадочных породах, а также железомедная минерализация с гранатовыми амфиболитами [27].

Относительно широко распространены полиметаллические (свинец, цинк, медь) месторождения и проявления в палеозойских вулканогенно-осадочных формациях Венесуэльских Анд, которые можно отнести к типу колчеданных в вулканогенно-терригенных толщах [6]. Наиболее изученный объект этого типа – месторождение Байладорес, к настоящему времени также отработанное. Оно располагается вблизи одноимённого города в юго-западной части Венесуэльских Анд. Сульфидная (сфалерит, пирротин, галенит, халькопирит, реже арсенопирит) рудная минерализация образует стратоидные массивные и прожилково-вкрапленные рудные тела, сопровождающиеся кварц-хлорит-серицитовыми метасоматитами и локализованные в верхнепалеозойской вулканогенно-осадочной толще (формация Мукучачи), на границе базальных





# Рис. 3. Динамика производства никеля из латеритовых руд по годам в Венесуэле [9, 14–18, 26, 28–32]

Fig. 3. Dynamics of annual nickel production from laterite ores in Venezuela, in tons [9, 14–18, 26, 28–32]

пирокластитов и фациально замещающих и перекрывающих их чёрных углеродистых филлитов. Для месторождения выявлена вертикальная геохимическая зональность с преобладанием свинца и цинка в зоне массивных сульфидов и меди в зоне вкрапленной минерализации в подошве рудного тела. Установленные признаки позволяют отнести это и подобные месторождения к вулканогенному медно-цинково-колчеданному (VMSD) типу [6].

Золото. Традиционные месторождения золота Венесуэлы относят к «орогенному» мезотермальному золото-сульфидно-кварцевому типу в связи с раннепротерозойскими зеленокаменными поясами [25]. Оруденение этого типа широко проявлено в пределах Гвианского щита, в шт. Боливар, в основном в связи с раннепротерозойскими группой Пастора и формацией Эль-Кальяо. В данной золотоносной металлогенической зоне известны аллювиальные и элювиальные месторождения золота, распространённые в восточных и центральных частях щита. К этому типу относятся многочисленные, но в большинстве своём мелкие месторождения и проявления золота. Широко известен золоторудный район Эль-Кальяо, который был центром золотодобычи в Венесуэле с колониальных времен XVIII в. Наиболее известные жильные золоторудные месторождения с богатыми золотыми рудами (Эль-Кальяо, Эль-Мантеко, Эль-Дорадо), сопровождающиеся золотоносными россыпями, к настоящему времени практически отработаны. Им на смену пришли крупные жильнопрожилковые месторождения типа минерализованных зон с более низкими содержаниями золота, такие как Чоко 10 и Инкрейбле 6 рудного района Эль-Кальяо [21, 25, 26].

По заключению консалтинговой компании Micon International Limited (Micon), по состоянию на 31 декабря 2009 г. минеральные ресурсы месторождения Чоко 10 на четырёх его участках составили: сумма выявленных и оценённых (Measured + Indicated) 8.30 млн унций (258,15 т) при среднем содержании Аи 1,85 г/т, предполагаемые (Inferred) 2,82 млн унций (87,71 т) при содержании 1,48 г/т. Большая часть указанных выше ресурсов месторождения Чоко 10, а именно 6,70 млн унций (208,4 т) выявленных и оценённых и 1,076 млн унций (33,47 т) предполагаемых, сосредоточена на неосвоенном участке VBK. В запасы категорий доказанные и возможные (Proven + Probable) переведены 4,46 млн унций (138,72 т) золота (1,6 г/т), в том числе по участку VBK 3,68 млн унций (114,46 т) золота. По четырём участкам месторождения Инкрейбле 6 выявленные и оценённые минеральные ресурсы золота составили 1,37 млн унций (42,61 т) при содержании 1,9 г/т, предполагаемые 0,457 млн унций (14,21 т) при содержании Аи 1,49 г/т; в запасы переведено 0,559 млн унций (17,39 т) золота при содержании Au 1,88 г/т [25].

Однако крупнейшие на сегодняшний день по ресурсам золота венесуэльские месторождения Кристинас (Cristinas) и Брисас (Brisas), объединённые в проекте «Сиембра Минера» (Siembra Minera), представляют собой стратоидные крупнообъёмные тела прожилкововкрапленных золото-медно-сульфидных руд в вулканогенно-осадочных породах зеленокаменных поясов, формационная принадлежность которых не вполне определена.

По оценке консалтинговой компании Roscoe Postle Associates Inc. (RPA), по состоянию на 31 декабря 2017 г. минеральные ресурсы золота по проекту «Сиембра Минера» (месторождения Кристинас и Брисас) составили по сумме выявленных и оценённых (Measured + Indicated Resources) 26,82 млн унций (834,3 т) при среднем содержании Аи 0,7 г/т, предполагаемые ресурсы (Inferred Resource) 25,4 млн унций (789,67 т) Аи при содержании 0,61 г/т; выявленные и оценённые ресурсы меди проекта составили 1,22 млн т при содержании Си 0,1 %, а предполагаемые 1,04 млн т при содержании Си 0,08 %. При этом выявленные и оценённые минеральные ресурсы золота в легкообогатимых окисленных и полуокисленных рудах двух месторождений проекта «Сиембра Минера» составляют около 111 т золота (0,75-0,84 г/т), а предполагаемые – около 43,5 т (0,48-0,53 г/т), что позволяет обеспечивать высокорентабельную добычу на ранних стадиях освоения объекта [24].

По экспертным оценкам S&P Global Market Intelligence, по состоянию на 2020 г. доказанные и возможные запасы золота в Венесуэле составляют около 195 т, а ресурсы золота 2137 т, что согласуется с приведёнными выше данными консалтинговых компаний (рис. 4).

Некоторые из самых известных золоторудных месторождений Венесуэлы со значительными запасами и ресурсами золота, такие как Эль Чоко, Исидора, Брисас, Кристинас, до недавнего времени находились в активной разработке. Рудники и проекты контролировались крупными канадскими компаниями – Crystallex International Corp., Gold Reserve Inc., Rusoro Mining Ltd. Как отмечалось выше, большинство этих объектов в 2011–2012 гг. в связи с отказом компаний на предложенное государством существенное уменьшение их доли в предприятиях были переданы в управление государственной компании Corporación Venezolana de Minería [16-18]. В течение следующего десятилетия годовое производство золота в Венесуэле, по официальным данным, снизилось более чем на 96 %, т. е. примерно с 12 т в 2009 г. до 400 кг в 2016 г. (рис. 5). Это снижение объясняется нехваткой оборудования и материалов, сбоями в подаче электроэнергии, проблемами с транспортом и др. [9, 17, 18, 28–30, 32].

В то же время правительство Венесуэлы продолжало привлекать новых инвесторов к освоению и эксплуатации золоторудных объектов страны. Наиболее крупным проектом, как уже отмечалось, является проект «Сиембра Минера» по разведке, освоению и эксплуатации золото-медных месторождений Кристинас и Брисас в горнодобывающем районе «88-й километр» шт. Боливар. В 2016 г. управление проектом было передано совместному предприятию – управляющей компании Empresa Mixta Ecosocialista Siembra Minera, SA, принадлежащей Венесуэле (через государственную Corporación Venezolana de Minería) (55 %) и американской компании Gold Reserve (45 %) [8]. Ожидалось, что проект будет иметь 45-летний срок службы, включая двухлетний период для создания установки выщелачивания с максимальной проектной производительностью до 12,25 млн т и ещё два года на строительство флотационной обогатительной фабрики с максимальной производительностью до 58,0 млн т/год по рудам с содержанием 0,7 г/т Аи, 0,5 г/т Ад и 0,09 % Си. Суммарная оценка извлекаемого металла за расчётное время эксплуатации составляла 38,1 млн тройских унций (1,2 тыс. т) золота, 17,1 млн тройских унций (0,53 тыс. т) серебра и 1,5 млн т меди [9]. Однако в марте 2022 г. появилось сообщение, что Министерство экологического горного развития Венесуэлы аннулирует права компании Siembra Minera на добычу полезных ископаемых, включая золото, из-за несоблюдения правил добычи, установленных государством. Дальнейшая судьба проекта пока не ясна.

Помимо промышленной добычи крупными горнорудными компаниями, в Венесуэле всегда существовала, но особенно выросла с середины 2010-х гг. кустарная, индивидуальная и кооперативная старательская маломасштабная золотодобыча [1]. Поддержка со стороны правительства выражается в разрешении на создание целого ряда частных золотоизвлекательных фабрик, использующих





Рис. 4. Динамика оценки запасов и ресурсов золота по годам в Венесуэле. По данным консалтинговой компании S&P Global Market Intelligence

Fig. 4. Dynamics of annual gold reserves and resources estimation in Venezuela, in tons. According to data of S&P Global Market Intelligence



# Рис. 5. Динамика добычи золота в Венесуэле по годам:

по данным: *I* – Британской геологической службы (BGS) [4, 5, 20], *2* – Геологической службы США (USGS) [9, 17, 18, 28–30, 32], *3* – Министерства экологического горного развития Венесуэлы [21]

Fig. 5. Dynamics of annual gold production in Venezuela, in kilograms:

*1* – according to data of the British Geological Survey (BGS) [4, 5, 20]; *2* – according to data of the US Geological Survey (USGS) [9, 17, 18, 28–30, 32], *3* – according to data of the Ministry of Popular Power Ecological Mining Development of Venezuela [21]

сырьё мелких производителей. Оценки количества произведённого металла в этом секторе сильно различаются, варьируя от менее 1000 до 9000 кг в год. Центральный банк стремится скупить всё золото, добытое кустарным способом, однако считается, что фактическая добыча больше, чем сообщаемые цифры [4, 5, 20].

В 2018 г. правительство США ввело санкции против золотодобывающей промышленности Венесуэлы. В связи с этим, по сообщению Центрального банка Венесуэлы, золото, скупаемое у мелких золотодобытчиков на юге страны, направляется на рафинирование в Турцию, после чего возвращается обратно в Венесуэлу для хранения в качестве резерва Центробанка [9].

Динамика добычи золота в Венесуэле по опубликованным данным из разных источников представлена на диаграмме (см. рис. 5).

Алмазы. Обнаружены в Венесуэле в 1902 г., а их добыча началась в 1930 г. В 1942 г. на участке Сурукун (шт. Боливар), вблизи истока р. Икабару был обнаружен самый крупный из найденных до сих пор в стране алмаз «Эль Либертадор», или «Боливар», весом 154 кар [19]. Он был разрезан на три камня – 40, 18 и 12 кар.

Наибольшее экономическое значение в Венесуэле имеет отработка россыпных месторождений аллювиальных алмазов, широко распространённых в пределах территории Гвианского щита [19]. По имеющейся информации, ведётся также отработка единственного известного в стране участка коренной алмазоносности в кимберлитах Гуаниамо [21, 26]. Другие коренные источники россыпных алмазов в Венесуэле до настоящего времени не выявлены.

В Венесуэле наиболее интенсивной отработке и истощению подверглись россыпи руслового типа современных рек и ручьёв, что объясняется близостью источников воды. Алмазоносность аллювия пойменных участков долин и древних русел, который наиболее обогащён алмазами в соседней Гайане, известна в алмазоносных районах Сан-Сальвадор-де-Пауль и Гуаниамо. Террасовые аллювиальные отложения, широко распространённые в долинах рек шт. Боливар, изучены весьма слабо.

В Венесуэле алмазоносные зоны и районы добычи алмазов традиционно связываются с залегающей выше формацией Кучеверо позднедокембрийской серии Рорайма, как хорошо видно на карте полезных ископаемых. Серия Рорайма покрывает большую часть южного региона страны, сложена конгломератами, песчаниками и сланцами, вмещающими тела долеритов. Скорее всего, источник алмазов связан с базальными конгломератами этой серии, выступающими в роли промежуточного коллектора (см. рис. 2). Россыпные алмазы часто встречаются вместе с золотом, которое тоже может накапливаться в конгломератах серии Рорайма как в промежуточном источнике.

Основные районы распространения алмазных россыпей располагаются в северо-западной и восточной частях Гвианского щита. Основные алмазоносные площади (районы): Гуаниамо (Кебрада-Гранде) в бассейне верховий р. Кучеверо и её притоков, Ла-Парагуа, Сан-Сальвадор-де-Пауль, Уриман и Икабару (Гран Сабана) – в бассейнах крупных рек Аро, Парагва, Карони и их притоков.

Один из наиболее важных водосборов с точки зрения алмазного аллювия – бассейн р. Карони с её основными притоками в Гран-Сабане. Продуктивность аллювия увеличивается, когда река входит в глубокие долины, прорезанные в формации Рорайма, такие как Уриман, Авеки, Парупа и Сан-Сальвадор-де-Пауль. Район Сан-Сальвадор-де-Пауль – наиболее продуктивный на р. Карони. Здесь преобладают пойменные и террасовые типы россыпей, хотя мелкие алмазы ювелирного качества встречаются в русловом аллювии на всём протяжении р. Карони до её впадения в р. Ориноко.

Наиболее богаты россыпи р. Кебрада-Гранде (приток р. Гуаниамо, впадающей в Ориноко) и её притоков, прослеженные на расстояние более 40 км, с областью наибольшей добычи в горнодобывающем районе Гуаниамо на западе шт. Боливар. Этот район расположен в зоне развития протерозойских пород формации Кучеверо. Россыпи р. Кебрада-Гранде и её притоки содержат алмазы на протяжении



40 км, и в период с 1968 по 1987 г. здесь было добыто около 12 млн кар. Это, безусловно, самый богатый алмазный район в Венесуэле, на долю которого приходится 85 % исторического производства алмазов [19].

Ряд алмазных россыпей известен в центральной и южной частях Гвианского щита, в притоках верховий р. Ориноко. Однако ввиду недоступности этих мест изучение и освоение россыпей крайне затруднено [19].

В 1968 г. в районе Гуаниамо были обнаружены алмазоносные силлы кимберлитового состава [3, 7, 22]. В конце 1990-х – начале 2000-х гг. международной группой специалистов, включая российских геологов, здесь было разведано первое в стране коренное месторождение алмазов Гуаниамо [3].

Этот район относится к слабо исследованной западной части Гвианского щита с региональным развитием раннепротерозойских гранодиоритов. Кимберлиты слагают восемь согласных пологопадающих силлообразных тел мощностью от нескольких сантиметров до 3,7 м, соединённых маломощными вертикальными кимберлитовыми дайками. Вертикальные расстояния между залежами от 50 до 125 м. Возраст кимберлитов позднепротерозойский, 712 ± 6 млн лет. Кимберлитовые пластовые залежи прослежены в зоне шириной 5 км вдоль простирания и более чем на 1 км по падению. Подтверждённые запасы горной массы составляют 45 млн т кимберлита при среднем содержании алмазов ~ 1,5 кар/т, что эквивалентно ~ 67,5 млн кар. Дополнительные прогнозные ресурсы превышают 100 млн кар. Средняя стоимость алмазов составляет 50–100 долл. США за один кар [3].

Как показали минералогические исследования, изученные кимберлиты служат источником алмазов аллювиальной россыпи долины р. Гуаниамо. Наличие в соседних долинах аллювиальных алмазов с отличными характеристиками может свидетельствовать о существовании новых коренных источников в данном районе [3, 22].

Эксплуатация россыпей затруднена из-за сильной заболоченности территорий, особенно в залесённых районах и в сезон дождей. Добыча алмазов ведётся преимущественно с использованием землесосных драг – земснарядов различных конструкций [19].

В результате добычных работ в районе Гуаниамо в первой половине 1970-х гг. ежегодное производство алмазов в Венесуэле выросло с 194 тыс. кар в 1969 г. до 1,25 млн кар в 1974–1976 гг., из которых около 30 % были ювелирного качества. В общей сложности до 1987 г. в стране было добыто более 13,5 млн кар алмазов. При этом половина этого количества добыта не из русловых частей водотоков, а в поймах и на аллювиальных террасах, перекрытых наносами мощностью более 1 м [19].

В 1990-е гг. добыча алмазов в Венесуэле находилась на уровне 500-800 тыс. кар в год, после чего начала снижаться, сократившись к 2005 г. до 55 тыс. кар, а к 2010 г. до 2,1 тыс. кар. С 2011 по 2019 г. Венесуэла не предоставляла данные для статистического альманаха Kimberley Process, хотя старательская добыча велась во всех алмазоносных районах. В 2020 г. было добыто 794 кар алмазов на сумму в 49,6 тыс. долл. США, средняя стоимость алмазов составила 62,55 долл. США/кар [23]. В 2021 г. добыто 457 кар алмазов на сумму в ~ 8 тыс. долл. США при средней стоимости 17,64 долл. США/кар. Снижение стоимости венесуэльских алмазов обусловлено тем, что основная добыча алмазов ведётся уже из коренных кимберлитовых силлов в провинции Гуаниамо (рис. 6).

В то же время качество алмазов сравнительно высокое – ювелирные кристаллы составляют ~ 60 %. В регионе часто встречаются кристаллы «чистой воды» треугольной формы, иногда очень светлые голубые, полупрозрачные. Большинство мелких кристаллов имеют яблочно-зелёную оболочку. В стране организовано гранильное производство, хотя и небольшой мощности. Большинство венесуэльских алмазов продавалось в США.

Общие ресурсы алмазов Венесуэлы на 2020 г., по данным S&P Global Market Intelligence, составляли 65,7 млн кар.

Перспективы развития горнорудной отрасли Венесуэлы. Сведения о наиболее крупных горнорудных проектах по твёрдым полезным ископаемым Боливарианской Республики Венесуэла приведены в таблице.



Рис. 6. Динамика добычи алмазов по годам в Венесуэле [23]

Fig. 6. Dynamics of annual diamond production in Venezuela, in thousand carats [23]

В связи с кризисной экономической ситуацией воспроизводство минерально-сырьевой базы Венесуэлы в последнее десятилетие существенно замедлилось в результате резкого сокращения бюджетных ассигнований даже на проведение геологоразведочных работ на высоколиквидные виды сырья (рис. 7).

В создавшихся условиях правительство Венесуэлы поставило цель интенсивного развития горнодобывающей промышленности в национальных интересах с использованием современных технологий и с учётом принципа баланса экологии и экономики. Эта концепция реализуется в форме разработки и осуществления национального проекта развития – Национальной стратегии развития Горнорудного пояса Ориноко, закреплённой Указом Президента № 2248 от 24 февраля 2016 г. [21, 26, 30].

Горнорудный пояс Ориноко расположен к югу от р. Ориноко в северной части шт. Боливар. Его общая площадь составляет 111 843,70 км<sup>2</sup>. В пределах пояса сосредоточены основные ресурсы твёрдых полезных ископаемых Венесуэлы, включая золото, алмазы, тантал, ниобий, железные руды, бокситы, нерудное сырьё (рис. 8).

Здесь располагаются крупнейшие золоторудные площади Венесуэлы – Эль-Кальяо (доказанные и возможные запасы золота около 150 т, оценённые и выявленные ресурсы около 300 т, предполагаемые ресурсы около 100 т при средних содержаниях Ац 1,5–1,9 г/т) [25] и Сиембра Минера (месторождения Кристинас и Брисас) с оценёнными и выявленными ресурсами около 830 т золота и 1,2 млн т меди, предполагаемыми ресурсами около 790 т золота и 1 млн т меди при средних содержаниях золота ~ 0,60–0,70 г/т, меди ~ 0,1 % [24]. Рентабельность отработки этих объектов неоднократно обосновывалась различными экспертными организациями. Следует отметить, что одним из факторов такой оценки считаются весьма низкие цены на энергетические ресурсы, действовавшие в Венесуэле.

Ресурсы и заявленные запасы алмазов в пределах Горнорудного пояса Ориноко, по информации Министерства экологического горного развития Венесуэлы, составляют более 1 млрд кар с содержаниями в аллювии 2–5 кар/т, в кимберлитах 1–4 кар/т, из них 275 млн кар только в районе Гуаниамо [3, 21, 26]. Для выявления промышленных коренных месторождений алмазов необходимо проведение планомерного геологического анализа этого региона с привлечением дистанционных материалов и выяснение структурно-тектонического контроля размещения кимберлитовых тел, часть из которых ещё не обнаружена в этой части Гвианского щита.

Наиболее перспективная площадь на *ред*кие металлы (ниобий, тантал, олово), а также титан и железо в связи с гранитоидными формациями и пегматитами включает северо-восточную зону шт. Амазонас и юго-западную часть муниципалитета Седеньо шт. Боливар. Исследования, проведённые Национальным институтом геологии и горного дела по экологическому развитию Министерства народной власти в Боливарианской Республике Венесуэла (INGEOMIN), выявили следующие перспективные участки для поисково-разведочных работ на колумбит-танталит: район



# Крупнейшие по стоимости горно-металлургические проекты в Венесуэле на 2021 г. (по данным S&P Global Market Intelligence)

The major mining and metallurgical projects in Venezuela as for 2021 (after S&P Global Market Intelligence)

Наименование проекта	Тип минерального сырья	Стадия освоения	Статус активности проекта	Стоимость в млн долл. США
Сиембра Минера (Siembra Minera)	Золото	Предварительное ТЭО	Неактивный	489 412,3
Чоко (Choco)	Золото	Подсчёт запасов	Активный	90 481,1
Гуаниамо (Guaniamo)	Алмазы	Подсчёт запасов	Неактивный	28 096,8
Инкрейбле 6 (Increible 6)	Золото	ТЭО	Неактивный	14 856,8
Валле Хондо (Valle Hondo)	Золото	Подсчёт запасов	Неактивный	11 770,1
Лома-де-Йерро (Loma de Hierro)	Никель	Добыча	Активный	10 778,0
Сан Рафаэль/Эл Пласер (San Rafael/El Placer)	Золото	Закрыта	Неактивный	10 543,5
Инкрейбле 4 (Increible 4)	Золото	Подсчёт запасов	Временно приостановлен	8 358,5



Рис. 7. Динамика финансирования геологоразведочных работ на золото из бюджета Венесуэлы (по данным S&P Global Market Intelligence)

Fig. 7. Dynamics of financing of exploration for gold from the budget of Venezuela, in million US dollars (according to S&P Global Market Intelligence)



Рис. 8. Горнорудный пояс Ориноко и основные объекты, планируемые для освоения и эксплуатации [21]

Fig. 8. Orinoco Mining Belt and its main objects planned for the development and exploitation [21]

Агуамена-Бокеронес-Вильякоа, Серро Импакто, Гуаниамо, район р. Куао, район Серро Дельгадо Шальбо (Блэк Ривер). В настоящее время подсчитанные запасы колумбита и танталита (колтана) и соответственно производство ниобия и тантала в Венесуэле отсутствуют, но предварительные исследования INGEOMIN показывают значительную концентрацию этих минералов [21, 26].

Согласно принятой стратегии, работы по геологической разведке будут проводиться всего примерно на 10 % площади проекта «Горнорудный пояс Ориноко», а разработка полезных ископаемых после завершения этапа поисков и разведки будет осуществляться только на 2 % площади пояса. В целях оптимизации административного регулирования пояс подразделён на четыре сектора, названных в честь героинь борьбы за независимость Венесуэлы (см. рис. 8).

Выделение территории «Рудная дуга Ориноко», находящейся под регулированием и контролем государства, имеет целью стимулирование отраслевой деятельности, связанной с эксплуатацией полезных ископаемых с участием частных, государственных и смешанных компаний, а также с участием малых горнодобывающих предприятий, осуществление её в соответствии с критериями суверенитета и экологической ответственности [21, 26].

Венесуэла находится в поисках зарубежных инвестиций для реализации широкомас-



штабной программы освоения пояса Ориноко. По сообщениям различных агентств, ведутся активные переговоры с инвесторами из Ирана, Турции, Китая. Заметное место в развитии минерально-сырьевой отрасли ТПИ Венесуэлы могут занять российские горнорудные компании. Существенную помощь в этом могут оказать организации российской геологической службы.

В этом контексте следует отметить, что основной проблемой, сдерживающей воспроизводство МСБ алмазов, цветных и благородных металлов и привлечение частных инвестиций в поисковые работы, является слабая геологическая и геофизическая изученность Республики Венесуэла. Поэтому в качестве актуальных видов работ на стадии регионального геологического изучения и прогнозирования полезных ископаемых могут рассматриваться специализированные прогнозно-минерагенические исследования м-ба 1 : 500 000, включающие в том числе комплекс современных дистанционных и наземных геофизических работ м-ба 1 : 200 000. При выделении перспективных площадей предполагается детализация геофизических аномалий и проведение поисковых работ м-ба 1 : 50 000 с заверкой выявленных аномалий.

Заключение. Венесуэла обладает богатой и разнообразной минерально-сырьевой базой, а имеющиеся геологические данные свиде-

тельствуют о том, что её потенциал раскрыт ещё не полностью. Правительством Венесуэлы поставлена задача диверсификации минерально-сырьевого комплекса страны. В феврале 2016 г. учреждена «Национальная зона стратегического развития Горнорудной дуги Ориноко» в шт. Боливар. В пределах пояса выявлены промышленные месторождения и локализованы значительные прогнозные ресурсы ТПИ, требующие современной переоценки для повышения их инвестиционной привлекательности и привлечения горнорудных компаний.

Наряду с основным направлением российско-венесуэльского сотрудничества в сфере недропользования – участием российских компаний в изучении и освоении ресурсов углеводородов Венесуэлы, перспективным является расширение сотрудничества российской и венесуэльской государственных геологических служб и горнорудных компаний в программах воспроизводства МСБ ТПИ. Первоочередными направлениями работ могут стать прогнозно-металлогенические исследования, составление геологических карт на горнорудные районы и ревизионно-поисковые работы на перспективных участках. В дальнейшем необходима постановка оценочных и разведочных работ как на новых площадях и объектах, так и для переоценки флангов и глубоких горизонтов отработанных месторождений.

# Список литературы

- Верхозин С. С. Добыча золота в Венесуэле (Обзор) // Золотодобыча. – 2019. – № 3 (244). – С. 48–54.
- Геология и полезные ископаемые Венесуэлы. X-MINERAL.RU/ 02 августа 2011. – URL: https:// www.x-mineral.ru/poleznye-iskopaemye/38poleznye-iskopaemye-mira/64-geologiya-ipoleznye-iskopaemye-venesuely.html?showall=1 (дата обращения: 14.12.2022).
- Каминский Ф. В. Слоистая система пластовых залежей кимберлитов Гуаниамо в Венесуэле – новый тип алмазных месторождений // Научно-

методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов. Сборник тезисов докладов IX Международной научно-практической конференции. – ЦНИГРИ, 2019. – С. 21–22.

- Brown T. J., Idoine N. E., Wrighton C. E. [et al.]. World mineral production 2014–2018, British Geological Survey. – Keyworth, Nottingham, 2019. – 101 p.
- Brown T. J., Wrighton C. E., Idoine N. E. [et al.]. World mineral production 2010–2014 / British Geological Survey. – Keyworth, Nottingham, 2016. – 92 p.



- Carlson G. G. Geology of the Bailadores, Venezuela, Massive Sulfide Deposits // Economic Geology. – 1977. – V. 72. – pp. 1131–1141.
- Channer D. M. D., Egorov A., Kaminsky F. Geology and Structure of the Guaniamo Diamondiferous Kimberlite Sheets, South-West Venezuels // Revista Brasiliera de Geociencias. – 2001. – № 31 (4). – pp. 615–630.
- Domènech C., Galí S., Soler J. M., Ancco M. P., Meléndez W., Rondón J., Villanova-de-Benavent C., Proenza J. A. The Loma de Hierro Ni-laterite deposit (Venezuela): Mineralogical and chemical composition // Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.-2020.-№ 72 (3).-A050620.-URL: http:// dx.doi.org/10.18268/BSGM2020v72n3a050620 (дата обращения: 14.12.2022).
- Fong-Sam Y. The Mineral Industry of Venezuela // 2017–2018 Minerals Yearbook (Advance release). – Venezuela, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. – 2022. – 11 p.
- Geologic Shaded Relief Map of Venezuela / compilation by P. C. Hackley, F. Urbani, A. W. Karlsen, Ch. P. Garrity // USGS Open-File Report 2005– 1038, Prepared in cooperation with the Escuela de Geologiia, Minas y Geofisica, Universidad Central de Venezuela and the Fundacion Venezolana de Investigaciones Sismologicas (FUNVISIS). – Venezuela, Caracas, 2005.
- Geology and Mineral Deposits of the Venezuelan Guayana Shield / ed. by G. B. Sidder, A. E. Garcia, J. W. Stoeser // U.S. Geological Survey Bulletin 2124. – Washington, 1995. – 320 p.
- Geology and Mineral Resources Assessment of the Venezuelan Guayana Shield, by U.S. Geological Survey and Corporacion Venezolana de Guayana, Tecnica Minera, C.A., U.S. Geological Survey Bulletin 2062, Washington, 1993, 133 p.
- Gomez Tapias J., Schobbenhaus C., Montes Ramirez N. E. Geological Map of South America, Scale 1:5 000 000, Commission for the Geological Map of the World, 2019 Edition.
- Gurmendi A. C. The Mineral Industry of Venezuela // 2008 Minerals Yearbook. – Venezuela, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. – 2010. – 11 p.
- 15. *Gurmendi A. C.* The Mineral Industry of Venezuela // 2009 Minerals Yearbook. – Venezuela, U.S. De-

partment of the Interior, U.S. Geological Survey. – 2011. – 10 p.

- Gurmendi A. C. The Mineral Industry of Venezuela // 2010 Minerals Yearbook. – Venezuela, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. – 2012. – 10 p.
- Gurmendi A. C. The Mineral Industry of Venezuela // 2011 Minerals Yearbook. – Venezuela, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. – 2013. – 11 p.
- Gurmendi A. C. The Mineral Industry of Venezuela // 2012 Minerals Yearbook. – Venezuela, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. – 2015. – 10 p.
- 19. *Heylmun E. B.* Placer Diamonds in Venezuela // ICMJ's Prospecting and Mineral Journal. 2001.
- 20. Idoine N. E., Raycraft E. R., Shaw R. A. [et al.]. World mineral production 2016–2020 / British Geological Survey. – Keyworth, Nottingham, 2022. – 98 p.
- 21. *Investment* Opportunities at the Venezuelan Mining Sector (Mining engine) / Bolivarian Government of Venezuels, Ministry of Peoplel's Power of Ecological Mining Development. – 2019. – pp. 2–26.
- 22. Kaminsky F. V., Zakarchenko O. D., Griffin W. L., Channer D. M. D., Khachatryan-Blinova G. K. Diamond from the Guaniamo Area, Venezuela // The Canadian Mineralogist. – 2000. – V. 38. – pp. 1347– 1370.
- 23. *Kimberley* Process Rough Diamond Statistics. URL: KPCS/kimberleyprocessstatistics.org/public\_ statistics/index.htm (дата обращения: 14.12.2022).
- 24. Lambert R. J., Miranda H., Carlsson J. T. [et al.]. Tehnical Report on the Siembra Minera Project // NI 43-101 Report. – Bolivar State, Venezuela, 2018. – 280 p.
- 25. Makepeace D., Friedman D., Anderson D. [et al.]. Rusoro Mining Ltd. NI 43-101 Technical Report Feasibility Study Expansion of Gold Production at Choco 10 and Increible 6, Bolivar State, Venezuela. MICON International Limited, Effective Date: 31 Dec. 2020, Signature Date: Dec 30, 2011. – 233 p.
- 26. *Responsible* mining in Venezuela (Investment opportunities in the mining sector) Main minerals / Ministry of People's Power for Ecological Mining Development. 2018. 64 p.



- Rivera A. G. Types of Copper Mineralizations in Venezuela // VII Congreso Geologico Chileno: Concepcion (17–21 octubre de 1994, Actas). – 1994. – V. II. – pp. 1614–1615.
- Soto-Viruet Y. The Mineral Industry of Venezuela // 2013 Minerals Yearbook. – Venezuela, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. – 2016. – 10 p.
- Szczesniak P. A. The Mineral Industry of Venezuela // 2015 Minerals Yearbook (Advance release). – Venezuela, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. – 2019. – 9 p.
- 30. Szczesniak P. A. The Mineral Industry of Venezuela // 2016 Minerals Yearbook (Advance release). – Venezuela, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. – 2019. – 9 p.
- Torres I. E. The Mineral Industry of Venezuela // 2005 Minerals Yearbook. – Venezuela, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2007. – 11 p.
- 32. Wacaster S. The Mineral Industry of Venezuela // 2014 Minerals Yearbook. – Venezuela, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. – 2017. – 9 p.

# References

- Verkhozin S. S. Dobycha zolota v Venesuele (Obzor) [Gold mining in Venezuela (Overview)], *Zolotodobycha* [Gold mining], 2019, No 3 (244), pp. 48–54. (In Russ.).
- Geologiya i poleznye iskopaemye Venesuely. X-MINERAL.RU/ 02 avgusta 2011 [Geology and minerals of Venezuela. X-MINERAL.RU/ August 02, 2011], available at: https://www.x-mineral.ru/ poleznye-iskopaemye/38-poleznye-iskopaemye-mira/64-geologiya-i-poleznye-iskopaemyevenesuely.html?showall=1 (Accessed: 14.12.2022).
- Kaminskii F. V. Sloistaya sistema plastovykh zalezhei kimberlitov Guaniamo v Venesuele – novyi tip almaznykh mestorozhdenii [Layered system of Guaniamo kimberlite formation deposits in Venezuela – a new type of diamond deposits], Nauchnometodicheskie osnovy prognoza, poiskov, otsenki mestorozhdenii almazov, blagorodnykh i tsvetnykh metallov. Sbornik tezisov dokladov IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Scientific and methodological foundations of forecasting, prospecting, evaluation of diamond deposits, precious and non-ferrous metals. Collection of abstracts of the IX International Scientific and Practical Conference], TsNIGRI Publ., 2019, pp. 21–22.
- Brown T. J., Idoine N. E., Wrighton C. E. [et al.]. World mineral production 2014–2018, *British Geological Survey*, Keyworth, Nottingham, 2019, 101 p.
- Brown T. J., Wrighton C. E., Idoine N. E. [et al.]. World mineral production 2010–2014, *British Geological Survey*, Keyworth, Nottingham, 2016, 92 p.

- Carlson G. G. Geology of the Bailadores, Venezuela, Massive Sulfide Deposits, *Economic Geology*, 1977, V. 72, pp. 1131–1141.
- Channer D. M. D., Egorov A., Kaminsky F. Geology and Structure of the Guaniamo Diamondiferous Kimberlite Sheets, South-West Venezuels, *Revista Brasiliera de Geociencias*, 2001, No 31 (4), pp. 615–630.
- Domènech C., Galí S., Soler J. M., Ancco M. P., Meléndez W., Rondón J., Villanova-de-Benavent C., Proenza J. A. The Loma de Hierro Ni-laterite deposit (Venezuela): Mineralogical and chemical composition, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 2020, No 72 (3), A050620, available at: http:// dx.doi.org/10.18268/BSGM2020v72n3a050620 (Accessed: 14.12.2022).
- Fong-Sam Y. The Mineral Industry of Venezuela, 2017-2018 Minerals Yearbook (Advance release), Venezuela, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2022, 11 p.
- 10. Geologic Shaded Relief Map of Venezuela, compilation by P. C. Hackley, F. Urbani, A. W. Karlsen, Ch. P. Garrity, USGS Open-File Report 2005-1038, Prepared in cooperation with the Escuela de Geologiia, Minas y Geofisica, Universidad Central de Venezuela and the Fundacion Venezolana de Investigaciones Sismologicas (FUNVISIS), Venezuela, Caracas, 2005.
- Geology and Mineral Deposits of the Venezuelan Guayana Shield, ed. by G. B. Sidder, A. E. Garcia, J. W. Stoeser, U.S. Geological Survey Bulletin 2124, Washington, 1995, 320 p.



- 12. Geology and Mineral Resources Assessment of the Venezuelan Guayana Shield, by U.S. Geological Survey and Corporacion Venezolana de Guayana, Tecnica Minera, C.A., U.S. Geological Survey Bulletin 2062, Washington, 1993, 133 p.
- Gomez Tapias J., Schobbenhaus C., Montes Ramirez N. E. Geological Map of South America, Scale 1:5000000, Commission for the Geological Map of the World, 2019.
- Gurmendi A. C. The Mineral Industry of Venezuela, 2008 *Minerals Yearbook*, Venezuela, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2010, 11 p.
- Gurmendi A. C. The Mineral Industry of Venezuela, 2009 *Minerals Yearbook*, Venezuela, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2011, 10 p.
- Gurmendi A. C. The Mineral Industry of Venezuela, 2010 *Minerals Yearbook*, Venezuela, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2012, 10p.
- Gurmendi A. C. The Mineral Industry of Venezuela, 2011 *Minerals Yearbook*, Venezuela, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2013, 11 p.
- Gurmendi A. C. The Mineral Industry of Venezuela, 2012 *Minerals Yearbook*, Venezuela, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2015, 10 p.
- 19. Heylmun E. B. Placer Diamonds in Venezuela, *ICMJ's Prospecting and Mineral Journal*, 2001.
- Idoine N. E., Raycraft E. R., Shaw R. A. [et al.]. World mineral production 2016–2020, *British Geological Survey*, Keyworth, Nottingham, 2022, 98 p.
- 21. Investment Opportunities at the Venezuelan Mining Sector (Mining engine), Bolivarian Government of Venezuels, Ministry of Peoplel's Power of Ecological Mining Development, 2019, pp. 2–26.
- 22. Kaminsky F. V., Zakarchenko O. D., Griffin W. L., Channer D. M. D., Khachatryan-Blinova G. K. Diamond from the Guaniamo Area, Venezuela, *The Canadian Mineralogist*, 2000, V. 38, pp. 1347–1370.

- 23. Kimberley Process Rough Diamond Statistics, available at: KPCS/kimberleyprocessstatistics.org/public\_statistics/index.htm (Accessed: 14.12.2022)
- 24. Lambert R. J., Miranda H., Carlsson J. T. [et al.]. Tehnical Report on the Siembra Minera Project, *NI* 43-101 Report, Bolivar State, Venezuela, 2018, 280 p.
- Makepeace D., Friedman D., Anderson D. [et al.]. Rusoro Mining Ltd. NI 43-101 Technical Report Feasibility Study Expansion of Gold Production at Choco 10 and Increible 6, Bolivar State, Venezuela. MICON International Limited, Effective Date: 31 Dec. 2020, Signature Date: Dec 30, 2011, 233 p.
- 26. Responsible mining in Venezuela (Investment opportunities in the mining sector) Main minerals, Ministry of People's Power for Ecological Mining Development, 2018, 64 p.
- Rivera A. G. Types of Copper Mineralizations in Venezuela, VII Congreso Geologico Chileno: Concepcion (17–21 octubre de 1994, Actas), 1994, V. II, pp. 1614–1615.
- Soto-Viruet Y. The Mineral Industry of Venezuela, 2013 *Minerals Yearbook*, Venezuela, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2016, 10 p.
- Szczesniak P. A. The Mineral Industry of Venezuela, 2015 Minerals Yearbook (Advance release), Venezuela, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2019, 9 p.
- 30. Szczesniak P. A. The Mineral Industry of Venezuela, 2016 Minerals Yearbook (Advance release), Venezuela, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2019, 9 p.
- Torres I. E. The Mineral Industry of Venezuela, 2005 *Minerals Yearbook*, Venezuela, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2007, 11 p.
- Wacaster S. The Mineral Industry of Venezuela, 2014 *Minerals Yearbook*, Venezuela, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2017, 9 p.



# Авторы

## Гермаханов Асламбек Асхатович

Заместитель руководителя «Роснедра» 1

## Черных Александр Иванович

кандидат геолого-минералогических наук генеральный директор ЦНИГРИ<sup>2</sup> chernykh@tsnigri.ru

## Гирфанов Михаил Миргалимович

кандидат геолого-минералогических наук начальник отдела<sup>2</sup> girfanov@tsnigri.ru

## Истомин Валерий Александрович

научный сотрудник<sup>2</sup> istomin@tsnigri.ru

# Сватков Андрей Сергеевич

инженер<sup>2</sup> svatkov@tsnigri.ru

<sup>1</sup> Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра) г. Москва, Россия

<sup>2</sup> ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ЦНИГРИ) г. Москва, Россия

# **Authors**

# Aslambek A. Germakhanov

Deputy Head of Rosnedra<sup>1</sup>

# Alexander I. Chernykh

PhD in Geology and Mineralogy Director General of TsNIGRI<sup>2</sup> chernykh@tsnigri.ru

# Mikhail M. Girfanov

PhD in Geology and Mineralogy Head of Department<sup>2</sup> girfanov@tsnigri.ru

# Valery A. Istomin

Researcher<sup>2</sup> istomin@tsnigri.ru

# Andrey S. Svatkov

Engineer<sup>2</sup> svatkov@tsnigri.ru

<sup>1</sup> Federal Agency for Mineral Resources (Rosnedra) Moscow, Russia

<sup>2</sup> Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals (TsNIGRI) Moscow, Russia

# МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



11–14 АПРЕЛЯ

2023

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗА, ПОИСКОВ, ОЦЕНКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АЛМАЗОВ, БЛАГОРОДНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

# МОСКВА 🍪 ЦНИГРИ

К участию приглашаются представители территориальных органов Роснедр, геологоразведочных предприятий, компаний-недропользователей, научно-исследовательских отраслевых и академических институтов, вузов.

Программа конференции включает пленарное заседание, устные и стендовые доклады на тематических секциях.

Конференция пройдёт в смешанном (очном и онлайн) формате. У докладчиков будет возможность выступить в зале конференций ФГБУ «ЦНИГРИ». Для тех, кто не сможет приехать, доступно выступление онлайн. Все выступления будут транслироваться в прямом эфире.

Официальные языки конференции – русский и английский

Организационный взнос с участников не взимается.

Участие в экскурсии платное.

Окончания приёма заявок и оплаты участия в полевых экскурсиях – 27 февраля 2023 г.

conference@tsnigri.ru www.conference.tsnigri.ru 8(495) 315-43-47, секретарь конференции Горячева Алёна Сергеевна

# ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

- Минерагения АБЦМ
- Приоритетные направления прогнознопоисковых работ на АБЦМ
- Перспективные объекты для постановки геологоразведочных работ на АБЦМ различных стадий
- Опыт проведения и результаты геологоразведочных работ на АБЦМ
- Научно-методические основы комплексирования геологических, геохимических, геофизических методов прогноза, поисков, оценки и разведки
- Использование комплексных моделей месторождений для целей прогноза, поисков, оценки и разведки АБЦМ
- Разработка и реализация инновационных методов, методик и технологий ГРР
  - Г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129 к. 1



ОБЩИЕ ВОПРОСЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

УДК 553.04 (985)

# Минерально-сырьевые кластеры Арктической зоны России и перспективы расширения внешней границы её континентального шельфа

Mineral-and-energy clusters of the Russian Arctic and prospects for expanding the outer boundary of its continental shelf

# Кременецкий А. А., Спиридонов И. Г., Пилицын А. Г., Веремеева Л. И.

Обоснован проект организации минеральносырьевых кластеров с пространственным сопряжением месторождений твёрдых полезных ископаемых (ТПИ) и углеводородного сырья (УВС), локализованных на континентальной окраине и шельфе Арктической зоны Российской Федерации. Охарактеризованы четыре минерально-сырьевых кластера: Мурманско-Баренцевоморский, Ямало-Норильский, Ленско-Лаптевоморский и Северо-Восточно-Чукотский с соответствующим описанием минерально-сырьевой базы ТПИ и УВС, а также обоснованием перспективных площадей выявления золоторудного и медно-порфирового оруденения в Северо-Восточно-Чукотском кластере.

Рассмотрен пример прогноза и локализации нефтегазоносности в глубоководной части Арктического бассейна за пределами 200-мильной зоны шельфа РФ. Приведены геолого-морфоструктурные доказательства эпиконтинентальной природы дна Амеразийского и Евразийского бассейнов в качестве критерия обоснования права России на расширение внешней границы континентального шельфа.

Ключевые слова: минерально-сырьевые кластеры, твёрдые полезные ископаемые, углеводородное сырьё, золоторудное и медно-порфировое оруденение, геолого-морфоструктурное районирование, Евразийский бассейн, хребет Гаккеля, внешняя граница континентального шельфа, Арктическая зона РФ.

# Kremenetsky A. A., Spiridonov I. G., Pilitsyn A. G., Veremeeva L. I.

The project of organizing mineral-and-energy clusters with spatial conjugation of deposits of solid minerals (SM) and hydrocarbons (HC) localized on the continental margin and shelf of the Arctic zone of the Russian Federation is substantiated. Four clusters of the kind are characterized, i.e.: Murmansk-Barents, Yamal-Norilsk, Lena-Laptev Sea and Northeast-Chukotka, with the corresponding characteristics of the SM and HC resource bases, as well as substantiation of the bedrock gold and porphyry copper prospective areas in the Northeast-Chukotka cluster.

An example of prediction and localization of the HC accumulations in the deep-water part of the Arctic Basin outside the 200-mile zone of the Russian shelf is considered. Geological and morphostructural evidence of the epicontinental nature of the bottom of the Amerasian and Eurasian basins is presented as a criterion for substantiating Russia's right to expand the outer boundary of the continental shelf.

Key words: mineral-and-energy cluster, solid minerals, hydrocarbons, bedrock gold and porphyry copper mineralization, geological and morphostructural zoning, the Eurasian Basin, the Gakkel Ridge, the outer boundary of the continental shelf, the Arctic zone of the Russian Federation.

Для цитирования: Кременецкий А. А., Спиридонов И. Г., Пилицын А. Г., Веремеева Л. И. Минерально-сырьевые кластеры Арктической зоны России и перспективы расширения внешней границы её континентального шельфа. Руды и металлы. 2022. № 4. С. 32–53. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10021

For citation: Kremenetsky A. A., Spiridonov I. G., Pilitsyn A. G., Veremeeva L. I. Mineral-and-energy clusters of the Russian Arctic and prospects for expanding the outer boundary of its continental shelf. Ores and metals, 2022, № 4, pp. 32–53. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10021

© Кременецкий А. А., Спиридонов И. Г., Пилицын А. Г., Веремеева Л. И., 2022 © Kremenetsky A. A., Spiridonov I. G., Pilitsyn A. G., Veremeeva L. I., 2022

Циркумполярная Арктика, как известно, обладает огромным минерагеническим потенциалом. Здесь на континентальной окраине сосредоточено значительное количество месторождений цветных, благородных, редких и радиоактивных металлов (рис. 1, *a*), а на шельфе и в глубоководной части океана – миллиардные ресурсы нефти и газа (см. рис. 1, b). Арктическая зона Российской Федерации (АЗРФ) включает сухопутную часть континентальной окраины (площадь более 4,7 млн км<sup>2</sup>) и континентальный шельф (площадь около 5 млн км<sup>2</sup>) с перспективой его расширения до 1,3 млн км<sup>2</sup> за пределами 200мильной зоны, согласно Заявкам России, направленным в Комиссию ООН в 2001 и 2015 гг. К настоящему времени на сухопутной территории и континентальном шельфе АЗРФ создана уникальная минерально-сырьевая база твёрдых полезных ископаемых (ТПИ) (табл. 1) и углеводородного сырья (УВС) (табл. 2). При этом, несмотря на значительные запасы отдельных видов ТПИ, например, титана, меди, олова, серебра, сурьмы, алмазов (25–50 % запасов РФ), редкоземельных металлов, платиноидов и скандия (70-90 % запасов РФ), а также УВС и, прежде всего, конденсата и свободного горючего газа (58-76 % запасов РФ), доля разрабатываемых в настоящее время месторождении в АЗРФ относительно невелика. Исключение составляют: Мурманская область, обеспечивающая 88-100 % от добычи по РФ апатитовых руд, редкоземельных металлов, галлия, рубидия, титана и циркония; Мурманская область и север Красноярского края обеспечивают основную долю запасов (81,8 %) и практически всю добычу никеля (99,6 %), а также кобальта (66,3 % и 92,4% соответственно) в РФ; Красноярский край, обеспечивающий более 95 % добычи меди в АЗРФ и 96 % от добычи платиноидов в целом по России, и, наконец, Архангельская область и Республика Саха, обеспечивающие более 30 % от добычи коренных и россыпных алмазов по РФ. Ведущее место по добыче углеводородов в АЗРФ занимает Ямало-Ненецкий АО: свободного газа (96 % от добычи по АЗРФ и более 83 % от добычи в целом по России) и конденсата 56 и 40 % соответственно. На шельфе Россия занимает первое место по добыче УВС – более 50 % относительно США и Норвегии (рис. 2, *b*).

По данным Всесоюзной переписи населения 1989 г. и данным Росстата за 2017 г., за последние 30 лет население Арктической зоны РФ сократилось в целом в 1,24 раза (с 3,1 млн человек до 2,5 млн): в 1,2–1,5 раз в Западной части АЗРФ (Мурманская обл., Карелия и Архангельская обл.) и в 2–3,2 раза – в Центральной и Восточной частях (Воркута, 13 северных районов Якутии и Чукотка). Стабильной сохраняется численность населения в Ямало-Ненецком АО и Красноярском крае с незначительным приростом (в 1,12 раза) в Ненецком АО. Причин тому, как известно, несколько: сокращение и прекращение деятельности ряда горнопромышленных предприятий, «замораживание» инфраструктуры Северного морского пути, отток коренного населения, вследствие перехода от принудительно-поощрительной миграции населения на Север к вахтовому методу при освоении природных ресурсов Северо-Восточных регионов и т.д.

В настоящее время одним из реальных рычагов рентабельного освоения существующей минерально-сырьевой базы ТПИ и УВС на этой территории с активным пополнением ресурсов высоколиквидного, дефицитного, стратегического и энергетического сырья, является создание в АЗРФ и долговременное функционирование минерально-сырьевых центров (МСЦ). Обобщение и анализ многочисленных проектов и предложений по организации МСЦ ТПИ и УВС в АЗРФ [1–4, 9] позволяет сформулировать следующие ключевые критерии обоснования размещения последних на основе принципа частно-государственного партнёрства:

1. Территориальная сближенность главных системообразующих элементов МСЦ, обладающих необходимым ресурсным потенциалом разведанных и прогнозируемых видов ТПИ и УВС.

2. Наличие действующих (и проектируемых) горно-обогатительных комбинатов и предприятий по добыче, переработке и





© Кременецкий А. А., Спиридонов И. Г., Пилицын А. Г., Веремеева Л. И., 2022 © Kremenetsky A. A., Spiridonov I. G., Pilitsyn A. G., Veremeeva L. I., 2022






## Табл. 1. Виды и доля запасов твёрдых полезных ископаемых Арктической зоны России в объёмах запасов и добычи по РФ (данные ФГБУ «ВСЕГЕИ», по состоянию на 01.01.2020 г.) [10]

Table 1. Types and proportions of the Russian Arctic mineral reserves in the total national reserves and production (data of FSBI "VSEGEI", as of 01.01.2020) [10]

						÷			
Группа и вид полезного ископаемого	Группа значимых полезных ископае- мых*	Количест- во место- рождений полезных ископае- мых	Еди- ницы измере- ния	Запасы (А+В+С <sub>1</sub> , для УВС – А+В <sub>1</sub> +С <sub>1</sub> )	% от запасов по РФ	С <sub>2</sub> ; для УВС – В <sub>2</sub> +С <sub>2</sub>	Заба- лан- совые запасы	Добыча за пред- шествую- щий год	% от добычи по РФ
	Металлические полезные ископаемые								
Чёрные металлы									
Железные руды	1	22	тыс. т	1 700 811	2,9	1 127 994	777 550	28 056	8,1
Хромовые руды	3	18	тыс. т	6811	37	5380	-	261	43,9
Титан ( $TiO_2$ )	3	10	тыс. т	78 733	30,3	51 638	20 377	446	100
Цветные металлы									
Медь	1	31	тыс. т	30 238,7	41,1	11 253,3	6538,5	441,4	46,2
Никель**	1	31	тыс. т	21 154,1	81,8	7569,1	3293,8	270,1	99,6
Кобальт**	1	23	тыс. т	104,1	66,3	523,5	223,4	12,0	92,4
Свинец	2	3	тыс. т	580,6	5,7	508,7	173,4	0	0
Цинк	2	1	тыс. т	1325,3	3,2	1162,6	531,1	0	0
Молибден	1	2	Т	188 459	12,6	11 1228	106 299	0	0
Вольфрам	1	43	Т	59 716	6,4	36 894	27 840	0	0
Олово	1	124	тыс. т	802,496	50,5	164,117	208,19	0	0
Бокситы	3	1	тыс. т	12 079	1,1	2174	-	0	0
Сурьма	2	2	Т	44 020	27,1	43 605	8637	0	0
Редкие металлы									
Цирконий	3	2	тыс. т	1039,3	16,9	1162	7664,7	18,5	100
· •	1		Pacce	еянные элеме	нты				
Галлий		9	Т	74 522,1	71,8	9962,8	-	727,6	88
Индий		4	Т	-	-	619	1,6	0,0	0
Рубидий (оксид рубидия)		10	Т	273 824,1	57	43 007,4	-	2616,0	97,9
Цезий (оксид цезия)		10	Т	1543,3	2,1	2629,9	-	8,4	45,4
Рений	3	1	Т	-	-	127,5	73,3	0	0
Селен		14	Т	30,9	0,1	31 565,5	1166,2	31,3	1,7
Скандий	1	1	Т	9736	90,1	4021	3912	0	0
Теллур		14	Т		9,5	12 970,6	489,1		3,7
Редкоземельные металлы									
Редкоземель- ные металлы	(3)	11	тыс. т	14 708,8	71,4	6988,9	6708,7	111,6	100
Благородные металлы									
Золото	2	591	КГ	1 109 126	12,6	592 312	379 442	32 765	7,4
Серебро	2	44	Т	14 666,6	25,3	12 786,3	3635,3	119,2	5,2
Платиноиды	1	35	КГ	8 977 758	78,6	$3\ 568\ 662$	856 245	141 134	96,1

\* См. в таблице 2; \*\* По состоянию на 01.01.2022.



# Табл. 2. Виды и доля запасов неметаллических и горючих полезных ископаемых Арктической зоны России в объёмах запасов и добычи по РФ (данные ФГБУ «ВСЕГЕИ», по состоянию на 01.01.2020 г.) [10]

Table 2. Types and proportions of the non-metallic mineral reserves and fossil fuels in the Arctic zone of Russia in the total national reserves and production (data of FSBI "VSEGEI", as of 01.01.2020) [10]

Группа и вид полезного ископае- мого	Группа значимых полезных ископае- мых*	Количест- во место- рождений полезных ископае- мых Нем	Еди- ницы измере- ния	Запасы (А+В+С <sub>1</sub> , для УВС – А+В <sub>1</sub> +С <sub>1</sub> )	% от запасов по РФ	С <sub>2</sub> ; для УВС – В <sub>2</sub> +С <sub>2</sub>	Заба- лан- совые запасы	Добыча за пред- шествую- щий год	% от добычи по РФ
Апатито-	1	14	тыс. т	479 133	67.6	103 105	46 280	5834	99.2
вые руды									
Алмазы	2	24	млн карат	259,2	29,0	18,84	48,67	17,24	37,6
Алмазы импактные		2	млн карат	100 357,3	100	167 627,3	43 090	0	0
			Горючи	е полезные и	скопаемь	іе			
Жидкие и газообразные горючие									
Нефть	2	282	млн т	3879,47	20,8	4201,377		69,271	13,2
Газы горючие (свободный газ)	1	204	млрд м <sup>3</sup>	37 417,49	76,3	16 898,31		607,517	87,4
Газы горючие (растворён- ный газ)	1	264	млрд м <sup>3</sup>	390,67	25,2	645,663		9,164	1,3
Конденсат		157	млн т	1352,2	58	1303,034		20,598	71,4
Твёрдые горючие									
Уголь	1	45	млн т	7162,71	3,6	2062,96	5735,7	8,147	2
Вольфрам	1	43	Т	59 716	6,4	36 894	27 840	0	0

\* 1 – полезные ископаемые, запасы которых при любых сценариях развития экономики удовлетворят необходимые потребности до 2035 г. и в последующий период; 2 – полезные ископаемые, достигнутые уровни добычи которых недостаточно обеспечены запасами разрабатываемых месторождений на период до 2035 г.; 3 – дефицитные полезные ископаемые, внутреннее потребление которых в значительной степени обеспечивается вынужденным импортом и (или) складированными запасами.

транспортировке ТПИ и УВС, а также инфраструктуры, обеспечивающей их деятельность: транспорт, энергетика, связь, кадры и технологии.

3. Выделение, в контурах планируемых МСЦ, опорных площадей, характеризующихся сопряжённым расположением действующих и проектируемых технологических центров добычи и переработки ТПИ и УВС, с учётом близости их к транспортным системам.

4. Действующий лицензионный фонд недр на ТПИ и УВС в контурах планируемого МСЦ, с учётом территориальной близости лицензионных участков к существующим ресурсным и инфраструктурным объектам.

5. Прогнозно-поисковый задел площадей, перспективных на выявление новых объектов



Руды и металлы № 4/2022, с. 32–53 / Ores and metals № 4/2022, р. 32–53 DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10021



© Кременецкий А. А., Спиридонов И. Г., Пилицын А. Г., Веремеева Л. И., 2022 © Kremenetsky A. A., Spiridonov I. G., Pilitsyn A. G., Veremeeva L. I., 2022





Рис. 2. Лицензионные участки (*a*) и динамика добычи углеводородного сырья на шельфе Арктической зоны РФ (*b*); сейсмо-геологический профиль через Евразийский и Амеразийский бассейны СЛО (с); локальные антиформы в осадочном чехле (*d*) и технология прогноза площади, перспективной на УВС в котловине Подводников (*e–g*)

лицензионные участки: I – ОАО «НК Роснефть», 2 – ОАО «Газпром»; 3 – граница 200-мильной зоны РФ; 4 – площадь континентального шельфа РФ, перспективная на УВС за пределами 200-мильной зоны; 5 – отрицательные аномалии гравитационного поля; 6 – положительные аномалии магнитного поля; 7 – положительные морфоструктуры рельефа дна; 8 – площадь, перспективная на УВС

of the bottom topography; 8 - HC-prospective area

Fig.2. (a) Licensed areas, (b) HC production dynamics on the Russian Arctic shelf, (c) seismic-geologic traverse across the Eurasian and Amerasian basins of the Arctic

Ocean, (d) local antiforms within the sedimentary cover, (e-g) prediction technique of the HC-prospective area located in the Podvodnikov (Submariners') Basin: Licensed areas: I – OAO NK Rosneft, 2 – OAO Gazprom; 3 – border of the Russian 200-mile zone; 4 – the HC-prospective continental shelf area of the Russian Federation outside the 200-mile zone; 5 – negative gravity anomalies; 6 – positive magnetic anomalies; 7 – positive morphostructures



Руды и металлы № 4/2022, c. 32–53 / Ores and metals № 4/2022, p. 32–53 DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10021

ТПИ и УВС, а также поисковых участков на флангах и глубоких горизонтах разрабатываемых и планируемых к освоению месторождений ТПИ.

6. Оценка ожидаемой экономической рентабельности и сроков функционирования МСЦ с учётом неизбежных рисков (например, неподтверждение прогнозных запасов и ресурсов ТПИ и УВС) и дифференцированный расчёт долей затрат частных компаний и государства на геологоразведочные работы, разработку месторождений и обустройство инфраструктуры, включая строительство дорог, путепроводов и обеспечение перевозок по Северному морскому пути.

Опираясь на перечисленные выше критерии и исключая ведомственную разобщённость известных предложений [1-4, 9] организации МСЦ по видовому признаку полезных ископаемых (либо ТПИ, либо УВС), предлагаем к обсуждению проект создания в АЗРФ минерально-сырьевых кластеров (МСК), в которых пространственно сопряжены месторождения ТПИ и УВС, локализованные на континентальной окраине и на шельфе. Кластерный принцип организации подобных масштабных проектов позволит системно скоординировать три ключевых взаимосвязанных уровня «кластерной пирамиды»: первый - лидирующие структурообразующие элементы, в данном случае, уже существующие или планируемые крупные и особо крупные месторождения высоколиквидного сырья с соответствующими предприятиями по добыче и переработке ТПИ и УВС; второй уровень - сеть средних и мелких месторождений, в том числе малорентабельного стратегического редкометалльного сырья [5], а также перспективные площади для выявления новых объектов ТПИ и УВС и, наконец, третий уровень - человеческие ресурсы, инфраструктура, технологии, бизнес-климат и реализация конечной продукции. Такие кластеры, обладая внутренним балансом самоорганизации, когда на вызовы или кризис одного из уровней незамедлительно реагируют остальные, позволяют поддерживать и сохранять пропорциональность всего кластера в целом, обеспечивая тем самым

его экономическую эффективность и конкурентоспособность.

В АЗРФ предлагается организовать четыре минерально-сырьевых кластера: Мурманско-Баренцевоморский, Ямало-Норильский, Ленско-Лаптевоморский и Северо-Восточно-Чукотский (см. рис. 1, *с*). Создание предлагаемых МСЦ позволит:

1. Обеспечить на условиях частно-государственного партнёрства сбалансированное освоение и развитие более 40 % территории АЗРФ с различным географическим положением, климатом и геологической изученностью, и, как следствие, с максимальным конечным суммарным социально-экономическим эффектом.

2. Вовлечь в совместное освоение наряду с крупными и особо крупными месторождениями средние, мелкие и забалансовые объекты, нерентабельные сегодня в условиях Крайнего Севера.

3. Активизировать геологоразведочные работы различных стадий на труднодоступных и перекрытых территориях.

4. Сформулировать вызовы в области научных, технологических, инженерно-технических и других направлений, нацеленные на снижение сроков и затрат на поиски, добычу и переработку полезных ископаемых, а также повышение качества и стоимости конечной продукции.

Ниже кратко рассмотрим специфику и приоритеты ресурсной базы ТПИ и УВС в планируемых минерально-сырьевых кластерах АЗРФ:

Мурманско-Баренцевоморский кластер. На окраине континента месторождения-лидеры ТПИ сосредоточены в Мурманской и Архангельской областях: Ловозёрское месторождение ( $\text{ZrO}_2 - 17$  % запасов и 100 % запасов добычи по РФ; РЗМ – 15,6 % запасов и 100 % добычи по РФ; ТіО<sub>2</sub> – ежегодная попутная добыча более 400 тыс. т); апатитовые руды – 67 % запасов по РФ и 100 % по АЗРФ; нефелиновые руды – 80 % и стронций – 99,7 % запасов по РФ. Медно-никелевые месторождения Имандра-Варзугской металлогенической зоны (12,9 % запасов и более 12 % добычи ни-



келя по России). Ковдорское и Оленегорское месторождения (железные руды – 99,7 % запасов по АЗРФ). Коренные месторождения алмазов (Трубка им. Карпинского 2, Трубка Архангельская, Трубка им. Гриба и др.) – 20,4 % от суммарных запасов и 21,2 % от добычи по РФ на начало 2019 г.

На острове Новая Земля – свинцово-цинковое месторождение Павловское (52 % запасов по АЗРФ).

На шельфе Баренцева моря разведываются пять месторождений нефти, два месторождения свободного газа и девять месторождений конденсата (см. рис. 2, *a*).

**Ямало-Норильский кластер.** На окраине континента безусловным лидером среди ТПИ являются медно-никелевые месторождения (Октябрьское, Талнахское и др.) – запасы никеля более 70 %, меди около 40 % по РФ, с попутной добычей платиноидов (99,7 % от добычи по АЗРФ и 95,8 % добычи по РФ), серебра (месторождение Октябрьское – 55,2 % от добычи по АЗРФ) и кобальта (более 50 % запасов и более 80 % добычи по РФ). Наряду с этим в многочисленных рудных месторождениях сосредоточено 35,7 % запасов золота и 29 % запасов хрома по АЗРФ.

На окраине континента расположены три уникальных нефтяных месторождения (Русское, Восточно-Мессояхское и Новопортовское) и 21 крупное месторождение с 65 % запасов и 50 % добычи нефти в целом по АЗРФ. Добыча конденсата – 97 % от добычи по АЗРФ и 69 % по РФ.

На шельфе Карского моря разведывается крупное нефтегазовое месторождение Победа; разрабатываются три крупных и разведываются ещё 11 газовых месторождений с запасами свободного газа 75 % и добычей 96 % в целом по АЗРФ (см. рис. 2, *a*). Открыты газовое (Нярмейское) и газоконденсатное (им. Динкова) месторождения; на четырёх месторождениях запасы конденсата более 50 млн т.

Ленско-Лаптевоморский кластер. На окраине континента ключевыми лидерами среди ТПИ являются алмазы, редкоземельные металлы, скандий, а также сурьма (27 % по

АЗРФ) и золото (17 % по АЗРФ). Здесь официально зарегистрировано 22 россыпных месторождения алмазов в Анабарском и Приленском районах и одно коренное Верхне-Мунское в Муно-Тюнганском районе, в которых сосредоточено 6,2 % запасов и добывается 16,4 % (в 2019 г.) алмазов по РФ. Планируются также к освоению залежи импактных алмазов в Таймырском Долгано-Ненецком районе (Попигайский метеоритный кратер) с крупными (миллионы карат) запасами сверхабразивного алмаз-лонсдейлитового сырья. Уникальное по запасам Томторское редкометалльное месторождение (Оленёкский улус в 400 км от побережья моря Лаптевых) с аномально высокими концентрациями (вес. %) редких и редкоземельных металлов, в настоящее время разведано только на одном участке (Буранный, более 30 млн т); начало добычи планируется в 2027 г. с перспективой увеличения запасов более чем в три раза.

На шельфе моря Лаптевых в настоящее время Государственным балансом запасов учтено одно крупное разведываемое месторождение нефти (Центрально-Ольгинское) с запасами категории  $C_1$  и  $C_2 - 53,4$  млн т (см. рис. 2, *a*).

Северо-Восточно-Чукотский кластер. На окраине континента явным лидером среди ТПИ являются золоторудные месторождения; более 400 объектов учтены Государственным балансом запасов с 50 %-ной долей запасов золота по АЗРФ; запасы серебра – 20 % по АЗРФ. Наиболее крупные разрабатываемые месторождения – Майское и Купол, разведываемые – Кекура и Песчанка. Медно-порфировое месторождение Песчанка является также особо крупным по запасам меди (16 % запасов по АЗРФ) и молибдена (70 % запасов по АЗРФ). В 16 коренных месторождениях олова (наиболее крупные по запасам - касситерит-кварцевые Крутой штокверк и Первоначальный штокверк) запасы олова составляют 32 % от запасов по РФ.

На шельфе Восточно-Сибирского и Чукотского морей бурение не проводилось; продолжаются прогнозно-поисковые работы (см. рис. 2, a).



Руды и металлы № 4/2022, с. 32–53 / Ores and metals № 4/2022, р. 32–53 DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10021



© Кременецкий А. А., Спиридонов И. Г., Пилицын А. Г., Веремеева Л. И., 2022 © Kremenetsky A. A., Spiridonov I. G., Pilitsyn A. G., Veremeeva L. I., 2022



### Рис. 3. Размещение золоторудных и меднопорфировых месторождений в металлогенических поясах, зонах тектоно-магматической активизации (*a*) и в вулкано-плутонических поясах Северо-Востока РФ (*b*) (по А. В. Волкову, 2015 и И. Ф. Мигачёву и др., 2016); прогнозно-геохимические карты перспективных зон и участков на золоторудное (*c*) и медно-порфировое (*d*) оруденение:

1-7 – структурно-тектонические блоки: 1, 2 – Охотско-Чукотский вулканический пояс (1) и его магматогенные поднятия (2), 3 – палеозойско-мезозойские терригенные отложения, 4 – террейны с континентальной корой, 5 – выступы AR-PR фундамента, 6 – Южно-Анюйская сутура, 7 – складчатые системы; 8 – зоны тектоно-магматической активизации; вулкано-плутонические пояса: 9 – перспективные на медно-порфировое оруденение, 10 – потенциально перспективные, 11 – с неясными перспективами и неперспективные; 12 – офиолитовые комплексы; 13 – глубинные разломы; 14 – перспективные золоторудные зоны по геохимическим данным; 15 – перспективная зона на медно-порфировое оруденение по геохимическим данным; 16 – перспективные участки с прогнозными ресурсами на золото-сульфидное и золото-серебряное оруденение; 17 – перспективные участки с прогнозными ресурсами на медно-порфировое оруденение; 18 – золоторудные месторождения различных типов: а – серебряно-золотого адуляр-кварцевого, b – золото-малосульфидного, c – золото-черносланцевого, d – золото-кварцевого, e – медно-золото-молибден-порфирового, f – золото-полиметаллического, g – золото-сурьма-мышьякового, h – золото-сурьма-березитового; 19 – месторождения и наиболее крупные проявления: а – медно-порфировые и молибден-меднопорфировые, b – молибден-порфировые, c – медно-скарновые (скарновые меднопорфировые); 20 – проявления золота и меди

1-7 – Major tectonic units: Okhotsk-Chukotka volcanic belt (1) and its magmatogenic uplifts (2), 3 – Paleozoic-Mesozoic terrigenous sequences, 4 – terranes with continental crust, 5 – AR-PR basement ledges, 6 – South Anyui suture, 7 – folded systems; 8 – zones of tectonic-magmatic activation; volcanic-plutonic belts: 9 – prospective for Cu-porphyries, 10 – potentially prospective, 11 – of indefinite prospects or unpromising; 12 – ophiolite complexes; 13 – deep faults; 14 – geochemically prospective gold ore zones; 15 – geochemically prospective zone for porphyry Cu mineralization; 16 – prospective areas with predicted reserves for Au-sulfide and Au-Ag; 17 – prospective areas with predicted reserves for various styles: *a* – silver-gold adularia-quartz, *b* – low sulfide gold, *c* – black shale-hosted, *d* – gold-quartz; *e* – Cu-Au-Mo porphyries, *f* – gold-polymetallic, *g* – gold-antimony-arsenic, *h* – gold-antimony beresite; 19 – deposits and major occurrences: *a* – Cu- and Moporphyries, *b* – Mo-porphyries, *c* – Cu skarn (Cu-porphyry skarn); 20 – Au and Cu mineral occurrences

Обоснование прогнозных площадей, перспективных на золоторудное и меднопорфировое оруденение в Северо-Восточно-Чукотском кластере АЗРФ.

Площади, перспективные на золотое оруденение, здесь, как известно, характеризуются широким развитием месторождений золотосеребряного адуляр-кварцевого и золото-малосульфидно-кварцевого рудноформационных типов; в меньшей степени распространены золото-черносланцевые, золото-кварцевые и золото-сурьмяные. Пространственный анализ расположения золоторудных месторождений показывает их приуроченность к границам структурно-тектонических блоков, а также меловому Охотско-Чукотскому вулканическому поясу (ОЧВП). Триас-юрская тектоно-магматическая активизация (ТМА) западной части складчатой периферии Омолонского массива обусловила формирование глубинных разломов и зон проницаемости, вдоль которых локализуются месторождения золото-ма-

Fig. 3. Location of bedrock Au and porphyry Cu deposits: (*a*) in the metallogenic belts, zones of tectonic-magmatic activation, and (*b*) in volcano-plutonic belts of the Russian North-East (A. V. Volkov, 2015; I. F. Migachev et al., 2016); prognostic geochemical maps with (*c*) prospective zones and areas for bedrock Au deposits and (*d*) for porphyry Cu deposits:



Руды и металлы № 4/2022, с. 32–53 / Ores and metals № 4/2022, р. 32–53 DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10021

лосульфидно-кварцевого типа триас-юрского возраста. Меловая ТМА в юго-восточной части территории, связанная с процессом формирования ОЧВП, сопровождалась образованием глубинных разломов и зон проницаемости с локализацией в них месторождений золото-серебряного адуляр-кварцевого типа ( $K_1$ – $K_2$ ). Обе зоны ТМА имеют протяжённость в сотни, а ширину – в десятки километров и трассируются цепочками меловых интрузивно-купольных структур, обособленными полями даек, участками складчатости и золоторудными месторождениями различных типов (рис. 3, *a*).

Составленная авторами на эту территорию геохимическая карта и рассчитанные (по данным факторного анализа) геохимические параметры в потоках рассеяния золото-серебряного адуляр-кварцевого и золото-малосульфидно-кварцевого типов, позволили выделить соответствующие им ассоциации элементов: для первого типа – Au, Ag, As, Cu, Zn, Pb, Mo, Sn, Bi, Hg, для второго – Au, As, Sb, W (Hg, Cu, Ag). При этом установлена минимально необходимая ассоциация элементов для оконтуривания преобладающего типа золоторудных объектов – мультипликативный показатель Au × Ag × As, проявляющий контрастный характер на территории Северо-Востока (см. рис. 3, b). В результате локализована региональная геохимическая зона северо-восточного простирания (протяжённостью 1500 км и шириной до 100 км), а также серия секущих её параллельных зон северо-западного простирания (протяжённостью до 500 км и шириной до 80 км), пространственно сопряжённых с зонами ТМА (см. рис. 3, с). В пределах выделенных аномальных геохимических зон локализованы крупные золоторудные месторождения – Купол, Майское, Кекура и др.

Используя аналогию с известными месторождениями, в пределах вышеназванных зон с помощью показателя максимальной интенсивности аномальных геохимических полей (Au × Ag × As) выделены 13 перспективных участков, рекомендуемых для проведения поисковых работ: десять участков на золотосеребряный адуляр-кварцевый рудно-формационный тип и три участка – на золото-малосульфидно-кварцевый (см. рис. 3, b) – со значительными прогнозными ресурсами золота (до 30–50 % от уже известных в Чукотском регионе).

Площади, перспективные на медно-порфировое оруденение, связаны с субмеридиональной системой разновозрастных вулкано-плутонических поясов (ВПП), сосредоточенных на востоке АЗРФ (см. рис. 3, *b*). Одним из наиболее перспективных является Олойский ВПП, в юго-восточной части которого рудные поля локализованы вдоль Баимского глубинного субмеридионального разлома, определяющего контуры одноимённой металлогенической зоны ((80 × 6)–18 км) и размещение золотосодержащих медно-порфировых, молибден-медно-порфировых и золото-серебряных эпитермальных месторождений и проявлений. Локализованное в этой зоне Au-Mo-Cu-порфировое месторождение Песчанка (утверждённые запасы Cu – 6,68 млн т, Mo – 177,35 тыс. т, Au – 378,11 т и Ag – 3497 т) контролируется размещением мезозойских интрузивов многофазного Эгдэгкычского плутона. Его главная (первая) фаза представлена пироксенитами, габбро (в том числе субщелочными) и габбро-диоритами; вторая порфировая фаза – кварцевые монцонит-порфиры; третья, завершающая, – сиениты, субщелочные граниты и граносиениты. Рудные тела контролируются зоной Песчанковского разлома и положением тел кварцевых монцонит-порфиров. Гомодромность формирования описываемого плутона указывает на решающую роль базит-гипербазитов первой главной фазы в качестве источника ресурса Cu и Fe, а последующих фаз – ресурса Мо, Аи и Аg и соответствующих условий формирования Au-Mo-Cu-порфировой рудно-магматической системы (РМС). Пространственная близость Эгдэгкычского и подобного ему плутонов к Алучинскому базит-гипербазитовому массиву, а также к Громадненско-Вургумеевскому [8] и другим нижне-среднеюрским массивам офиолитовой ассоциации (U-Pb возраст цирконов из гипербазитов – 180–162 млн лет, по С. А. Сергееву и др., ВСЕГЕИ, 2015 г.), позволяет рассматри-



вать последние также в качестве возможного источника ресурса Си при формировании (в соответствующих условиях) медно-порфировых РМС на данной территории.

Выполненное авторами геолого-геохимическое районирование Баимской металлогенической зоны и сопряжённой с ней территории к востоку (см. рис. 3, d) позволило локализовать региональную зону повышенных содержаний Сu (до 100 г/т) шириной 20–40 км и протяжённостью до 340 км, в пределах которой фиксируется серия аномальных геохимических полей с содержанием Cu до 1000 г/т (см. рис. 3, d). В пределах этой зоны выделены четыре участка, перспективных на медно-порфировое оруденение (см. рис. 3, d), аналогичных по условиям формирования месторождению Песчанка, со значительными прогнозными ресурсами меди и золота.

Прогноз и локализация площадей нефтегазоносности за пределами 200-мильной зоны шельфа Ленско-Лаптевоморского и Северо-Восточно-Чукотского кластеров (см. рис. 2, с) рассматривается на примере глубоководной котловины Подводников в Амеразийском бассейне Северного Ледовитого океана (СЛО). Пространственно эта котловина входит в состав площади расширения границы континентального шельфа России, располагаясь между хребтом Ломоносова и поднятием Менделеева (см. рис. 2, с); глубина СЛО здесь достигает 2700-2800 км, мощность осадочного чехла – до 6000 м. По данным сейсмопрофилирования, под осадочным чехлом котловины фиксируется ось рифтогенного растяжения, а в строении чехла – протяжённые, нередко с угловыми несогласиями, слоистые толщи, в том числе, и что особенно важно, с крупными локальными сводовыми структурами (см. рис. 2, *d*). Последние фиксируются в рельефе дна локальными батиметрическими поднятиями и, как известно, могут служить «ловушками» для глубинных абиогенных потоков углеводородов. На батиметрической карте котловины Подводников в южной её части, параллельной хребту Ломоносова, отчётливо фиксируется веерообразная серия узких локальных поднятий и прогибов (см. рис. 2, f),

прослеживающихся в соседнюю депрессию, косвенно указывая на имевшее место растяжение дна котловины между хребтом Ломоносова и поднятием Менделеева. Более отчётливо этот «веер растяжения» проявлен чередованием узких линейных гравиминимумов и гравимаксимумов, параллельных хребту Ломоносова в поле неоднородностей гравитационного поля. На карте магнитного поля в пределах «веера растяжения» с одной из его зон (между 160° и 170° в. д.) ясно коррелируется линейная серия локальных магнитных максимумов, свидетельствуя о высокой степени вероятности проявления здесь мантийного магматизма. При этом особое внимание заслуживает изолированный локальный магнитный максимум в центре котловины Подводников (пересечение 160° и 170° в. д и 130° и 140° с. ш.). Последний имеет близкие параметры с таковыми в районе поднятия Альфа и к северу от Чукотского плато и интерпретируется как центры мантийного магматизма на дне СЛО, обеспечивающие массовые излияния базальтовых потоков в ходе внутриплитного мезозойского рифтинга и сопровождаемые притоками глубинных абиогенных углеводородов. Способ локализации геохимических аномалий УВ в рыхлых отложениях дна котловины показан на рис. 2, е.

На основании вышеизложенного предложен комплекс прогнозных критериев прогноза и локализации нефтегазовых залежей в осадочном чехле котловины Подводников: сочетание линейных зон гравиминимумов и повышенных значений магнитного поля, фиксирующих зоны растяжения дна с синхронным мантийным магматизмом; области локальных батиметрических поднятий как признаки надсводовых структур в осадочном чехле. Рис. 2, *g* иллюстрирует пример прогноза нефтегазовых залежей в осадочном чехле котловины Подводников с ранжированием их потенциальной перспективности.

Суммарные прогнозные ресурсы УВС в Амеразийском бассейне СЛО (за пределами 200-мильной зоны шельфа) оцениваются в 4,9 млрд т усл. топлива (рис. 4, *a*). Однако апробация подобных прогнозов и тем более



Руды и металлы № 4/2022, с. 32–53 / Ores and metals № 4/2022, р. 32–53 DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10021



© Кременецкий А. А., Спиридонов И. Г., Пилицын А. Г., Веремеева Л. И., 2022 © Kremenetsky A. A., Spiridonov I. G., Pilitsyn A. G., Veremeeva L. I., 2022 Руды и металлы № 4/2022, с. 32–53 / Ores and metals № 4/2022, р. 32–53 DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10021





1 – площадь континентального шельфа РФ за пределами 200-мильной зоны; 2 – внешняя граница континентального шельфа по Заявке РФ в Комиссию ООН, 2015 г.; главные морфоструктурные элементы: 3 – континентальный шельф, 4 – склоны бассейнов, 5 – относительно выровненное дно котловин Нансена и Амундсена, 6 – хребет Гаккеля, 7 – рифтовая долина

I – the area of the continental shelf of the Russian Federation outside the 200-mile zone; 2 – the outer limit of the continental shelf according to the Application of the Russian Federation to the UN Commission, 2015; key morphostructural elements: 3 – continental shelf, 4 – basin slopes, 5 – relatively leveled bottom of the Nansen and Amundsen basins, 6 – the Gakkel Ridge, 7 – a rift valley

Fig. 4. (*a*) The outer expansion limit of the continental shelf of the Russian Federation and predicted HC-prospective area located beyond the 200-mile zone in the Amerasian Basin, (*b*) the continuity of the distribution of the Mesozoic volcanogenic-terrigenous plate cover in the Amerasian Basin, and (*c*) a morphostructural zoning scheme of the Eurasian Basin in the Arctic Ocean:



Руды и металлы № 4/2022, c. 32–53 / Ores and metals № 4/2022, p. 32–53 DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10021

освоение ресурсного потенциала УВС за пределами 200-мильной зоны шельфа России возможны при двух условиях: обосновании непрерывности продолжения континентального шельфа в глубоководную часть Амеразийского и Евразийских бассейнов СЛО (Заявки РФ в Комиссию ООН в 2001 и 2015 гг.) и принятия этой Комиссией новой границы континентального шельфа Российской Арктики (см. рис. 4, *а*). Работы в этом направлении под руководством Роснедра Минприроды РФ проводятся коллективами ФГБУ «ВНИИОкеангеология», ВСЕГЕИ и ИМГРЭ, ООО «МОР-ГЕОНАЦ», МГУ и другими организациями. При этом одна из ключевых задач – доказательство континентальной природы дна глубоководных поднятий и котловин Амеразийского и Евразийского бассейнов с непрерывностью их перехода в структуры мелководного шельфа и прибрежной суши Лаптевоморско-Восточно-Сибирской континентальной окраины. Ранее выполненная нами [6] реконструкция эволюции фациальных условий формирования и распространения терригенных и вулканогенных образований плитного чехла Циркумполярной Арктики в триасе, юре и мелу позволяет заключить, что отличительной особенностью мелового периода является установление практически на всей площади Амеразийского бассейна мелководно-морского режима осадконакопления (см. рис. 4, b), сопровождаемого на границе нижнего и верхнего мела площадным проявлением траппового вулканизма HALIP (Большая Магматическая провинция Высокой Арктики). Повсеместный и непрерывный характер развития меловых вулканогенно-терригенных образований в системе: прибрежная суша – шельф – архипелаги островов – глубоководные котловины и поднятия СЛО – позволяет рассматривать меловой плитный чехол в пределах российского сектора Арктики в качестве одного из ключевых критериев обоснования Заявки РФ 2001 г. по расширению внешней границы континентального шельфа Амеразийского бассейна за пределами 200-мильной зоны.

Для усиления позиции России в плане доказательства континентальной, а не океанической природы дна Евразийского бассейна и хребта Гаккеля (Заявка РФ, 2015 г.), выполненные авторами [7] геолого-морфоструктурные исследования этих структур, позволили обосновать следующие положения:

1. Формирование позднемезозойских морских терригенных толщ в Евразийском бассейне (мощностью до 1–7 км меловых отложений в котловине бассейна Амундсена) обусловлено субширотным растяжением (рассеянным спредингом) утонённого континентального фундамента и синхронно с формированием Баренцево-Карского и Амеразийского мезозойских бассейнов СЛО.

2. Геохимическая реконструкция геодинамических обстановок формирования кайнозойских базальтов хребта Гаккеля свидетельствует о несоответствии их составам базальтов N-MORB океанических хребтов Центральной и Северной Атлантики. Составы базальтов Западного и Восточного сегментов хребта Гаккеля близки к составам базальтов океанических плато и океанических островов, формирование которых связано с плавлением верхней деплетированной мантии и обогащённого глубинного источника близкого по составу к OIB (обстановка переходного типа «океан-континент»). Состав базальтов южного сегмента хребта Гаккеля близок к составу внутриплитных базальтов с существенным вкладом обогащённых источников и материала континентальной коры.

3. Морфоструктурный анализ рельефа дна южной части Евразийского бассейна и хребта Гаккеля (см. рис. 4, *с*), перекрытых мощным осадочным чехлом, позволил [7] обосновать пролонгацию их на шельф моря Лаптевых, фиксируемую следующими признаками:

• непрерывностью южных склонов бассейна с уменьшением крутизны их наклона от края к центру ((3–6)–(0,1–0,5°)) и увеличением их ширины от 50 км (в западной и восточной частях) до 250 км (в южном замыкании бассейна) (см. рис. 4, c);

• унаследовательностью поверхности акустического фундамента рельефом дна хребта Гаккеля и рифтовой долины (рис. 5, *a*-*d*);

• прослеживанием хребта Гаккеля в область сопряжения его с шельфом моря Лаптевых; фиксируется увеличением (в три раза)





I-поверхность рельефа дна; 2-поверхность акустического фундамента; 3-опорные точки

Fig. 5. (a) Position of seismic-bathymetric traverses within the Eurasian Basin – Laptev Sea shelf junction, (b-d) topography of the surface and acoustic basement of the Gakkel Ridge and correlation plots of their reference points; (e) graph of the anisotropy variations (length vs. width) of the Gakkel Ridge rift valley within the zone of its transition into the sediments-covered area:

I – sea bottom topography; 2 – acoustic basement surface; 3 – reference points

на подводной континентальной окраине (с):



Руды и металлы № 4/2022, с. 32–53 / Ores and metals № 4/2022, р. 32–53 DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10021

# ческие сегменты, b – амагматические сегменты; 3 – предполагаемое продолжение подводного хребта, перекрытого мощным осадочным чехлом; 4 – вулканический хребет переходного типа «океан-континент» (a) и бассейн (b); 5 – Трог Лена; 6 – сбросо-сдвиговое тектоническое нарушение; ПКС – подводный континентальный склон

гевых (*a*) и идентификация их морфоструктурных элементов (*b*) с эталонной схемой положения подводного хребта

Рис. 6. Морфоструктурная схема Евразийского бассейна и хребта Гаккеля в зоне сочленения с шельфом моря Лап-

*I –* глубоководная подводная окраина бассейна: *a* – Амеразийский бассейн, *b* – Евразийский бассейн; *2* – подводный хребет: *a* – вулкани-

Fig. 6. (a) Morphostructural scheme of the Eurasian Basin and the Gakkel Ridge - Laptev Sea shelf junction and (b) their morphostructural elements vs. (c) the reference scheme of the submarine ridge position within the submarine continental margin:

l - deep-sea submarine margin of the basin: a - Amerasian Basin, b - Eurasian Basin; 2 - underwater ridge: <math>a - volcanic segments, b - non-magmaticsegments; 3 - supposed continuation of the submarine ridge overlain by a thick sedimentary cover; 4 - volcanic ridge of the transitional oceancontinent type (a) and (b) bassin; 5- Lena Trough; 6- fault-and-shear tectonic disturbance; IIKC (UCS) – underwater continental slope





ширины рифтовой долины, уменьшением (в пять раз) её глубины и, соответственно, ростом анизотропии этих размеров (см. рис. 5, *e*).

4. Установлена идентичность основных морфоструктур Евразийского бассейна и хребта Гаккеля (рис. 6, a, b) таковым типовой эталонной структуры подводного хребта, локализованного на внешнем крае подводной окраины материка (см. рис. 6, c).

Таким образом, формирование позднемезозойско-кайнозойского осадочного чехла Евразийского бассейна и кайнозойских базальтов хребта Гаккеля на изначально сильно утонённом (до 10–15 км) континентальном фундаменте, непрерывность перехода рифтовой долины хребта Гаккеля на шельф и материковую окраину Сибирского континента, отличие состава базальтов всех сегментов хребта Гаккеля от N-MORB базальтов океанических хребтов, а также отсутствие зон субдукции и трансформных разломов, ультрамедленная скорость спрединга (6–13 мм/год), наличие протяжённых (до 300 км) амагматических сегментов и большая (до 5-7 км) мощность мелового осадочного чехла Евразийского бассейна, свидетельствуют в пользу эпиконтинентальной рифтогенной природы Евразийского бассейна и хребта Гаккеля. Это, а также непрерывность всех сегментов хребта Гаккеля в системе: край континентального шельфа – подводный континентальный склон – внешний край подводной окраины материка - свидетельствует о принадлежности хребта Гаккеля, наряду с хребтом Ломоносова и поднятием Менделеева, к подводным хребтам Арктического бассейна и может служить одним из дополнительных критериев при обосновании права России на расширение внешней границы континентального шельфа в Амеразийском и Евразийском бассейнах СЛО и способствовать увеличению ресурсного потенциала УВС в глубоководной части АЗРФ.

### Список литературы

- Белов С. В., Скрипниченко В. А. Особенности пространственного развития производственных комплексов минерально-сырьевой базы твёрдых полезных ископаемых в Российской Арктике // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 5 (119), Ч. 4. – С. 136–141.
- Григорьев М. Н., Светлова Ж., Соколова Е. Д. Локализация минерально-сырьевых центров Арктической зоны Российской Федерации // Арктические ведомости. – 2021. – № 1 (31). – С. 44–53.
- Земнухова Е. А. Развитие коммуникаций как основа формирования арктических минерально-сырьевых центров // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2021. – Т. 11, № 4-1. – С. 7–17.
- Иванова А. М., Смирнов А. Н., Каминский В. Д., Гопчак В. Г., Крейтер Е. Н., Пашковская Е. А., Попова Е. С. Минерагения континентальной окраины и шельфа Арктической зоны России // 70 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане: сборник научных трудов. – СПб. : ВНИИОкеангеология, 2018. – С. 342–350.

- Кременецкий А. А., Архипова Н. А. Вклад редких металлов в повышение инвестиционной привлекательности центров экономического развития России // Разведка и охрана недр. – 2011. – № 6. – С. 3–9.
- Кременецкий А. А., Веремеева Л. И. Мезозойский плитный чехол Циркумполярной Арктики: строение, состав, условия формирования, непрерывность // Разведка и охрана недр. – 2021. – № 10. – С. 20–32.
- Кременецкий А. А., Глумов И. Ф., Ветрин В. Р., Пилицын А. Г., Полякова Т. Н. Эпиконтинентальная природа Евразийского бассейна и хребта Гаккеля в Арктическом бассейне: геологогеохимические и морфоструктурные особенности // Разведка и охрана недр. – 2022. – № 11. – С. 8–21.
- Кременецкий А. А., Спиридонов И. Г., Граменицкая П. Н. Офиолиты Восточной Арктики: геотектонические парадигмы и геохимическая реконструкция геодинамических обстановок // Разведка и охрана недр. – 2021. – № 6. – С. 14–28.



- Липина С. А., Череповицын А. Е., Бочарова Л. К. Предпосылки формирования минерально-сырьевых центров в опорных зонах развития в Арктической зоне Российской Федерации // Арктика и Север. – 2018. – № 33. – С. 29–39.
- Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Арктической зоны РФ на 15.03.2021 г. / ФГБУ «ВСЕГЕИ». 2021. 21 с.

### References

- Belov S. V., Skripnichenko V. A. Osobennosti prostranstvennogo razvitiya proizvodstvennykh kompleksov mineral'no-syr'evoi bazy tverdykh poleznykh iskopaemykh v Rossiiskoi Arktike [Features of spatial development of production complexes of the mineral resource base of solid minerals in the Russian Arctic], Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal [International Research Journal], 2022, V. 5 (119), No 4, pp. 136–141. (In Russ.).
- Grigor'ev M. N., Svetlova Zh., Sokolova E. D. Lokalizatsiya mineral'no-syr'evykh tsentrov Arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii [Localization of mineral resource centers of the Arctic zone of the Russian Federation], *Arkticheskie vedomosti* [*Arctic Vedomosti*], 2021, No 1 (31), pp. 44–53. (In Russ.).
- Zemnukhova E. A. Razvitie kommunikatsii kak osnova formirovaniya arkticheskikh mineral'nosyr'evykh tsentrov [Development of communications as a basis for the formation of Arctic mineral resource centers], *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [*Economy: yesterday, today, tomorrow*], 2021, V. 11, No 4-1, pp. 7–17. (In Russ.).
- 4. Ivanova A. M., Smirnov A. N., Kaminskii V. D., Gopchak V. G., Kreiter E. N., Pashkovskaya E. A., Popova E. S. Minerageniya kontinental'noi okrainy i shel'fa Arkticheskoi zony Rossii [Mineralogy of the continental margin and shelf of the Arctic zone of Russia], 70 let v Arktike, Antarktike i Mirovom okeane: sbornik nauchnykh trudov [70 years in the Arctic, Antarctica and the World Ocean: a collection of scientific papers], St. Petersburg, VNIIOkeangeologiya Publ., 2018, pp. 342–350.
- Kremenetskii A. A., Arkhipova N. A. Vklad redkikh metallov v povyshenie investitsionnoi privlekatel'nosti tsentrov ekonomicheskogo razvitiya Rossii [Contribution of rare metals to increasing the investment attractiveness of the centers of economic development of Russia], *Razvedka i okhrana nedr* [*Prospect and protection of mineral resources*], 2011, No 6, pp. 3–9. (In Russ.).

- Kremenetskii A. A., Veremeeva L. I. Mezozoiskii plitnyi chekhol Tsirkumpolyarnoi Arktiki: stroenie, sostav, usloviya formirovaniya, nepreryvnost' [Mesozoic plate cover of the Circumpolar Arctic: structure, composition, conditions of formation, continuity], *Razvedka i okhrana nedr* [*Prospect and protection of mineral resources*], 2021, No 10, pp. 20–32. (In Russ.).
- 7. Kremenetskii A. A., Glumov I. F., Vetrin V. R., Pilitsyn A. G., Polyakova T. N. Epikontinental'naya priroda Evraziiskogo basseina i khrebta Gakkelya v Arkticheskom basseine: geologo-geokhimicheskie i morfostrukturnye osobennosti [Epicontinental nature of the Eurasian basin and the Gakkel ridge in the Arctic basin: geological, geochemical and morphostructural features], *Razvedka i okhrana nedr [Prospect and protection of mineral resources*], 2022, No 11, pp. 8–21. (In Russ.).
- Kremenetskii A. A., Spiridonov I. G., Gramenitskaya P. N. Ofiolity Vostochnoi Arktiki: geotektonicheskie paradigmy i geokhimicheskaya rekonstruktsiya geodinamicheskikh obstanovok [Ophiolites of the Eastern Arctic: geotectonic paradigms and geochemical reconstruction of geodynamic environments], *Razvedka i okhrana nedr* [*Prospect and protection of mineral resources*], 2021, No 6, pp. 14–28. (In Russ.).
- 9. Lipina S. A., Cherepovitsyn A. E., Bocharova L. K. Predposylki formirovaniya mineral'no-syr'evykh tsentrov v opornykh zonakh razvitiya v Arkticheskoi zone Rossiiskoi Federatsii [Prerequisites for the formation of mineral resource centers in the support zones of development in the Arctic zone of the Russian Federation], *Arktika i Sever [Arctic and the North*], 2018, No 33, pp. 29–39. (In Russ.).
- 10. Spravka o sostoyanii i perspektivakh ispol'zovaniya mineral'no-syr'evoi bazy Arkticheskoi zony RF na 15.03.2021 g. [Information on the state and prospects for the use of the mineral resource base of the Arctic zone of the Russian Federation as of March 15, 2021], VSEGEI Publ., 2021, 21 p.

Руды и металлы № 4/2022, с. 32–53 / Ores and metals № 4/2022, р. 32–53 DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10021



### Авторы

### Кременецкий Александр Александрович

доктор геолого-минералогических наук научный руководитель imgrenauka@mail.ru

### Спиридонов Игорь Геннадьевич

кандидат геолого-минералогических наук генеральный директор ИМГРЭ imgre@imgre.ru

### Пилицын Алексей Гаврилович

заведующий отделом allexpil@yandex.ru

### Веремеева Людмила Ивановна

кандидат геолого-минералогических наук заместитель заведующего сектором verli@yandex.ru

ФГБУ «Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов» г. Москва, Россия

### **Authors**

### Alexander A. Kremenetsky

D. Sc. in Geology and Mineralogy Scientific Adviser imgrenauka@mail.ru

### Igor G. Spiridonov

PhD in Geology and Mineralogy Director General of IMGRE imgre@imgre.ru

### Alexey G. Pilitsyn

Head of Department allexpil@yandex.ru

### Ludmila I. Veremeeva

PhD in Geology and Mineralogy Deputy Head of Sector verli@yandex.ru

FSBI "Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements" Moscow, Russia



Руды и металлы № 4/2022, c. 54–77 / Ores and metals № 4/2022, p. 54–77 DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10022

ПРИКЛАДНАЯ МЕТАЛЛОГЕНИЯ

УДК 553.411.071:553.07 (571.513)

### Геологическое строение и золотоносность Шаманского рудного узла Алтае-Саянской складчатой области (Республика Хакасия)

Geological structure and gold prospectivity of the Shamansky ore cluster of the Altai-Sayan folded region (Republic of Khakassia)

### Черных А. И., Окулов А. В., Кряжев С. Г., Арсентьева И. В.

Рассмотрены геологическое строение, минералогический состав и возраст пород и руд, закономерности формирования золотого оруденения Шаманского рудного узла – одного из наиболее перспективных в Алтае-Саянской минерагенической провинции. Показано, что узел имеет сложное складчато-блоковое строение. Для пород характерны интенсивные складчатые и разрывные дислокации. Выделен участок наибольших деформаций, на котором сконцентрированы известные поисковые признаки золотого оруденения. Выделены два морфологических типа золотосульфидно-кварцевых руд – в жилах и в пирит-кварцсерицит-анкеритовых метасоматитах. Охарактеризованы состав золота и его морфологические особенности. Изучение изотопии серы сульфидов из золотоносных кварцевых жил показало преобладание значений на уровне  $\delta^{34}$ S от +3,7 до +6,5 ‰, что указывает на их гидротермально-осадочное происхождение. Изотопногеохронологические <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar данные по серициту из золотоносного кварца (359,5 ± 5,5 млн лет) свидетельствуют о проявленности позднедевонско-раннекарбонового этапа формирования золото-сульфидно-кварцевых жил. Сопоставление геологических, металлогенических, минералого-геохимических и изотопногеохронологических данных позволило обосновать вывод о принадлежности золотого оруденения Шаманского узла к орогенному типу. По разработанной модели формирование оруденения предполагается в три этапа – рудоподготовительный островодужный (540-520 млн лет), основной рудный орогенный-1 аккреционно-коллизионный (510-450 млн лет), дополнительный рудный орогенный-2 транспрессионноколлизионный (380-345 млн лет).

Ключевые слова: золото, оруденение, рудный узел, геологическое строение, изотопия серы, Ar-Ar изотопное датирование, орогенные месторождения, Алтае-Саянская складчатая область.

### Chernykh A. I., Okulov A. V., Kryazhev S. G., Arsentieva I. V.

In this work, we consider the geological settings, mineralogical composition and age of rocks and ores, as well as regularities in the formation of gold mineralization of the Shamansky ore cluster, which is one of the most prospective ore clusters in the Altai-Sayan mineragenic province. It is shown that the cluster has a complex fold-block structure. The rocks are characterized by intense folded and discontinuous dislocations. We identified the area of the reatest deformations, where the known prospective signs of gold mineralization are concentrated. Two morphological types of gold-sulfidequartz ores have been distinguished: veins and pyritequartz-sericite-ankerite metasomatite. We characterized the composition of gold and its morphological features. Sulfur isotope data of sulfides from gold-bearing quartz veins predominantly have values of  $\delta^{34}$ S from +3.7 to +6.5 ‰ that indicate their hydrothermal-sedimentary origin. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar isotope-geochronological data on sericite from gold-bearing quartz shows the age of  $359.5 \pm 5.5$  Ma testifying to the Late Devonian-Early Carboniferous stage of the formation of gold-sulfide-quartz veins. A comparison of geological, metallogenic, mineralogical-geochemical and isotope-geochronological data allowed us to conclude that the gold mineralization of the Shamansky cluster belongs to the orogenic type. According to the model of formation, gold mineralization occurred in three stages: ore-preparation islandarc (540-520 Ma), main ore orogenic-1 accretion-collisional (510-450 Ma), and additional ore orogenic-2 transpressional-collisional (380–345 Ma).

Keywords: gold, mineralization, ore cluster, geological structure, sulfur isotope, Ar-Ar isotope dating, orogenic deposits, Altai-Sayan folded region.

For citation: Chernykh A. I., Okulov A. V., Kryazhev S. G., Arsentieva I. V. Geological structure and gold prospectivity of the Shamansky ore cluster of the Altai-Sayan folded region (Republic of Khakassia). Ores and metals, 2022, № 4, pp. 54–77. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10022

Для цитирования: Черных А. И., Окулов А. В., Кряжев С. Г., Арсентьева И. В. Геологическое строение и золотоносность Шаманского рудного узла Алтае-Саянской складчатой области (Республика Хакасия). Руды и металлы. 2022. № 4. С. 54–77. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10022

Руды и металлы № 4/2022, с. 54–77 / Ores and metals № 4/2022, р. 54–77 DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10022

Введение. Шаманский золоторудно-россыпной узел находится в южной части Республики Хакасия в междуречье рек Абакан и Большой Анзас на северном склоне западной части Западного Саяна (рис. 1). Территория узла характеризуется одной из самых высоких в Алтае-Саянской металлогенической провинции россыпной золотоносностью. Здесь известны богатые россыпи золота, бо́льшая часть которых уже отработана. Суммарная учтённая добыча золота из россыпей оценивается на уровне 24–30 т, а линейная продуктивность на отдельных участках достигала 3200 кг/км.

Первые сведения о золотоносности рудного узла появились в 40-х годах XIX века и были связаны с изучением россыпей и добычей из них золота. В 1886-1888 гг. на юго-западном склоне горы Троицкой ортой из отвода прииска Троицкого были вскрыты четыре кварцевые жилы мощностью 0,2-0,65 м с содержанием золота от 2,6 до 7,8 г/т. Затем на протяжении более чем 110 лет изучение коренной золотоносности было связано с кварцевожильным типом оруденения. Геологами и старателями были выявлены многочисленные, как правило маломощные, кварцевые жилы и прожилки, иногда с пиритовой, халькопиритовой и золотой минерализацией в бассейнах рек Безымянка, Весёлый, Левый Кизас, Бол. и Мал. Анзас и др. Поисковые работы на коренное золото концентрировались в районе горы Троицкой и в верховье р. Мал. Анзас, в меньшей степени на других участках.

Геолого-съёмочные работы м-ба 1 : 50 000 и специализированные поиски коренного золота в 1960–1990 гг., проведённые В. Н. Шишловым (1964), Н. Г. Дубининым (1974), А. Д. Кирилловым (1977), Е. С. Единцевым (1996, 1999, 2002) и другими исследователями, были направлены преимущественно на оценку золотоносности кварцевых жил на небольших участках. В результате создана геологическая основа и выявлены многочисленные проявления и пункты минерализации золота. Однако золоторудных объектов с промышленным значением установлено не было.

Современный этап поисков коренного золота связан с работами, инициированными

ФГБУ «ЦНИГРИ» и ориентированными на изучение золотоносности не только кварцевых жил, но и пирит-кварц-серицит-анкеритовых метасоматитов [6, 13, 14]. Впервые предположение о потенциальной золотоностности не только кварцевых жил, но и «...пачек глинистых сланцев в приустьевой части руч. Безымянки и Весёлого» высказал Л. Ячевский в 1909 г. [15]. К сожалению, чтобы вернуться к этой мысли на практике, ушло почти 100 лет. В 2006-2008 гг. на нескольких участках геологами ОАО «Берег» были проведены работы, в результате которых выяснено, что большими перспективами на золото обладают зоны метасоматитов с золото-сульфидно-кварцевыми прожилками. По отдельным участкам Шаманского узла были оценены и апробированы прогнозные ресурсы золота: Успенско-Троицкий участок (Р<sub>3</sub> 40 т; среднее содержание Аи 9,9 г/т), Весёльский (Р<sub>2</sub> 19,8 т; Аи 10,9 г/т), Безымянный (Р<sub>2</sub> 3,3 т; Аи 6,3 г/т), Покосный (Р<sub>1</sub> 16,5 т; Аи 1 г/т).

Таким образом, выполненные исследования показали высокие перспективы выявления коренного золотого оруденения и наличие многочисленных золотоносных кварцевых жил, но не позволили локализовать золоторудные объекты, сопоставимые по масштабам с известной россыпной золотоносностью. Это связано с рядом причин – преобладанием поисковых работ на кварцевожильный тип, крайне неравномерной изученностью рудного узла, малым объёмом горных и буровых работ, сложными ландшафтно-геоморфологическими условиями поисков и др. Одной из важных причин отсутствия значимых результатов в поисках золота является неразработанность модели формирования золотого оруденения Шаманского узла и недостаточное понимание закономерностей его локализации. Большинство исследователей ориентировались здесь на поиски кварцевых жил по аналогии с более изученными рудными районами Алтае-Саянской минерагенической провинции – Мартайгинским, Ольховско-Чибижекским, Коммунаровским. Однако при этом не учитывалась разница в геологическом строении - отсутствие средне-позднекембрийско-ордовикских



Руды и металлы № 4/2022, с. 54–77 / Ores and metals № 4/2022, р. 54–77 DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10022



### Рис. 1. Обзорная схема геолого-структурного строения и металлогенического районирования Кизасско-Анзасского полиметаллически-железо-золоторудно-россыпного района:

минерагенические субпровинции: каледонско-эпикаледонские (1 – Алатауско-Тувинская (АТ), 2 – Западно-Саянская (ЗС)), герцинско-эпигерцинская (3 – Кузнецко-Тувинская (КТ)); 4 – оси наиболее крупных синклиналей; 5 – оси наиболее крупных антиклиналей; 6 – участок максимальных складчаторазрывных деформаций; 7 – месторождения: а – золота, b – железа, с – медно-кобальтовые; границы металлогенических таксонов: 8 – металлогенических зон, 9 – рудных районов, 10 – рудных узлов. Металлогенические зоны (МЗ), рудные районы и узлы (в скобках их номера на рисунке): Минусинская угленосная-медно-урановорудная минерагеническая область (1 U, Cu, УК), включая рудные районы Хараджульский меднорудный (1.1 Cu), Абаканский ртутный (1.2 Hg); Алатауско-Горношорская марганцево-молибден-золоторудная МЗ (2 Au, Mo, Fe, Mn); Северо-Саянская медно-железо-золоторудная МЗ (3 Au, Fe, Cu), включая рудные районы Кизасско-Анзасский полиметаллически-железо-золоторудно-россыпной (3.1 Au, Fe) с рудными узлами (Шаманский золоторудно-россыпной (3.1.1 Au), Анзасский золото-железорудный (3.1.2 Au, Fe), Джарганский прогнозируемый золото-полиметаллический (3.1.3 Pb, Cu, Zn, Au)) и Майнский золоторудный район (3.2 Au); Телецко-Башкаусская золото-полиметаллическая МЗ (4 Pb, Zn, Cu, Au); Центрально-Западно-Саянская медно-кобальтово-железорудная МЗ (5 Fe, Co, Cu); Борусско-Куртушибинская золото-асбест-хромитоворудная МЗ (6 Cr, asb, Au)



Fig. 1. Overview scheme of the geological settings and metallogenic zonation of the Kizas-Ansas polymetallic-iron-goldore-placer area:

mineragenic subprovinces: Caledonian-Epicaledonian (1 – Alatau-Tuva (AT), 2 – Western Sayan (3C)), Hercynian-Epihercynian (3 – Kuznetsk-Tuva (KT)); 4 – axes of the largest synclines; 5 – axes of the largest anticlines; 6 – the area of maximum folded-discontinuous deformations; 7 – deposits: a – gold, b – iron, c – copper-cobalt; boundaries of metallogenic taxa: 8 – metallogenic zones, 9 – ore districts, 10 – ore clusters. Metallogenic zones (MZ), ore districts and clusters (in brackets their numbers in the figure): Minusinsk coal-bearing-copper-uranium ore mineragenic area (1 U, Cu, UK), including the following ore districts: Kharadzhul copper ore (1.1 Cu), Abakan mercury ore (1.2 Hg); Alatau-Gornoshorskaya manganese-molybdenum-gold MZ (2 Au, Mo, Fe, Mn); The North Sayan copper-iron-gold MZ (3 Au, Fe, Cu), including the ore regions of the Kizas-Anzas polymetallic-iron-gold-ore placer (3.1 Au, Fe) with ore clusters (Shamansky gold-ore placer (3.1.1 Au), Anzas gold-iron ore (3.1.2 Au, Fe), Dzhargan prospective gold-polymetallic (3.1.3 Pb, Cu, Zn, Au)) and Main gold ore region (3.2 Au); Teletsko-Bashkausskaya gold-polymetallic MZ (4 Pb, Zn, Cu, Au); Central West Sayan copper-cobalt-iron MZ (5 Fe, Co, Cu); Borussko-Kurtushiba gold-asbestos-chromite MZ (6 Cr, asb, Au)

гранитоидных массивов, значение герцинской орогении, важность складчато-разрывных дислокаций для локализации руд и т. д.

Металлогеническое районирование и металлогеническая специализация. Шаманский золоторудно-россыпной узел (около 490 км<sup>2</sup>) расположен в центральной и юго-западной частях Кизасско-Анзасского полиметаллическижелезо-золоторудно-россыпного района. Он характеризуется типичной для всей Северо-Саянской МЗ Алатауско-Тувинской субпровинции (см. рис. 1) металлогенической специализацией на золото, железо, свинец, цинк, медь. Закономерности пространственного распределения, специфика локализации золотого и золотосодержащего оруденения и сочетание различных металлогенических факторов определяют выделение в пределах рудного района трёх рудных узлов – Шаманского золоторудно-россыпного, Анзасского золото-железорудного (Анзасское железорудное и Кировское золоторудное месторождения) и Джарганского золото-полиметаллического (Тигримское проявление).

Шаманский золоторудно-россыпной узел выделяется высокой россыпной золотоносностью, концентрацией многочисленных проявлений и пунктов минерализации золота, кварцевых жил и прожилков с сульфидной минерализацией и золотом, зон сульфидизации, бурошпатизации и окварцевания.

Геолого-структурное положение и геологическое строение. Шаманский золоторуднороссыпной узел расположен в центральной части линзообразного тектонического блока (Кизасско-Анзасского рудного района) в югозападной части Северо-Саянской покровноскладчатой зоны (см. рис. 1). Территория района отделена Саяно-Минусинским региональным разломом от кембрийско-ордовикских пород Алатауско-Горношорской складчатой зоны и от девонских пород Минусинской складчатой зоны в северной части. С юго-востока породы Северо-Саянской зоны по Кандатскому региональному разлому граничат с венд-раннекембрийскими зеленосланцевыми метаморфическими комплексами Телецко-Сютхольской складчатой зоны. Кизасско-Анзасский рудный район сложен преимущественно островодужными кембрийскими вулканогенно-осадочными толщами, смятыми в линейные складки регионального сжатия, с осями складок вытянутыми в северо-восточном направлении.

В геолого-структурном плане Шаманский узел приурочен к зоне максимальных складчато-разрывных деформаций пород шаманской свиты и имеет сложное складчато-блоковое строение (см. рис. 1). Наиболее крупные разломы северо-восточного простирания – Южно-Шаманский, Петропавловский, Северо-Шаманский – трассируются мощными (100– 700 м) зонами рассланцевания, трещинова-



Руды и металлы № 4/2022, с. 54–77 / Ores and metals № 4/2022, р. 54–77 DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10022

тости, милонитизации, катаклаза и брекчий. По Южно-Шаманскому разлому проведена южная граница Шаманского рудного узла. Северо-Шаманский разлом проходит в центральной части рудного узла и также имеет северовосточное простирание. Петропавловский разлом прослеживается у северо-западной и северо-восточной границы рудного узла. С севера на породы Шаманского узла по Кизасско-Анзасскому надвигу надвинуты породы Хансынского блока, сложенные преимущественно раннекембрийскими эффузивами и туфами основного и кислого составов. Наряду с вышеописанными крупными дизъюнктивами имеются многочисленные более мелкие оперяющие разрывные нарушения и зоны трещиноватости, ориентированные в субширотном, северо-восточном и северо-западном направлениях. Вдоль всех крупных разломов северо-восточного простирания установлены линейные участки окварцевания, карбонатизации, сульфидизации и лимонитизации. К зонам разломов и трещиноватости приурочены линейные зоны метасоматитов и многочисленные кварцевые жилы и прожилки.

Характерной особенностью Петропавловского разлома является искривление его плоскости в районе пересечения долин рек Весёлый, Безымянка и Поперечный Кизас. Здесь простирание разлома меняется от северо-восточного на западе на субширотное, а затем юго-восточное на востоке. Линия Кизасско-Анзасского надвига проходит по отрогам хребта Хансын и в плане имеет форму дуги, своей фронтальной частью выгнутой в южном направлении, плоскость его сместителя погружена на север и северо-запад под углами 50-70°. В верховье рек Мал. Анзас и Весёлый наблюдается изгиб поверхности надвига и изменение его простирания с северо-западного на северо-восточное. На местности зона разлома выражена мощной (100-250 м) зоной брекчирования.

Важную роль в создании современного структурного плана территории Шаманского узла играют более молодые, вероятно позднедевонско-раннекарбоновые, разрывные нарушения северо-северо-западного простирания. Каледонские породы разбиты ими на многочисленные блоки. Простирание разломов колеблется от 310° до 360°, падение – от северовосточного до юго-западного, углы падения 75–90°. Нарушения носят сбросо-сдвиговый характер. Для этих разломов характерна незначительная мощность зон трещиноватости и дробления (1–30 м), вдоль которых часто развиты карбонатные, карбонатно-кварцевые и кварцевые жилы. Наиболее крупная такая зона разломов прослеживается через Кизасский участок из долины рек Берёзовая и Чебалсуг (левые притоки р. Бол. Анзас) в долину р. Левый Кизас через весь хребет Шаман.

Северная граница Шаманского узла сопряжена с крупной Курчепско-Малоанзасской складчатой структурой. Малоанзасская и Курчепская синклинали образуют единую вытянутую в северо-восточном направлении структуру с продольным и поперечным перегибом шарнира в районе нижнего течения рек Левый Кизас, Безымянка и Поперечный Кизас. Крылья синклиналей сложены породами верхнемонокской, шаманской, кайзасской и чеханской свит. Ось Курчепской синклинали имеет восточно-северо-восточное простирание, шарнир под углом ~ 20° погружается на юго-запад. Ось Малоанзасской синклинали имеет северо-восточное простирание, шарнир её погружается в этом же направлении под углом 10-15°. Южное крыло Курчепско-Малоанзасской синклинальной структуры смято в складки второго порядка (Кизасско-Татьянинская антиклиналь, Самлатская синклиналь и др.) с размахом крыльев 2-4 км. В свою очередь эти складки осложнены более мелкими складками третьего порядка, размах крыльев которых составляет десятки и сотни метров (рис. 2).

Большая часть Шаманского узла сложена отложениями шаманской свиты. Наиболее широко среди них распространены рассланцованные переслаивающиеся серо-зелёные песчаники, алевропесчаники и алевролиты, иногда с примесью туфового материала (рис. 3, a-c). Кроме того, известны углеродисто-глинистые и углеродисто-кремнистые сланцы с прослоями, линзами и пачками гравелитов, конгломератов, туфопесчаников, туфоалевролитов, Руды и металлы № 4/2022, с. 54–77 / Ores and metals № 4/2022, р. 54–77 DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10022





Рис. 2. Складка 3-го порядка терригенных пород шаманской свиты с маломощными кварцевыми жилами в днище карьера старательской отработки россыпи р. Левый Кизас

Fig. 2. A 3rd-order fold in the terrigenous rocks of the Shaman Formation with thin quartz veins from the bottom of a quarry of artisanal mining of the placer from the Left Kizas river

туфоконгломератов, известняков, глинистых известняков, мергелей, известковистых песчаников и алевролитов. На локальных участках среди терригенных пород шаманской свиты встречаются единичные прослои эффузивов и туфов основного состава. В пределах рудного узла шаманская свита подразделяется на три подсвиты общей мощностью более 3000 м. Среди пород нижней подсвиты преобладают углеродисто-кремнистые, углеродисто-глинистые сланцы, туфогенно-терригенные и терригенные породы. В средней подсвите – терригенные породы зелёного, реже серого цвета. Для верхней подсвиты среди терригенных пород характерны прослои глинистых известняков и туффитов. Часто среди терригенных пород наблюдаются прожилки кварц-хлоритового, кварц-эпидот-хлоритового, карбонатэпидот-хлоритового составов (см. рис. 3, *b*-*d*).

Для Шаманского узла характерно слабое развитие субвулканических и интрузивных пород, они встречаются преимущественно за его пределами и приурочены к наиболее крупным региональным разломам – Кандатскому и Саяно-Минусинскому. Здесь они представлены дайками и небольшими массивами раннекембрийских перидотит-пироксенит-габброноритового лысогорского и плагиогранитов



Руды и металлы № 4/2022, с. 54–77 / Ores and metals № 4/2022, р. 54–77 DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10022



### Рис. 3. Петрографические особенности терригенных пород шаманской свиты:

а – шлиф 21346/1, рассланцованный метатуфоалевропесчаник (без анализатора); b – шлиф 21447-1, рассланцованный метаалевропесчаник с примесью туфогенного материала с кварц-хлорит-эпидотовыми прожилками (с анализатором); c – шлиф 21352-1, рассланцованный метаалевропесчаник с примесью туфогенного материала с кварцевыми прожилками (с анализатором); d – шлиф 21425-2, кварцевый прожилок на контакте с кварц-серицит-хлоритовым сланцем (без анализатора)

Fig. 3. Petrographic features of terrigenous rocks of the Shaman Formation:

a – thin section 21346/1, sheared metatufoaleuros andstone (without analyzer); b – thin section 21447-1, sheared metaaleuros andstone with a mixture of tuffaceous material with quartz-chlorite-epidote veinlets (with analyzer); c – thin section 21352-1, sheared metasilty sandstone with a mixture of tuffaceous material crosscut by quartz veins (with analyzer); d – thin section 21425-2, quartz vein at contact with quartz-sericite-chlorite schist (without analyzer)

майнского комплексов, а также дайками и небольшими телами ранне-среднедевонского габбро-гранитоидного козёрского комплекса.

Особенности геологического строения Шаманского узла, данные о литолого-петрографическом составе пород и сопоставление данных по соседним территориям дают основание предполагать, что формирование пород шаманской свиты происходило в пределах небольшого осадочного бассейна в нижней части склона островной дуги, либо в межостровной депрессии. Руды и металлы № 4/2022, с. 54–77 / Ores and metals № 4/2022, р. 54–77 DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10022

Золотоносность Шаманского узла. Поисковые признаки золотого оруденения Шаманского узла концентрируются на нескольких участках - Татьянинском, Кизасском, Успенском, Покосном и др., которые характеризуются наибольшей изученностью и выявлены либо при отработке россыпей, либо при заверке литогеохимических аномалий. Анализ материалов предшественников и вновь полученные данные по золотоносности узла свидетельствуют о выделении здесь двух типов золото-сульфидно-кварцевого оруденения жильного и в пирит-кварц-серицит-анкеритовых метасоматитах. Оруденение жильного типа установлено на участках Татьянинском, Успенском, Кизасском, а в метасоматитах – на Кизасском, Покосном, Успенском.

Кизасский участок расположен в междуречье рек Левый Кизас и Даниловский (рис. 4). В структурном плане приурочен к зоне сопряжения нескольких крупных пликативных и региональных дизъюнктивных структур и характеризуется интенсивными складчаторазрывными деформациями. Участок находится в области перегиба шарнира Курчепско-Малоанзасской синклинали (1-й порядок) на северо-западном крыле Кизасской антиклинали (2-й порядок), осложнённом складками более мелкого порядка (3-й и 4-й порядок). На породы участка с севера надвинуты преимущественно вулканогенные породы нижне- и верхнемонокской свит по Кизасско-Анзасскому надвигу. В пределах участка проходит рудоконтролирующий Петропавловский разлом с серией оперяющих более мелких нарушений. На участке широко развиты разрывные нарушения северо-западного направления.

Рудовмещающими породами на Кизасском участке являются породы шаманской свиты – зелёные, зеленовато-серые до тёмно-серых углеродсодержащие песчаники и алевролиты, часто с примесью туфового материала. Породы характеризуются текстурами от массивных до сланцеватых, вплоть до формирования тонких (1–2 мм) плиток. Направление рассланцевания совпадает с северо-восточной ориентировкой главных геологических структур участка. Северо-западное направление разрывных нарушений подчёркивается прежде всего кварцевыми жилами и прожилками соответствующей ориентировки, в меньшей степени направлением трещиноватости в породах, а в рельефе выражено направлением долин рек. Породы в зонах дробления обохрены и окварцованы, выделяются многочисленные разноориентированные жилы и прожилки мощностью от 1 мм до 1 м. Широко распространены метасоматически изменённые терригенные породы – хлоритизированные, анкеритизированные, пиритизированные, с преобладанием пирита кубического габитуса размером первые миллиметры, иногда до 1,5 см (рис. 5, *a*).

Золотое оруденение наиболее детально изучено на проявлениях Весёльское, Надежда и Безымянное. Проявление Весёльское приурочено к участку пересечения Петропавловского разлома и тектонической зоны северозападного простирания. На проявлении установлены золотоносные зоны метасоматитов мощностью до 70-80 м на контакте карбонатно-терригенных пород верхнешаманской подсвиты с пачкой чёрных углеродистых пиритизированных известняков. Здесь в окварцованных и лимонитизированных песчаниках и гравелитах выявлены пять рудных интервалов мощностью от 1,2 до 3,0 м с содержаниями золота от 2,3 до 17.0 г/т. Подобные условия локализации отмечены и для проявления Безымянное. Здесь с поверхности вскрыты два рудных интервала мощностью 2,4 и 1,2 м с содержаниями золота 1,85 и 6,3 г/т соответственно.

Проявление Надежда представлено двумя золотоносными зонами – северо-восточного и северо-западного простирания в отложениях нижней пачки верхнешаманской подсвиты. В пределах зон среди пирит-кварц-серициткарбонатных метасоматитов установлены участки интенсивного прожилкового окварцевания с золотом (см. рис. 5, *b*). В северо-восточной зоне содержания золота в шестиметровом интервале варьируют от 0,6 до 9,3 г/т, в среднем 4,4 г/т. Вторая зона представлена прокварцованными, брекчированными и пиритизированными метасоматитами и милонитами мощностью 20–30 м. При шлиховом опробовании



Руды и металлы № 4/2022, с. 54–77 / Ores and metals № 4/2022, р. 54–77 DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10022



фиты, глинистые известняки); 4 – среднешаманская подсвита (ритмичное переслаивание песчаников, алевролитов сланцев, серых и зелёных тонов, реже конгломераты, гравелиты, известняки, порфириты, их туфы); 5 – нижнешаманская подсвита (сланцы кремb – синклинальные); 14 – антиклинальные складки 3-го порядка; 15 – промышленные россыпи золота; 16 – рудопроявления и пункты цветных, редкие прослои туффитов и туфов); 3 – верхнешаманская подсвита (песчаники, алевролиты, сланцы, гравелиты, туфы, туфнистые, глинисто-кремнистые, углисто-глинистые, песчаники, алевролиты, туфопесчаники, туфоконгломераты, гравелиты, линзы известняков, редко эффузивы основного состава); 6 – верхнемонокская свита (конгломераты, туфоконгломераты, гравелиты, песчаники, алевролиты, известняки, реже туфы, туффиты, эффузивы основного и среднего составов); литологические разности пород: 7 – известняки глинистые, мергели, 8 – конгломераты, 9 – сланцы углисто-глинистые; 10 – геологические границы: а – достоверные, *b* – предполагаемые; 11 – разрывные нарушения: *а* – достоверные, *b* – предполагаемые; 12 – региональные разрывные нарушения, разломы (І – Северо-Шаманский, ІІ – Петропавловский, ІІІ – Кизасско-Анзасский); *ІЗ* – складки 1-го, 2-го порядков (а – антиклинальные, минерализации золота (1 – Троицкое, 2 – Успенское, 3 – Весёльское, 4 – Безымянное, 5 – Надежда, 6 – Спиридоновское, 7 – Плоское, 1 – чеханская свита объединённая (туфоконгломераты, туфы, туфопесчаники, андезитовые порфириты, песчаники, алевролиты); 2 – кайзасская свита (ритмичное переслаивание песчаников, алевролитов, сланцев, гравелитов, конгломератов существенно зелено-8 – Карьерное, 9 – Водораздельное); 17 – минерализованные зоны жильного и прожилкового окварцевания, серицитизации, анкеригизации, вкрапленности пирита



Fig. 4. Scheme of the geological structure and gold mineralization of the Kizassky area (compiled based on the materials of N. G. Dubinin, 1974f; A. D. Kirilov, 1977f; E. S. Edintseva, 1996f, Yu. M. Mikhalev, 1998f and JSC "Siberian PGO" 2020-2022):

mation (sandstone, siltstone, shale, gravelstone, tuff, tuffite, argillaceous limestone); 4 – Middle Shaman subformation (rhythmic interbedding a – reliable, b – assumed; 12 – regional discontinuities, faults (I – North Shamansky, II – Petropavlovsky, III – Kizassko-Anzassky); 13 – folds mic interbedding of sandstone, siltstone, shale, gravelstone, green conglomerate, rare interlayers of tuffite and tuff); 3 – Upper Shaman subforof sandstone, siltstone, gray and green shale, rarely conglomerate, gravelstone, limestone, porphyrite, their tuff); 5 – Lower Shaman Subforlimestone, less often tuff, tuffite, effusive of basic and intermediate composition); lithological varieties of rocks: 7 – clayey limestone, marl,  $\beta$  - conglomerate,  $\beta$  - carbonaceous-argillaceous shale; IO - geological boundaries:  $\alpha$  - reliable, b - assumed; II - discontinuous deformations: of the 1st and 2nd order (a – anticlinal, b – synclinal); 14 – anticlinal folds of the 3rd order; 15 – industrial placers of gold; 16 – ore oc-7 – Ploskoye, 8 – Karernoye, 9 – Vodorazdelnoye); 17 – mineralized zones of vein and vein silicification, sericitization, ankeritization and 1 – combined Chekhan Formation (tuff conglomerate, tuff, tuff sandstone, andesitic porphyrite, sandstone, siltstone); 2 – Kaizas Formation (rhythmation (siliceous, argillaceous-siliceous, carbonaceous-argillaceous shale, sandstone, siltstone, tuff sandstone, tuff-conglomerate, gravelstone, limestone lenses, rarely mafic effusive rocks); 6 – Upper Monok Formation (conglomerate, tuff-conglomerate, gravelstone, sandstone, siltstone, currences and gold mineralization sites (1 – Troitskoye, 2 – Uspenskoye, 3 – Veselskoye, 4 – Bezymyannoye, 5 – Nadezhda, 6 – Spiridonovskoye, pyrite dissemination





Рис. 5. Лимонитизированные анкеритизированные, хлоритизированные зелёные мелкозернистые туфопесчаники шаманской свиты с единичными метакристаллами окисленного кубического пирита (Ру) (*a*); потенциально рудные интенсивно лимонитизированные бурошпатизированные песчаники с кварцевыми прожилками (*b*)

Fig. 5. Limonitized ankeritized, chloritized green fine-grained tuff sandstone of the Shamansky Formation with single metacrystals of oxidized cubic pyrite (py) (*a*); Potentially ore-bearing intensely limonitized brown spar sandstone with quartz veins (*b*)

дезинтегрированных коренных пород отмечено крупное свободное весовое золото класса +0,5...-6 мм. Содержание свободного (шлихового) золота по интервалу в 28 м составило не менее 4 г/т или 9,3 г/м<sup>3</sup>. Пробирным анализом в бороздовых пробах из канав в четырёх интервалах, каждый по 1,5 м мощностью, установлены содержания золота 5,7; 3,0; 0,9; 3,0 г/т. На глубину до 80 м зона интенсивной минерализации перебурена наклонной скважиной.

За пределами Кизасского участка в восточной части Шаманского узла выявлен ряд проявлений золото-сульфидно-кварцевого типа в жилах (участки Татьянинский и Успенский) и в пирит-кварц-серицит-анкеритовых метасоматитах (участок Покосный). Участок Татьянинский находится на правобережье среднего течения р. Малый Анзас. Здесь среди рассланцованных и интенсивно пиритизированных изменённых песчаников, алевролитов и гравелитов шаманской свиты выявлены два проявления золота, расположенные в 1,5 км друг от друга – Татьянинское (западный фланг) и Жилы Жёлтые (восточный фланг). В структурном плане рудопроявления приурочены к ядру антиклинальной складки, осложнённой дополнительной складчатостью, сложенной пиритизированными кварц-полевошпатовыми песчаниками, переслаивающимися с глинистыми и кварц-серицитовыми сланцами. На Татьянинском проявлении в нескольких кварцевых жилах и линзах с пиритом, халькопиритом и лимонитом мощностью 0,1-1,2 м, прослеженных по простиранию на 320 м установлены содержания золота 0,6-42,4 г/т, среднее 7,3 г/т. Рудопроявление Жилы Жёлтые включает две кварцевые жилы с пиритом, гематитом и лимонитом мощностью от 0,02 до 1,15 м, прослеженные по простиранию на 60 м среди пиритизированных песчаников. Содержание золота – от следов до 166 г/т. Между рудопроявлениями известны золотоносные кварцевые прожилки северо-западного и северо-восточного простирания. Западнее и восточнее Татьянинского участка выявлены отдельные сульфидно-кварцевые жилы с содержанием золота 1,2-28,8 г/т.

Участок Успенский расположен в междуречье рек Левый Кизас, Малый Кизас и Безымянка, в бассейне руч. Успенский (см. рис. 4). Руды и металлы № 4/2022, с. 54–77 / Ores and metals № 4/2022, р. 54–77 DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10022

Участок сложен породами шаманской свиты, с преобладанием в составе алевролитов и кварц-плагиоклаз-серицитовых сланцев. Через участок проходит одноимённая зона дробления и гидротермального изменения (минерализованная зона) восточно-северо-восточного простирания шириной до 250 м. Внутри зоны установлены участки штокверкового окварцевания шириной на дневной поверхности 70-100 м. Падение зоны на восточном фланге южное (угол 40-80°), на западном – северное (55-87°). Зона пересекается субмеридиональной системой субпараллельных разломов, разбивающих её на отдельные блоки. В штуфных пробах из Успенской зоны максимальные содержания золота достигали 63,2 г/т в кварце и 17,8 г/т в изменённых кварц-плагиоклазсерицитовых сланцах. Зона изучена слабо и вскрыта единичными шурфами и канавами.

Участок Покосный находится на южном фланге Шаманского рудного узла. В структурном плане он приурочен к ядру Салматской синклинали в месте пересечения Южно-Шаманского разлома и более позднего разлома северо-западного простирания. Участок сложен рассланцованными терригенными породами шаманской свиты с прослоями туфов основного состава, насыщенными габбродиабазовыми дайками лысогорского комплекса. Породы в зоне разлома, в полосе 80-150 м интенсивно передроблены и милонитизированы. В результате работ ОАО «Минусинская ГРЭ» выявлены рудоносные зоны метасоматитов шириной до 50-65 м и протяжённостью до первых сотен метров. В метасоматитах пириткварц-серицит-анкеритового состава установлена вкрапленность магнетита, халькопирита, реже галенита и сфалерита. Лабораторно-технологическое изучение проб Покосного участка показало неравномерное содержание золота в золотоносных метасоматитах в среднем на уровне 0,1-0,4 г/т, а на участках концентрации сульфидно-кварцевых прожилков на уровне 0,5-4 г/т. По результатам опробования среди метасоматитов с сульфидно-кварцевыми прожилками выделены многочисленные интервалы мощностью 20-50 м с содержанием золота 0,6-1,5 г/т.

Таким образом, изучение Шаманского узла позволило выделить золотое прожилковожильное оруденение, локализованное в линейных зонах пирит-кварц-серицит-анкеритовых метасоматитов и в окварцованных лимонитизированных карбонатно-терригенных породах шаманской свиты. Жилы и прожилки приурочены к зонам рассланцевания и трещиноватости северо-восточного и северо-западного направлений. Наличие разноориентированных, пересекающих друг друга жил свидетельствует о многоэтапности их формирования.

Изотопно-геохимические исследования сульфидных минералов. Изотопные анализы серы сульфидных минералов выполнены в ФГБУ «ЦНИГРИ» С. Г. Кряжевым по методике [11]. Серу сульфидов переводили в SO<sub>2</sub> посредством реакции с CuO при 800 °C в вакууме с последующей криогенной очисткой газа и анализом изотопного состава серы на массспектрометре МИ-1201. Результаты пересчитаны по отношению к метеоритному стандарту CDT. В качестве эталонов использовали лабораторный стандартный образец ЦНИГРИ «Пирит Гайского месторождения» с  $\delta^{34}S = +0,7 \%$ и стандартный образец сфалерита NBS 123 с  $\delta^{34}$ S= +17,3 ‰. Точность измерений составляет ± 0,2 ‰. Результаты определений приведены в таблице.

Общий разброс значений  $\delta^{34}$ S в проанализированных образцах составил диапазон от +3,7 до +10,1 ‰. При этом относительно низкие значения  $\delta^{34}$ S (+3,7...+6,5 ‰) установлены в пирите и халькопирите из золотоносных зон в пирит-кварц-серицит(парагонит)-анкеритовых метасоматитах по рассланцованным терригенным породам шаманской свиты и из кварцевых жил с золотом. Во вмещающих околорудных породах сера пирита в большей мере обогащена тяжёлым изотопом ( $\delta^{34}$ S от +7 до +10 ‰).

Результаты изотопных исследований свидетельствуют о гидротермально-осадочной природе серы проанализированных сульфидов Кизасского участка. По абсолютным значениям δ<sup>34</sup>S и по параметрам изотопно-геохимической зональности изученная минерализация в полной мере соответствует золото-сульфидному



### Изотопный состав серы сульфидов Кизасского участка Шаманского узла

Sulfur isotope composition of sulfides from the Kizas area of the Shamansky ore cluster

№ образца	Описание	δ <sup>34</sup> SCDT, ‰				
Золотоносные зоны						
309-1	Пирит из кварцевой жилы с видимым золотом	+3,7				
21260	Пирит из кварцевой жилы с видимым золотом	+3,7				
21112	Кубические кристаллы пирита в сланцах	+5,2				
21267	Кубооктаэдрические кристаллы пирита в сланцах	+5,4				
21650	Кубические метакристаллы пирита в бурошпатизированных туфопесчаниках	+5,9				
21423	Кубические кристаллы пирита в углеродистых сланцах	+6,1				
21249	Халькопирит из кварцевой жилы с видимым золотом	+6,5				
ТΠ-1	Пирит из технологической пробы ТП-1 (кварц-парагонитовые сланцы с кварцевыми прожилками, сульфидами и самородным золотом)	+4,9				
Околорудные вмещающие породы						
K4-1	Кубические кристаллы пирита в сланцах	+7,1				
K204-122.5	Кубические кристаллы пирита в песчаниках	+8,3				
20101/1(2)	Крупный кристалл пирита в сланцах (грани)	+9,6				
20101/1(1)	Тот же кристалл (центр)	+10,1				

оруденению сухоложского типа, формирование которого связано с функционированием конседиментационных эксгаляционно-осадочных систем и последующим метаморфизмом металлоносных отложений [7, 9]. В подобных системах области максимальной золотоносности располагаются вблизи рудоподводящих каналов и характеризуются минимальными значениями  $\delta^{34}$ S (в рассматриваемом случае от +3,7 до +6,5 ‰). На удалении от подводящих нарушений (а также вверх по разрезу) сера сульфидов в большей степени обогащается тяжёлым изотопом (в рассматриваемом случае до +10 ‰).

Последующий динамотермальный метаморфизм сопровождался локальным (десятки метров) переотложением сульфидов, высвобождением связанного в них золота и его переносом в зоны пониженного давления в ядрах складок. Кварцевые жилы и прожилки, пересекающие обогащённые сульфидами и золотом литолого-стратиграфические уровни, несут ещё более концентрированное золотое оруденение. При этом все эпигенетические процессы не сопровождались существенным изменением изотопного состава серы сульфидов, что является характерным признаком метаморфогенно-гидротермальных систем.

В единичных зёрнах пирита, находящегося в ассоциации с золотом, микрорентгеноспектральным анализом установлено повышенное содержание мышьяка – до 0,25 %. Кубический пирит из незолотоносных (с содержанием золота на уровне 0,00*n* г/т) бурошпатизированных зелёных хлоритовых сланцев характеризуется содержанием мышьяка на порядок ниже – 0,02 %. Химический состав сульфидных минералов требует дальнейшего более детального изучения.

Морфология и состав золота. Изучение образцов кварца, отобранных на Кизасском участке, свидетельствует о том, что чаще всего видимое золото фиксируется в зальбандовых частях жил, где хорошо просматриваются реликты вмещающих кварц-хлорит-серицитовых сланцев с лимонитизированным железистым карбонатом (рис. 6). Обычно частицы видимого золота имеют размеры от 0,05 до 1 мм и об-





Рис. 6. Фрагмент золотоносной анкерит-кварцевой жилы, на поверхности зальбанда которой зафиксированы многочисленные частицы золота (Au), а также выделения окисленного пирита (Py) и железистого карбоната

Fig. 6. A fragment of a gold-bearing ankerite-quartz vein, numerous particles of gold (Au), as well as segregations of oxidized pyrite (Py) and ferruginous carbonate, are confined to the selvage of the vein

разуют включения непосредственно в кварце в тесной ассоциации с гидроокислами железа, развитыми как по железистому карбонату, так и по пириту (рис. 7). Иногда в окисленном пирите фиксируются частицы самородного золота размером 0,05–0,2 мм, образующие эмульсионную вкрапленность (рис. 8; см. рис. 7).

Детализация и дополнение ранее проведённых работ [1, 14] свидетельствуют, что золото протолочек, рыхлых делювиальных и аллювиальных отложений Шаманского узла характеризуется схожим химическим составом и морфологией. Пробность золота варьирует в широких пределах, преимущественно от 847 до 977 ‰. По единичным определениям пробность опускается до 700 %. В коррозионных оболочках пробность золота увеличивается до 986-1000 %. Наблюдаются два пика пробности золота: на уровне 935-950 ‰ и менее выраженный, на уровне 910-880 %. Главная примесь - серебро, количество которого варьирует от 3 до 8 %. Наиболее стабильной примесью золота является Си в количестве от 0,01 до 1 %, а также Те (0,02–0,11 %) и Ві (0,01–0,15 %). Кроме того, в отдельных зёрнах определены

примеси Sb, Pt, Pd. Часто золото встречается в виде правильных форм, что может указывать на условия свободного роста, наличие которых может зависеть от различных факторов. К ним относятся, например, высокая степень деформации вмещающих пород и жильного кварца, разгрузка рудоносных растворов при заполнения трещин отрыва, отложение золота в пустотах выщелачивания.

Детальное исследование представительной коллекции самородного золота Кизасского участка позволило сделать вывод о наличии золота двух генераций. Мельчайшие частицы золота размером 0,05–0,15 мм образуют эмульсионную вкрапленность в пирите (золото-I). Золото более поздней генерации (золото-I) формирует более крупные частицы в трещинках в пирите и на его поверхности, в составе серицит-кварцевого агрегата с гидроокислами железа по анкериту и в кварце.

Пробность изученного золота-І варьирует в диапазоне от 936,9 до 949,0 ‰, в среднем 942,3 ‰. Главная примесь – Аg, в меньшей степени – Сu (среднее содержание 0,07 %). Более редкие и спорадические примеси, макси-



Руды и металлы № 4/2022, с. 54–77 / Ores and metals № 4/2022, р. 54–77 DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10022



© Черных А. И., Окулов А. В., Кряжев С. Г., Арсентьева И. В., 2022 © Chernykh A. I., Okulov A. V., Kryazhev S. G., Arsentieva I. V., 2022



### Рис. 7. Морфология самородного золота:

a – комковидно-удлинённая частица самородного золота в кварце в тесной ассоциации с гидроокислами железа по Fe-карбонату; b – комковидная (?) частица самородного золота с матовой, мелкоямчатой поверхностью и частица с отпечатками граней выщелоченного Fe-карбоната; c – интерстициальная частица самородного золота в кварце в тесной ассоциации с гидроокислами железа по Fe-карбонату; d – частицы самородного золота размером до 0,1 мм в серицит-кварцевом агрегате с гидроокислами железа по Fe-карбонату в поверхности трещины в окисленном кубическом пирите; e – комковидно-ячеистая удлинённая частица золота; f – интерстициальные частицы золота; g – эмульсионная вкрапленность золота в окисленном пирите; h – комковидно-ячеистая удлинённая частица золота с отпечатком граней выщелоченного Fe-карбоната; i – золото трещинно-прожилковой формы в кварце; j – частицы золота уплощённой, трещинной формы в кварце на поверхности зальбанда жилы; Qtz – кварц, i.h.Fe – гидроокислы железа; остальные усл. обозн. см. рис 6

### Fig. 7. Morphology of native gold:

a – a lumpy-elongated particle of native gold in quartz in spatial association with iron hydroxides after Fecarbonate; b – lumpy (?) particle of native gold with a matte finely pitted surface and a particle with imprints of faces of leached Fe-carbonate; c – an interstitial particle of native gold in quartz in association with iron hydroxides after Fe-carbonate; d – particles of native gold up to 0.1 mm in size in a sericite-quartz aggregate with iron hydroxides on Fe-carbonate inside the crack in oxidized cubic pyrite; e – lumpy-cellular elongated gold particle; f – interstitial gold particles; g – emulsion dissemination of gold in oxidized pyrite; h – a lumpy-cellular elongated gold particle with an imprint of faces of leached Fe-carbonate; i – a fissure-veinlet gold in quartz; j – flattened fractured gold particles in quartz on the surface of the vein selvage; Qtz - quartz, i.h.Fe, iron hydroxides; other conv. designation see fig. 6

мальные содержания которых обычно не превышают первых 0,0n %, – Ві, Те, Sb, Zn, Pt, As. Суммарная доля примесей в среднем составляет 0,15 %.

Чаще встречается золото более поздней генерации (золото-II), представленное преимущественно частицами неправильной формы комковидные, комковидно-ячеистые, комковидно-интерстициальные и др. (см. рис. 7). Характер поверхности разнообразный - от мелкоямчатой («матовой», «шагреневой») до мелкобугорчатой, ячеистой, довольно часто фиксируются гладкие ровные поверхности, углубления правильной формы с ярким блеском (см. рис. 7). Иногда на поверхности золота отмечаются отпечатки граней или поверхностей вмещающих минералов (см. рис. 7). Пробность золота-II варьирует в более широком диапазоне – от 925,6 до 968,4 %, в среднем 945,3 %. Главная примесь – Ag, основные примеси: Cu (среднее содержание 0,04 %); Ві (0,05 %); Те (0,04 %). Суммарная доля примесей в среднем составляет 0,19 %.

Таким образом, характерной особенностью золота Шаманского узла является стабильное присутствие среди микропримесей Те, Вi, Sb. Это подтверждается и данными электронного микрозондового анализа (в золоте фиксируются низкие, но стабильные по частоте встречаемости примеси Вi и Te), и высокими коэффициентами корреляции Au c Sb, Te, Bi в кварце по данным пробирно-атомно-абсорбционного анализа.

Изотопно-геохронологические исследования. Работы по <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar датированию выполнялись по серициту из пробы-протолочки № 309, отобранной из кварцевой жилы с видимым золотом, пиритом и порошковатыми гидроокислами железа, вероятно, по железистому карбонату (рис. 9). <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar геохронологические исследования методом ступенчатого прогрева проводились по методике, описанной в [16].

Минералы для <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar изотопно-геохронологических исследований выделялись с использованием стандартных методик магнит-



Руды и металлы № 4/2022, c. 54–77 / Ores and metals № 4/2022, p. 54–77 DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10022



Рис. 8. Характер выделения золота: *а* – эмульсионная вкрапленность золота и включения халькопирита в полуокисленном пирите; *b* – эмульсионная вкрапленность золота в полуокисленном пирите:

Сру – халькопирит; остальные усл. обозн. см. рис. 6, 7

Cpy – chalcopyrite; other conv. designation see fig. 6, 7

ной и плотностной сепарации. Навески минеральных фракций совместно с навесками биотита MCA-11 (ОСО № 129-88), используемого в качестве монитора, заворачивались в алюминиевую фольгу, помещались в кварцевую ампулу и после откачки из неё воздуха запаивались. Биотит MCA-11, подготовленный ВИМС в 1988 г. как стандартный К/Аг образец, был аттестован в качестве <sup>40</sup>Аг/<sup>39</sup>Аг монитора с помощью международных стандартных образцов мусковита Bern 4m, биотита LP-6 [10].

В качестве интегрального возраста биотита MCA-11 принято среднее результатов калибровки, составившее  $311,0 \pm 1,5$  млн лет. Особенностью методики является облучение кварцевых ампул с пробами в охлаждаемом водой канале исследовательского реактора ФТИ ТПУ (г. Томск). При облучении в таких условиях температура ампул с образцами не превышает 100 °С. Градиент нейтронного потока не превышал 0,5 % в размере образца. Эксперименты по ступенчатому прогреву проводились в кварцевом реакторе с печью внешнего прогрева. Холостой опыт по  ${}^{40}$ Ar (10 мин при 1200 °C) не превышал 5 × 10<sup>-10</sup> нсм<sup>3</sup>. Очистка аргона производилась с помощью Ti- и ZrAl SAES-геттеров. Изотопный состав аргона измерялся на масс-спектрометре Noble gas 5400 фирмы Micromass UK Ltd (Великобритания) и на многоколлекторном масс-спектрометре Argus фирмы GV-Instruments (Великобритания). Ошибки измерений, приведённые в тексте и на рисунках, соответствуют интервалу ± 1 о.

Графические результаты <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar геохронологических исследований представлены в виде графика (рис. 10). Несмотря на некоторую неопределённость в интерпретации, можно сделать вывод о раннекарбоновом возрасте серицита из золотоносного кварцевого прожилка. На этом возрастном этапе в пределах Алтае-Саянской складчатой области и её центральной части проявлен коллизионный позднедевонско-раннекарбоновый этап. Наличие орогенных событий этого возраста в пределах Кизасско-Анзасского района подчёркивается широким развитием разломов, секущих кале-

Fig. 8. Nature of gold segregation: *a* – emulsion disseminated gold and inclusions of chalcopyrite in semi-oxidized pyrite; *b* – emulsion disseminated gold in semi-oxidized pyrite:




### Рис. 9. Самородное золото, окисленный пирит и серицит-парагонитовые обособления в рудном кварце:

Fe-carb – железистый карбонат, Mu – мусковит, Pr – парагонит; остальные усл. обозн. см. рис. 6, 7

### Fig. 9. Native gold, oxidized pirite and sericite-paragonite segregations in ore quartz:

Fe-carb – ferruginous carbonate; Mu – muscovite; Pr – paragonite; other conv. designation see fig. 6, 7

донские складчатые структуры, а также дайками и мелкими массивами козёрского габбро-гранитного комплекса.

Анализ материалов о геологическом строении, россыпной и коренной золотоносности Шаманского узла позволяет выделить два типа золотого оруденения – в золото-сульфиднокварцевых жилах и пирит-кварц-серицит-анкеритовых метасоматитах, насыщенных золотосульфидно-кварцевыми жилами и прожилками. Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что сами по себе золото-сульфиднокварцевые жилы, несмотря на широкое распространение и часто высокое содержание золота, не представляют промышленного интереса. Это связано с их небольшой мощностью (обычно 0,1-0,3 м), протяжённостью (обычно первые десятки метров) и их недостаточным для образования месторождений количеством даже на участках интенсивных тектонических деформаций. Распределение золота в жильной массе крайне неравномерное. Концентрация кварцевых жил наблюдается в зонах пересечения тектонических зон различных направлений, преимущественно в песчаниках и туфопесчаниках.



Рис. 10. Результаты <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar изотопного датирования по серициту из пробы-протолочки № 309 (кварцевая жила с видимым золотом, пиритом и лимонитом)

Fig. 10. Results of  ${}^{40}\text{Ar}/{}^{39}\text{Ar}$  isotopic dating of sericite from sample no. 309 (quartz vein with visible gold, pyrite, and limonite)

Основные закономерности локализации и модель формирования золотого и золотосодержащего оруденения Шаманского узла. Минерализованные зоны в метасоматитах пирит-кварц-серицит-анкеритового состава мощностью до 100 м и протяжённостью до 1,5 км, насыщенные прожилками и жилами золотосульфидно-кварцевого состава представляют собой более перспективный тип золотого оруденения. Содержание золота в метасоматитах составляет, как правило, 0,007-0,1 г/т, иногда до 0,3 г/т. На участках интенсивного окварцевания и сульфидизации метасоматитов содержание золота повышается до 1–5 г/т. В пределах Шаманского узла в метасоматитах установлены рудные зоны мощностью до 20-50 м с содержанием золота 0,5-3 г/т (участки Покосный, Кизасский). В рудных телах такого типа золото находится как в метасоматитах, так и в кварц-сульфидных прожилках.

Закономерности распространения золотого и золотосодержащего оруденения Шаманского узла определяются сочетанием ряда металлогенических факторов. Наиболее важное



значение имеют литолого-стратиграфический и структурно-тектонический факторы. Литолого-стратиграфический фактор выражен отчётливой приуроченностью признаков золотоносности к туфогенно-терригенным породам шаманской свиты, которые, по сути, являлись коллектором для благородных и цветных металлов. Структурно-тектонический фактор выражен локализацией золотой минерализации в зонах складчато-разрывных дислокаций. К линейным зонам рассланцевания северовосточного простирания приурочены протяжённые рудоконтролирующие зоны золотоносных пирит-кварц-серицит-анкеритовых метасоматитов. Концентрация золотого оруденения наблюдается в зонах пересечения разновозрастных разрывных нарушений различных направлений внутри метасоматитов.

На основе имеющихся и вновь полученных геологических, минералогических, изотопногеохимических и изотопно-геохронологических данных разработана модель, отражающая основные закономерности формирования золотого оруденения Шаманского узла. В развитии золотого оруденения узла выделяются три этапа – раннекембрийский (энсиматический островодужный), позднекембрийско-раннеордовикский (орогенный-1 аккреционноколлизионный) и девонско-раннекарбоновый (орогенный-2 транспрессионно-коллизионный).

Раннекембрийский островодужный этап (541-517 млн лет). Формирование золоторудного потенциала Шаманского узла во многом связано с раннекембрийским энсиматическим островодужным магматизмом. На этом этапе происходило образование вулканогенных комплексов пород с повышенным содержанием рудных элементов Au, Ag, Zn, Pb, Cu, Fe. Об обогащении пород металлами свидетельствуют многочисленные первичные и вторичные геохимические аномалии этих элементов, проявления и пункты минерализации в породах нижне- и верхнемонокской свит. С островодужным магматизмом связано формирование золото-сульфидно-кварцевого типа оруденения в расположенном рядом Анзасском узле и золотосодержащего колчеданно-полиметаллического – в Джарганском (см. рис. 1), сложенных преимущественно раннекембрийскими островодужными вулканогенно-осадочными породами.

Раннекембрийские породы шаманской свиты рассматриваются как рудоматеринский комплекс для последующего развития золотого оруденения Шаманского узла. Предполагается, что их формирование происходило в небольшом осадочном бассейне, в нижних частях склона островной дуги или в межостровной депрессии, сопряжённом с зоной активного вулканизма. Повышенная золотоносность пород связана с близостью к участкам активного примитивного вулканизма, разрушением уже сформированных островодужных вулканитов с повышенным содержанием золота и цветных металлов и гидротермальной деятельностью, связанной с магматизмом. Об этом свидетельствуют повышенное содержание Аи в породах шаманской свиты на уровне 0,005-0,02 г/т и площадная приуроченность к ним геохимических аномалий и пунктов минерализации золота. При этом в поле пород шаманской свиты золото распределено неравномерно. Вероятно, на отдельных участках накопления вулканогенно-терригенных осадков, за счёт разрушения высоко обогащённых золотом вулканитов, формировались линзы и пласты с содержанием Аи на уровне 0.01-0.09 г/т.

Позднекембрийско-раннеордовикский аккреционно-коллизионный (орогенный-1) этап (510-450 млн лет). На орогенном-1 этапе в условиях аккреции островодужной системы с окраиной микроконтинента (континента) произошёл метаморфизм пород шаманской свиты на уровне зеленосланцевой фации и становление линейных складчатых структур в условиях интенсивного сжатия. С поздней стадией данной орогении связано скучивание отдельных блоков, формирование зон рассланцевания, кливажа. Именно в этот период образовались наиболее крупные разломы и надвиги северо-восточного простирания. Вероятно, с этим этапом связано возникновение пириткварц-серицит-анкеритовых метасоматитов, золотоносных кварцевых жил и прожилков.

РУДЫ © МЕТАЛЛЫ

Характерно развитие кварцевых жил и прожилков северо-восточного направления и седловидных жил в замках складок внутри зон бурошпатизированных пород. Предполагается, что в это время произошло разрушение пирита, обогащённого золотом, и его высвобождение с перераспределением в метасоматитах и концентрацией в кварцевых прожилках в условиях повышения температуры и давления. Концентрация кварцевых жил в песчаниках и туффитах шаманской свиты связана с их бо́льшей хрупкостью по сравнению с алевролитами и сланцами. Содержание золота в кварцевых жилах в значительной степени определяется уровнем золотоносности вмещающих пород шаманской свиты. Максимальная золотоносность наблюдается в тех кварцевых жилах, которые по зонам складчато-разрывных деформаций локализуются в бурошпатизированных метасоматитах среди изначально обогащённых золотом пород.

Девонско-раннекарбоновый транспрессионно-коллизионный (орогенный-2) этап (380-345 млн лет). Финальный этап формирования рудной золотоносности Шаманского узла связан с орогенезом на уровне позднего девона раннего карбона. Тогда происходила коллизия Казахстанско-Байкальского и Сибирского континентов со становлением Чарышско-Теректинско-Улаганско-Саянской сутурно-сдвиговой зоны [3]. Деформации пород Шаманского узла вызваны сдвиговыми движениями вдоль Северо-Саянского регионального разлома. С этим этапом в пределах рудного узла связано образование системы разломов северо-северозападного простирания, секущих к структурам северо-восточного направления раннеорогенного этапа. На позднедевонско-раннекарбоновом этапе происходили повторный локальный метаморфизм с диафторезом и возникновение вдоль крупных сдвигов даек основного состава и мелких тел гранитоидов козёрского комплекса.

В этот период вдоль зон трещиноватости и разломов северо-северо-западного простирания формировались кварцевые жилы, которые также являются золотоносными на тех участках, где пересекают породы ранее обогащённые золотом, – золотоносные терригенные породы шаманской свиты, пирит-кварц-серицит-анкеритовые метасоматиты и участки с кварцевыми прожилками, образовавшимися на раннем орогенном этапе.

Таким образом, результаты проведённых исследований указывают на определяющую роль метаморфизма и складчато-разрывных деформаций в возникновении золотого оруденения Шаманского узла и подтверждают отнесение последнего к орогенному типу золотых месторождений. О возможной принадлежности некоторых месторождений восточной части Алтае-Саянской складчатой области к орогенному типу отмечалось ранее в работах Н. А. Горячева [5]. Обоснованные этапы развития золотого оруденения Шаманского узла хорошо корреспондируются с основными этапами тектоно-магматической [2, 4, 8] и металлогенической эволюции [12] западной части Алтае-Саянской складчатой области. Вывод о схожести золотого оруденения Шаманского узла с типичными орогенными месторождениями требует пересмотра использованных ранее прогнозно-поисковых моделей и методики поисковых работ для всего Кизасско-Анзасского рудного района. Многие неудачи ранее проводимых поисков золотого оруденения в Шаманском узле объясняются тем, что закономерности его формирования учитывались в недостаточной степени.

Заключение. Шаманский золоторудно-россыпной узел расположен в центральной части Кизасско-Анзасского полиметаллически-железо-золоторудно-россыпного района. В пределах рудного района Шаманский узел приурочен к зоне максимальных складчато-разрывных деформаций пород шаманской свиты и имеет сложное складчато-блоковое строение. Выделяются системы разломов северо-восточного и северо-северо-западного направлений, к которым приурочены зоны метасоматитов и интенсивного жильно-прожилкового окварцевания.

Анализ признаков золотоносности позволил выделить два типа золото-сульфиднокварцевого оруденения – в разнонаправленных жилах нескольких генераций и в зонах



Руды и металлы № 4/2022, c. 54–77 / Ores and metals № 4/2022, p. 54–77 DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10022

пирит-кварц-серицит-анкеритовых метасоматитов, насыщенных золото-сульфидно-кварцевыми прожилками.

Изотопно-геохимические данные свидетельствуют о том, что сера сульфидов, ассоциирующих с золотым оруденением Шаманского узла, имеет гидротермально-осадочное происхождение. При этом по параметрам изотопно-геохимической зональности выявленная на площади золото-сульфидная минерализация в полной мере сопоставима с эталонными месторождениями сухоложского типа. Таким образом, полученные данные подтверждают предположение о связи повышенной золотоносности пород шаманской свиты с конседиментационными гидротермальными системами и их принадлежности к орогенному типу.

В пределах узла в кварцевых жилах и в россыпях часто встречается видимое золото в ассоциации с сульфидами (пирит, халькопирит) и анкеритом. Для золота характерна пробность на уровне 880–950 ‰ и примеси Аg, Cu, Bi и Te. Анализ состава и морфологии золота позволяет предполагать наличие двух его генераций. Пирит в ассоциации с золотом характеризуется повышенным содержанием As.

Изотопно-геохронологическое изучение серицита из золотоносной кварцевой жилы Ar-Ar методом показало возраст на уровне 338,7– 359,5 млн лет, что отвечает границе позднего девона и раннего карбона.

Закономерности распространения золотого оруденения Шаманского узла определяются, в первую очередь, литолого-стратиграфическим и структурно-тектоническим металлогеническими факторами. Породы шаманской свиты являются рудоматеринскими для дальнейшего формирования золотого оруденения. Структурно-тектонический фактор выражен локализацией золотой минерализации в зонах складчато-разрывных дислокаций. К линейным зонам рассланцевания северо-восточного простирания приурочены протяжённые рудоконтролирующие зоны золотоносных пирит-кварц-серицит-анкеритовых метасоматитов. Концентрация золотого оруденения наблюдается в зонах пересечения разновозрастных разрывных нарушений различных направлений внутри метасоматитов.

На основе анализа комплекса геологических, металлогенических, минералогических, изотопно-геохимических и изотопно-геохронологических данных обоснован вывод о трёхэтапном формировании золотого оруденения Шаманского узла. Первый – раннекембрийский – связан с образованием пород шаманской свиты в энсиматических островодужных условиях и первичным обогащением терригенных осадков золотом. Второй - позднекембрийско-раннеордовикский раннеорогенный - сопряжён с метаморфизмом пород шаманской свиты, их интенсивными складчаторазрывными деформациями, образованием зон рассланцевания и золотоносных пириткварц-серицит-анкеритовых метасоматитов, насыщенных золото-сульфидно-кварцевыми прожилками. К третьему – позднеорогенному этапу – относятся девонско-раннекарбоновая деформация пород Шаманского узла, развитие секущих северо-северо-западных разломов и сопряжённых с ними кварцевых жил.

### Список литературы

 Арсентьева И. В., Брысин М. П., Черных А. И., Гвоздева И. А. Перспективы золотоносности Анзас-Кизасской площади (Республика Хакасия) // Сборник тезисов докладов VIII Международной научно-практической конференции «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов». – М. : ЦНИГРИ, 2018. – С. 40–41.

 Бабин Г. А., Шокальский С. П. Основные черты геологического строения Алтае-Саянской складчатой области (тектоническое районирование, стратиграфия, магматизм, история геологического развития) // Геология и минераль-



но-сырьевые ресурсы Сибири. – 2017. – № 6. – С. 19–37.

- Буслов М. М. Тектоника и геодинамика Центрально-Азиатского складчатого пояса: роль позднепалеозойских крупноамплитудных сдвигов // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 1. С. 66–90.
- Буслов М. М., Джен Х., Травин А. В. [и др.]. Тектоника и геодинамика Горного Алтая и сопредельных структур Алтае-Саянской складчатой области // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, № 10. – С. 1600–1627.
- 5. *Горячев Н. А*. Благороднометалльный рудогенез и мантийно-коровое взаимодействие // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 2. С. 323–332.
- Конышев В. О., Горелов А. Г. Информационнометодические аспекты прогноза крупнообъёмных месторождений с бонанцами золота в золотороссыпных районах Алтае-Саянской провинции // Геоинформатика. – 2016. – № 3. – С. 17–28.
- Кряжев С. Г. Генетические модели и критерии прогноза золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах : специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения» : автореф. дис. на соискание учён. степ. д-ра геол.минерал. наук / Кряжев Сергей Гаврилович. – М.: ЦНИГРИ, 2017. – 52 с.
- Руднев С. Н., Бабин Г. А., Пономарчук В. А., Травин А. В., Левченков О. А., Макеев А. Ф., Телешев А. Е., Шелепаев Р. А., Плоткина Ю. В. Состав и возрастные рубежи формирования гранитоидов Западного Саяна // Литосфера. – 2009. – № 1. – С. 23–46.
- Русинов В. Л., Русинова О. В., Кряжев С. Г., Щегольков Ю. В., Алышева Э. И., Борисовский С. Е. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50, № 1. – С. 1–44.

### References

 Arsent'eva I. V., Brysin M. P., Chernykh A. I., Gvozdeva I. A. Perspektivy zolotonosnosti Anzas-Kizasskoi ploshchadi (Respublika Khakasiya) [Prospects of gold bearing of Anzas-Kizasskaya square

- Травин А. В., Юдин Д. С., Владимиров А. Г., Хромых С. В., Волкова Н. И., Мехоношин А. С., Колотилина Т. Б. Термохронология Чернорудской гранулитовой зоны (Ольхонский регион, Западное Прибайкалье) // Геохимия. – 2009. – № 11. – С. 1181–1199.
- 11. Устинов В. И., Гриненко В. А. Прецизионный масс-спектральный метод определения изотопного состава серы. М. : Недра, 1965. 96 с.
- 12. Черных А. И. Металлогенические эпохи формирования золотого и золотосодержащего оруденения западной части Алтае-Саянской минерагенической провинции // Тезисы XX научной конференции «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса: от океана к континенту». – Иркутск, 2022. – (В печати).
- Черных А. И., Арсентьева И. В., Брысин М. П. Минерально-сырьевая база коренного золота Республики Хакасии – состояние и направления её развития // Отечественная геология. – 2018. – № 2. – С. 12–21.
- 14. Черных А. И., Окулов А. В, Арсентьева И. В., Кряжев С. Г., Позднякова Н. Н. Золотоносность Шаманского рудного узла Кизас-Анзасского рудного района (Республика Хакасия) // Сборник тезисов докладов XI Международной научно-практической конференции «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов». – М. : ЦНИГРИ, 2022. – С. 243–246.
- 15. Ячевский Л. Геологические наблюдения в районе золотых промыслов по р. Большому Кызасу // Геологические исследования в золотоносных областях Сибири. Енисейский золотоносный район. – СПб., 1909. – Вып. VIII. – С. 1–27.
- Baksi A. K., Archibald D. A., Farrar E. Intercalibration of <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating standarts // Chemical Geology. 1996. V. 129. P. 307–324.

(Republic of Khakasia)], Sbornik tezisov dokladov VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Nauchno-metodicheskie osnovy prognoza, poiskov, otsenki mestorozhdenii almazov, bla-



Руды и металлы № 4/2022, c. 54–77 / Ores and metals № 4/2022, p. 54–77 DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10022

gorodnykh i tsvetnykh metallov" [Collection of abstracts of the VIII International scientific and practical Conference "Scientific and methodological foundations of forecasting, prospecting, evaluation of deposits of diamonds, precious and non-ferrous metals"], Moscow, TsNIGRI Publ., 2018, pp. 40–41.

- Babin G. A., Shokal'skii S. P. Osnovnye cherty geologicheskogo stroeniya Altae-Sayanskoi skladchatoi oblasti (tektonicheskoe raionirovanie, stratigrafiya, magmatizm, istoriya geologicheskogo razvitiya) [The main features of the geological structure of the Altai-Sayan folded region (tectonic zoning, stratigraphy, magmatism, history of geological development)], Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri [Geology and mineral resources of Siberia], 2017, No 6, pp. 19–37. (In Russ.).
- Buslov M. M. Tektonika i geodinamika Tsentral'no-Aziatskogo skladchatogo poyasa: rol' pozdnepaleozoiskikh krupnoamplitudnykh sdvigov [Tectonics and geodynamics of the Central Asian folded belt: the role of Late Paleozoic large-amplitude shifts], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics*], 2011, V. 52, No 1, pp. 66–90. (In Russ.).
- Buslov M. M., Dzhen Kh., Travin A. V. [et al.]. Tektonika i geodinamika Gornogo Altaya i sopredel'nykh struktur Altae-Sayanskoi skladchatoi oblasti [Tectonics and geodynamics of the Altai Mountains and adjacent structures of the Altai-Sayan folded region], Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics], 2013, V. 54, No 10, pp. 1600–1627. (In Russ.).
- Goryachev N. A. Blagorodnometall'nyi rudogenez i mantiino-korovoe vzaimodeistvie [Noble-metal ore genesis and mantle-crustal interaction], *Geologiya i geofizika* [*Russian Geology and Geophysics*], 2014, V. 55, No 2, pp. 323–332. (In Russ.).
- Konyshev V. O., Gorelov A. G. Informatsionnometodicheskie aspekty prognoza krupnoob"emnykh mestorozhdenii s bonantsami zolota v zolotorossypnykh raionakh Altae-Sayanskoi provintsii [Information and methodological aspects of forecasting large-volume deposits with gold bonants in the gold-bearing areas of the Altai-Sayan province], *Geoinformatika* [*Geoinformatics*], 2016, No 3, pp. 17–28. (In Russ.).
- 7. Kryazhev S. G. Geneticheskie modeli i kriterii prognoza zolotorudnykh mestorozhdenii v uglerodisto-terrigennykh kompleksakh [Genetic models and prediction criteria for gold deposits in carbon-

terrigenous complexes: Extended abstract of Doctor's thesis], Moscow, TsNIGRI Publ., 2017, 52 p.

- Rudnev S. N., Babin G. A., Ponomarchuk V. A., Travin A. V., Levchenkov O. A., Makeev A. F., Teleshev A. E., Shelepaev R. A., Plotkina Yu. V. Sostav i vozrastnye rubezhi formirovaniya granitoidov Zapadnogo Sayana [Composition and age boundaries of the formation of granitoids of the Western Sayan], *Litosfera* [*Lithosphere*], 2009, No 1, pp. 23–46. (In Russ.).
- Rusinov V. L., Rusinova O. V., Kryazhev S. G., Shchegol'kov Yu. V., Alysheva E. I., Borisovskii S. E. Okolorudnyi metasomatizm terrigennykh uglerodistykh porod v Lenskom zolotorudnom raione [Near-ore metasomatism of terrigenous carbonaceous rocks in the Lena gold ore district], Geologiya rudnykh mestorozhdenii [Geology of Ore Deposits], 2008, V. 50, No 1, pp. 1–44. (In Russ.).
- Travin A. V., Yudin D. S., Vladimirov A. G., Khromykh S. V., Volkova N. I., Mekhonoshin A. S., Kolotilina T. B. Termokhronologiya Chernorudskoi granulitovoi zony (Ol'khonskii region, Zapadnoe Pribaikal'e) [Thermochronology of the Chernorud granulite zone (Olkhon region, Western Baikal region)], *Geokhimiya* [*Geochemistry*], 2009, No 11, pp. 1181–1199. (In Russ.).
- Ustinov V. I., Grinenko V. A. Pretsizionnyi massspektral'nyi metod opredeleniya izotopnogo sostava sery [Precision mass-spectral method for determining the isotopic composition of sulfur], Moscow, Nedra Publ., 1965, 96 p.
- 12. Chernykh A. I. Metallogenicheskie epokhi formirovaniya zolotogo i zolotosoderzhashchego orudeneniya zapadnoi chasti Altae-Sayanskoi mineragenicheskoi provintsii [Metallogenic epochs of the formation of gold and gold-bearing mineralization of the western part of the Altai-Sayan minerogenic province], Tezisy XX nauchnoi konferentsii "Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentral'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa: ot okeana k kontinentu" [Abstracts of the XX scientific conference "Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt: from the ocean to the continent"], Irkutsk, 2022. (In print).
- Chernykh A. I., Arsent'eva I. V., Brysin M. P. Mineral'no-syr'evaya baza korennogo zolota Respubliki Khakasii – sostoyanie i napravleniya ee razvitiya [Mineral resource base of indigenous gold of the



Republic of Khakassia – state and directions of its development], *Otechestvennaya geologiya* [*National Geology*], 2018, No 2, pp. 12–21. (In Russ.).

14. Chernykh A. I., Okulov A. V, Arsent'eva I. V., Kryazhev S. G., Pozdnyakova N. N. Zolotonosnost' Shamanskogo rudnogo uzla Kizas-Anzasskogo rudnogo raiona (Respublika Khakasiya) [Gold content of the Shaman ore node of the Kizas-Anzassky ore district (Republic of Khakassia)], Sbornik tezisov dokladov XI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Nauchno-metodicheskie osnovy prognoza, poiskov, otsenki mestorozhdenii almazov, blagorodnykh i tsvetnykh metallov" [Collection of abstracts of the XI International scientific and practical Conference "Scientific and methodological

Авторы

### Черных Александр Иванович

кандидат геолого-минералогических наук генеральный директор ЦНИГРИ chernykh@tsnigri.ru

### Окулов Алексей Вячеславович

кандидат геолого-минералогических наук заместитель начальника отдела okulov@tsnigri.ru

### Кряжев Сергей Гаврилович

доктор геолого-минералогических наук начальник отдела kryazhev@tsnigri.ru

### Арсентьева Ирина Викторовна

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

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва, Россия foundations of forecasting, prospecting, evaluation of diamond deposits, precious and non-ferrous metals"], Moscow, TsNIGRI Publ., 2022, pp. 243–246. (In Russ.).

- 15. Yachevskii L. Geologicheskie nablyudeniya v raione zolotykh promyslov po r. Bol'shomu Kyzasu [Geological observations in the area of non-gold mines along the Bolshoy Kyzas River], Geologicheskie issledovaniya v zolotonosnykh oblastyakh Sibiri. Eniseiskii zolotonosnyi raion [Geological research in the gold-bearing regions of Siberia. Yenisei gold-bearing area], Saint-Petersburg, 1909, V. VIII, pp. 1–27.
- Baksi A. K., Archibald D. A., Farrar E. Intercalibration of <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating standarts, *Chemical Geology*, 1996, V. 129, pp. 307–324.

### Authors

### Alexander I. Chernykh

PhD in Geology and Mineralogy Director General of TsNIGRI chernykh@tsnigri.ru

### Alexey V. Okulov

PhD in Geology and Mineralogy Deputy Head of Department okulov@tsnigri.ru

### Кряжев Сергей Гаврилович

D. Sc. in Geology and Mineralogy Head of Department kryazhev@tsnigri.ru

### Арсентьева Ирина Викторовна

PhD in Geology and Mineralogy Senior Researcher arsenteva@tsnigri.ru

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

# **ІV** рудная школа цнигри

## 15–17 февраля

Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов

# ОТ ПРОГНОЗА К ДОБЫЧЕ

Организатор конференции – ФГБУ «ЦНИГРИ».

Принимаются заявки от студентов, аспирантов, молодых учёных и специалистов в возрасте до 35 лет.

На конференции запланировано проведение лекций ведущими специалистами академических и отраслевых институтов.

Конференция пройдёт в смешанном формате: докладчики будут иметь возможность выступить в зале конференций ФГБУ «ЦНИГРИ», для тех, кто не сможет приехать, доступно выступление в прямом эфире. Все лекции и выступления будут транслироваться онлайн.

### НАПРАВЛЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ



Металлогения, минерагения и рудогенез



Прогноз, поиски, оценка и разведка месторождений полезных ископаемых



Разработка прогнозно-поисковых и геолого-генетических моделей месторождений твёрдых полезных ископаемых



Методы изучения вещественного состава пород и руд



Физико-химические условия минералообразования



Геолого-экономическая оценка месторождений полезных ископаемых и участков недр



Использование геоинформационных технологий и пространственных данных в геологической отрасли



Современные технологии добычи и переработки минерального сырья





8(495) 315-43-47, секретарь конференции Костина Елизавета Дмитриевна



### До 30 декабря 2022 г.

регистрация и подача тезисов на сайте www.young.tsnigri.ru

Организационный взнос с участников не взимается.

Рабочий язык конференции – русский.



г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129 к. 1

### СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.44:553.07 (574.3)

# Особенности геологического строения и генезиса месторождения Дюсембай Центральный (Саяхат)

Geological features and genesis of the Dyusembay Central (Sayakhat) ore deposit

### Нуржанов Г. Ж., Кузнецов В. В., Ниценко П. А., Кудрявцева Н. Г., Кузнецова Т. П., Мурзагулов М. М.

Рассмотрено геологическое строение и вещественный состав руд свинцово-цинкового месторождения Дюсембай Центральный (Саяхат) в Карсакпайском металлогеническом комплексе (Центральный Казахстан), который исторически рассматривался промышленно значимым не по свинцу, цинку, меди, а в основном по железу. Показано, что в геологическом строении месторождения принимают участие туфогенные, алевропесчаниковые, углеродисто-терригенные (рудовмещающие), терригенные и вулканогенные образования (нижняя подсвита жиландысайской свиты верхнего протерозоя). Выявленные и оконтуренные субвулканические породы относятся к жерловым фациям и представлены автомагматическими брекчиями кислого состава. Все комплексы пород претерпели многократные изменения: региональные, поствулканические, контактовые и гидротермальные (околорудные). Промышленные руды представлены прожилково-вкрапленной сульфидной минерализацией в углеродистых алевроаргиллитах и алевропесчаниках, в разной степени регионально и метасоматически изменённых. Рудные залежи сложены гетерогенными минеральными ассоциациями, отвечающими различным этапам и стадиям рудообразования. Состав и структурно-текстурные особенности руд отражают сложную и длительную историю их формирования. Сделан вывод, что месторождение относится к новому формационному типу стратифицированных прожилково-вкрапленных свинцово-цинковых месторождений, локализованных в черносланцевых толщах при значительной роли вулканической активности и регионального метаморфизма, и является ремобилизованным месторождением типа SEDEX.

Ключевые слова: месторождение Дюсембай Центральный (Саяхат), жиландысайская свита, углеродисто-терригенная (рудовмещающая) пачка, метаморфизм, свинец, цинк, палеодепрессия, рудообразование.

### Nurzhanov G. Zh., Kuznetsov V. V., Nitsenko P. A., Kudryavtseva N. G., Kuznetsova T. P., Murzagulov M. M.

The article considers the geological features and ore composition of the Dyusembay Central (Sayakhat) leadzinc deposit in the Karsakpai metallogenic complex in the Central Kazakhstan. Historically, the complex was considered industrially significant in terms of iron ores, rather than of lead, zinc, and copper. It is shown that the ore deposit is composed of tuffaceous, silty-sandstone, carbonaceous-terrigenous (ore-hosting), terrigenous, and volcanogenic rocks assigned to the lower subformation of the Zhilandysai Formation of the Upper Proterozoic. The subvolcanic rocks identified and outlined in the area of the ore deposit belong to vent volcanic facies and are represented by felsic automagmatic breccias. All the rock complexes developed within the deposit have undergone multiple alterations: the regional, postvolcanic, contact, and hydrothermal (near-ore) ones. Commercial ores are represented by veinlet-disseminated sulfide mineralization in carbonaceous mudstones and silty sandstones, regionally and metasomatically altered to varying degrees. The ore bodies are composed of heterogeneous mineral assemblages corresponding to various stages and phases of the ore formation. The composition and structural and textural features of the ores reflect the long and complicated history of their formation. It is concluded that this ore deposit belongs to a new formational type of veinlet-disseminated stratified lead-zinc deposits localized in black shale sequences, with a significant role of volcanic activity and regional metamorphism, and is a remobilized SEDEX-type ore deposit.

Key words: Dyusembay Central (Sayakhat) deposit, Zhilandysai Formation, carbonaceous-terrigenous (orehosting) member, metamorphism, ore, lead, zinc, paleodepression, ore formation.

For citation: Nurzhanov G. Zh., Kuznetsov V. V., Nitsenko P. A., Kudryavtseva N. G., Kuznetsova T. P., Murzagulov M. M. Geological features and genesis of the Dyusembay Central (Sayakhat) ore deposit. Ores and metals, 2022, № 4, pp. 79–101. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10023

Для цитирования: Нуржанов Г. Ж., Кузнецов В. В., Ниценко П. А., Кудрявцева Н. Г., Кузнецова Т. П., Мурзагулов М. М. Особенности геологического строения и генезиса месторождения Дюсембай Центральный (Саяхат). Руды и металлы. 2022. № 4. С. 79–101. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10023



Месторождение Дюсембай расположено в пределах сложнодислоцированного Майтюбинского антиклинория с сочетанием разноамплитудных синклинальных и антиклинальных складок второго порядка, осложнённых складчатостью третьего и более высоких порядков с системами зон разрывных нарушений различной кинематики на сопряжении с Карсакпайским региональным прогибом Улутау-Аргантинской зоны [2, 5, 10].

В строении района месторождения принимают участие вулканогенно-терригенно-туфогенные и туфогенно-терригенные комплексы пород нижнего протерозоя и рифея, представленные толщами порфиритоидов, порфироидов (кварцевых порфиров, фельзитов), лавоагломератов кислых эффузивов и их пирокластических аналогов с редкими прослоями основных эффузивов (реже базальтоидов), графитистых и железистых кварцитов, микрокварцитов, кварцитовидных песчаников и конгломератовидных кварцитов, филлитов (графитистых сланцев, кварцитов и кварцитовидных сланцев, а также хлоритовых, серицитовых и хлорит-серицитовых сланцев). Эти образования слагают толщи и пачки с неодинаковым, но близким по составу набором пород с преобладанием лавовых и пирокластических аналогов андезит-дацит-риолитового вулканизма с различными объёмами терригенных и туфогенных образований в толщах рифея [11, 12].

Среди всех разновозрастных стратифицированных толщ установлены углеродсодержащие фации флишоидного строения с горизонтами карбонатных фаций, благоприятные для локализации как колчеданно-полиметаллической, медно-колчеданной, свинцово-цинковой прожилково-вкрапленной, так и золоторудной минерализации.

Эти комплексы слагают флишоидную (углеродисто-терригенную, углеродисто-кремнисто-терригенную) и вулканогенно-сланцевую (базальт-дацит-риолитовую с субвулканическими телами) толщи. Дацит-риолитовые фации и комагматичные им субвулканические тела слагают вулкано-плутонические структуры, в том числе и предполагаемые на месторождении Дюсембай. В палеоструктурном плане месторождение приурочено к рифтогенному прогибу с накоплением вулканогенно-углеродисто-терригенной формации (лавы, кристалло- и литокластические туфы, туфогенные песчаники, алевропесчаники, алевролиты, кварциты, в том числе их углеродистые разности с рассеянной вкрапленностью сульфидов железа (преимущественно пирита и пирротина).

Район месторождения Дюсембай Центральный (рис. 1) сложен структурно-вещественными комплексами со стратифицированными толщами верхнего протерозоя, включая сланцевую толщу флишоидного строения с графитистыми и кремнистыми сланцами, графитовыми филлитами, кварцитами, мраморами, железистыми кварцитами, бластопсаммитовыми серицит-биотит-полевошпатовыми сланцами, серицит-полевошпат-кварцевыми и хлоритсерицит-полевошпатовыми сланцами, горизонтами базальтовых порфиритов, порфироидами по литокристаллокластическим туфам и лавам дацит-риолитового состава. Углеродсодержащие фации с горизонтами карбонатных фаций благоприятны для локализации стратоидных рудных залежей с колчеданно-полиметаллической и свинцово-цинковой жильно-прожилково-вкрапленной минерализацией. Накопление толщ проходило во впадинах, вблизи центров подводного вулканизма, которые характеризуются фациальной латерально-вертикальной изменчивостью накопления туфогенно-терригенных (песчано-алевроаргиллитовые, в том числе углеродсодержащие) толщ в прогибах с регрессивно-трансгрессивными циклами.

Стратифицированные толщи района месторождения деформированы разностадийными складчато-разрывными нарушениями различной амплитуды и кинематики (сбрососдвиги, сбросо-надвиги от пологонаклонного до крутонаклонного залегания) с дислоцированием гранитоидов фундамента и интрудированием телами диоритов, роговообманковых тоналитов, габбродиоритов и гранодиоритов [12].

Металлогения рудного района определяется наличием железорудных проявлений и мес-



# Рис. 1. Структурно-формационная схема района месторождения Дюсембай Центральный:

1 – аллювиальные отложения нерасчленённые;
2 – надрудные раннерифейско-вендские отложения;
3 – андезит-базальтовая формация; вулканогенноуглеродисто-терригенная формация, субформации:
4 – верхняя, 5 – нижняя; интрузивные породы: 6 – граниты, 7 – гранит-порфиры, 8 – граниты субщелочные, 9 – гранодиориты, 10 – сиениты, 11 – габброиды; 12 – рудопроявления; 13 – контур Дюсембаевского рудного узла

Рис. 1. Структурно-формационная схема района месторождения Дюсембай Центральный:

1 – alluvial deposits, undivided; 2 – supra-ore Early Riphean-Vendian rocks; 3 – andesite-basalt formation; volcanogenic-carbonaceous-terrigenous formation: 4 – upper subformation, and 5 – lower subformation; intrusive rocks: 6 – granites, 7 – granite-porphyries, 8 – subalkaline granites, 9 – granodiorites, 10 – syenites, and 11 – gabbroids; 12 – ore occurrences; 13 – Duysembay ore cluster

торождений, а также стратоидных рудопроявлений полигенно-полихронных свинцовоцинковых руд колчеданно-полиметаллической рудной формации в зонах метасоматитов березит-лиственитовой группы формаций среди вулканогенных и флишоидных толщ и свинцово-цинковых жильно-прожилковых и скарновых руд в терригенно-карбонатных толщах.

Высокая перспективность месторождения и ряд особенностей его геологического строения была показаны ранее в работах Г. Н. Нуржанова [8], Б. С. Хамзина и др. [13], Е. К. Исабаева [3], Е. К. Каримова [4] и других. Ниже приводятся материалы, полученные при изучении месторождения в период с 2019 г. по настоящее время.

В геологическом строении месторождения Дюсембай Центральный принимают участие отложения нижней подсвиты жиландысайской свиты верхнего протерозоя, которая в его пределах имеет пятичленное строение снизу вверх (рис. 2–4).

*Туфогенная пачка (1)* проявлена спорадически и представлена серыми, с зеленоватым





© Нуржанов Г. Ж., Кузнецов В. В., Ниценко П. А., Кудрявцева Н. Г., Кузнецова Т. П., Мурзагулов М. М., 2022 © Nurzhanov G. Zh., Kuznetsov V. V., Nitsenko P. A., Kudryavtseva N. G., Kuznetsova T. P., Murzagulov M. M., 2022



### Рис. 2. Схематическая литолого-фациальная карта месторождения:

верхний протерозой, жиландысайская свита без расчленения (PR<sub>2</sub>gl), фации пород: 1 – вулканитов околожерловой и промежуточной фации, 2 – вулканитов жерловой фации, 3 – углеродистых терригенных отложений; литологические разности: 5 – неяснослоистые туфогенные серые и светло-серые мелко-тонкозернистые песчаники; 6 – серые и тёмно-серые туфогенные алевролиты и алевроаргеллиты рассланцованные; 7 – серые и тёмно-серых алевроаргиллитов и мелкозернистых песчаники; 8 – тонкое и мелкое переслаивание (от первых см до 1 м) серых, светло-серых алевроаргиллитов и мелкозернистых песчаников; 9 – тёмно-серые до чёрных углеродисто-кремнистые алевроаргиллиты рассланцованные; 10 – лавы кислого состава: риолиты, риодациты; 11 – туфы кислого состава; 12 – автомагматические брекчии кислого состава: риолиты, риодациты; интрузивные образования: 13 – позднеордовикские интрузии: диориты, габбродиориты, гранодиориты; 14 – диориты, гранодиориты, граниты; 15 – контуры минерализованной зоны (на разрезе); 16 – проекция минерализованной зоны на горизонтальную поверхность; вторичные изменения: 17 – ороговикование, 18 – окварцевание; 24 – структурные линии; 25 – фациальные переходы; 26 – разрывные нарушения; 27 – линия разреза и её номер; скважины: 28 – на карте; 29 – на разрезе

#### Fig. 2. Schematic lithological and facies map of the deposit:

Upper Proterozoic, Zhilandysai Formation, undivided ( $PR_2gl$ ), lithological facies: 1 - near-vent and intermediate facies volcanics, 2 - vent facies volcanics, 3 - carbonaceous terrigenous deposits, and 4 - terrigenous deposits; lithological varieties: 5 - indistinctly laminated gray and light gray fine-grained tuffaceous sandstones; 6 - schistose gray and dark gray tuffaceous siltstones and mudstones; 7 - gray and dark gray tuffaceous silty sandstones; 8 - thin and fine interbedding (from a few cm to 1 m) of gray, light gray mudstones and fine-grained sandstones; 9 - schistose dark gray to black carbonaceous-siliceous mudstones; 10 - felsic lavas: rhyolites, rhyodacites; 11 - felsic tuffs; and 12 - automagmatic felsic breccias: rhyolites, rhyodacites; intrusive formations: 13 - Late Ordovician intrusions: diorites, gabbrodiorites, granodiorites; 14 - diorites, granodiorites, granites; 15 - contours of the mineralized zone (in cross-section); 16 - projection of the mineralized zone onto a horizontal surface; secondary alterations: 17 - hornfelses, and 18 - silicification; ore mineralization: 19 - galena, 20 - sphalerite, 21 - pyrite, and 22 - pyrrhotite; 23 - geological boundaries; 24 - structural lines; 25 - facial transitions; 26 - faults; 27 - cross-section line and its number; boreholes: 28 - on the map; 29 - on the cross-section

оттенком туфами кислого состава от мелко-среднеобломочных до крупнообломочных литокристаллокластических (рис. 5). Породы обломочной текстуры мелко- или крупнообломочной структуры. Обломки составляют 10-50 % объёма, они угловатой или окатанной формы, представлены кристаллами плагиоклаза, калиевого полевого шпата, кварца (размер 0,25-2,0 мм), кремнистых пород (до 4,0-5,0 мм). Основная масса мелкозернистая, состоит из кварца, полевых шпатов и чешуек мусковита. Последние развиты в виде как мелких, так и более крупных чешуек, образующих пятнистые выделения и скопления, приуроченные к зальбандам обломков кристаллов полевых шпатов. Основная масса существенно окремнена и серицитизирована.

Алевропесчаниковая пачка (2) представлена кварц-полевошпатовыми песчаниками, алевропесчаниками, кремнистыми, кремнистоглинистыми, глинистыми алевролитами с примесью вулканогенного материала. Все разности пород слоистые за счёт чередования слоёв различной зернистости. Отмечается рассланцевание всех разностей пород и их ороговикование. Указанные разности пород фациально замещают друг друга как по простиранию, так и по падению пачки. Наиболее характерная для пачки разновидность пород – туфогенные алевропесчаники.

Алевропесчаники (рис. 6) состоят из мелкозернистого кварца, полевых шпатов (размер от 0,02 до 0,2–0,3 мм) и чешуек мусковита (от 0,02 до 0,3–0,4 мм). Порода полосчатой



Формационная колонка	Мощность	Состав
	> 100 м	Вулканогенная пачка. Серые до тёмно-серых туфолавы, возможно, лавобрекчии риодацитового состава, порфировые, массивные. Также в пачке наблюдаются кислые лавы и туфы от мелкообломочных до крупнообломочных.
w	100–200 м	Терригенная пачка. Серые алевропесчаники, туфогенные, слоистые, мощностью первые сантиметры. Порода серицитизирована, окварцована, иногда порфиризована с образованием порфиробласт полевого шпата. Среди алевропесчаников наблюдаются прослои туфов. Переслаивание грубое, преобладающая мощность отдельных прослоев от 10 до 40 см.
	50–225 м	Углеродисто-терригенная пачка. Основная рудовмещающая. Тёмно-серые до чёрных углеродсодержащие алевроаргиллиты, неяснослоистые за счёт распределения углеродистого материала или чёткослоистые из-за наличия прослоев мощностью до 5 см, низкоуглеродистой песчанистой разности. Для пачки характерно переменное количество углеродистого материала от 1 до 5 %.
	50–250 м	Алевропесчаниковая пачка. Кварц-полевошпатовые песчаники, алевропесчаники, кремнистые, кремнисто-глинистые, глинистые алевролиты, вероятно, с примесью вулканогенного материала. Указанные разности пород фациально замещают друг друга как по простиранию, так и по падению пачки.
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	> 50 м	Нижняя туфогенная пачка. Литокристаллокластические туфы. Порода окремнена и участками серицитизирована.

### Рис. 3. Обобщённая литолого-фациальная колонка месторождения:

усл. обозн. см. рис.2

**Fig. 3. Generalized lithofacies column of the ore deposit:** for legend see Fig. 2



### Рис. 4. Схематический литолого-фациальный разрез по профилю 10 (IV):

усл. обозн. см. рис. 2

Fig. 4. Schematic lithofacies section along Profile 10 (IV): for legend see Fig. 2

текстуры. Последняя обусловлена чередованием прослоев, состоящих из минералов (кварц, плагиоклаз) разной размерности и различным количеством чешуек серицита и мусковита. В направлении полосчатости, являющейся, вероятно, отражением первичной слоистости, ориентированы пластинки биотита, замещённые хлоритом. Часто в алевропесчаниках отмечаются единичные обломки кристаллов полевого шпата (размер 0,5-0,7 мм), замещённых чешуйками серицита и карбоната, превышающие по размеру таковые в основной массе



тический туф нижней пачки:

*а* – макро, *b* – микро; николи скрещены

Fig. 5. Coarse-clastic lithocrystalloclastic tuff of the lower member: a - macro, b - micro; crossed nicols





породы. Такая порода классифицируется как туфогенный алевропесчаник. Алевропесчаниковая пачка по набору слагающих её пород сходна с терригенной. Но имеются и различия. В алевропесчаниковой пачке преобладают более грубозернистые породы (алевропесчаники, песчаники), а в терригенной – менее грубозернистые (алевропесчаники, алевролиты). В обеих пачках породы содержат туфогенный материал, но в терригенной он встречается чаще. Кроме того, в терригенной пачке отмечаются маломощные прослои туфов кислого состава. Породы алевропесчаниковой пачки содержат значительно больше рудных минералов (пирит, галенит, сфалерит).

Углеродисто-терригенная пачка (3) представлена тёмно-серыми (до чёрных) углеродсодержащими алевроаргиллитами (рис. 7, *a*), неяснослоистыми за счёт распределения углеродистого материала или чёткослоистыми из-за наличия прослоев мощностью до 5 см, низкоуглеродистых песчанистых разностей. Для пачки характерно переменное количество углеродистого материала, визуально от 1–2 до 3–5 %. Часто наблюдается микроскладчатость. Пачка является рудовмещающей.

Алевроаргиллит состоит из мельчайших зёрен кварца, полевого шпата, чешуек мусковита и углеродистого вещества. В породе отмечаются плойчатые структуры, микроскладки (см. рис. 7, *b*), которые хорошо подчёркиваются расположением углеродистого вещества, а также рудного минерала (пирита). Породы обладают полосчатой текстурой, обусловленной первичной слоистостью, и она выражена в чередовании прослоев с преимущественным развитием чешуек мусковита и подчинённого количества кварца и полевого шпата и прослоев, состоящих из мелких зёрен кварца и полевого шпата с подчинённым количеством слюды. Мусковитовые слои обладают лепидогранобластовой структурой. Кварц-полевошпатовые – гранобластовой. Те и другие прослои пронизаны углеродистым веществом и рудным материалом. В прослоях со значительным количеством слюды проявлены микроплойчатые текстуры и микроскладки.

В результате проведённых исследований установлено, что рудовмещающие углеродистые отложения отличаются повышенным содержанием оксидов Са, Mg и Fe по сравнению с безрудными толщами. Можно предположить, что под влиянием метаморфизма и восходящих из недр газовых или жидких растворов происходил метасоматический процесс, связанный с выносом Fe, Mg и Ca и, вероятно, рудного вещества из окружающих толщ, и переотложением этих веществ в углеродистой толще как на геохимическом барьере.

*Терригенная пачка (4)* включает алевропесчаники, туфогенные алевропесчаники и кремнистые туфогенные алевролиты. Породы серицитизированы, окварцованы, иногда порфиризованы с образованием порфиробласт по-



### Рис. 6. Слоистые кремнистые серицитизированные туфогенные алевропесчаники:

*а* – макро, *b* – микро; николи скрещены

Fig. 6. Laminated sericitized tuffaceous cherty silty sandstones; a - macro, b - micro; crossed nicols







**Рис. 7. Углеродсодержащие алевроаргиллиты:** *а*–макро, *b*–микро; николи скрещены; микроскладки выполнены серицитом, углеродистым и рудным веществом

Fig. 7. Carbonaceous mudstones:

a – macro, b – micro; crossed nicols; microfolds are filled with sericite and carbonaceous and ore matter

левого шпата. Слоистость рваная, возможно, мутьевая. Среди алевропесчаников наблюдаются прослои туфов. Иногда пачка представлена переслаиванием серых, тёмно-серых кремнистых алевролитов и мелкозернистых кварцполевошпатовых песчаников. Переслаивание грубое, преобладающая мощность отдельных прослоев от 10 до 40 см. Кроме того, внутри каждого прослоя есть более тонкое чередование тех же разностей пород. Участками наблюдается ритмичная и градационная слоистость.

Алевролит кремнистый туфогенный (рис. 8). Порода псаммито-алевритовой структуры, состоит из мелких (0,025–0,03 мм) обломков кварца и полевых шпатов, на фоне которых отмечаются мельчайшие чешуйки серицита, развитые в виде тончайших прожилков или пятнистых выделений. Порода содержит прожилки кварца в ассоциации с мусковитом. Последний образует также самостоятельные прожилки и пятнистые выделения, с которыми ассоциирует рудный минерал (пирит) и редко – карбонат. Кроме того, в алевролите отмечаются единичные обломки кварца размером  $0,2 \times 0,3$  мм, что свидетельствует о том, что в породе присутствует туфогенный материал.

Отложения описанных выше терригенных пачек приурочены к удалённым от центра вулканизма зонам, включают в себя шельфовые и прибрежно-морские фации осадочнопирокластических пород (чередование алевролитов, алевропесчаников, песчаников, в том числе с примесью туфогенного материала). Согласно модулю Н. М. Страхова, соотноше-



ние (Fe + Mn) / Ті у осадочных пород месторождения 20–30, что выше, чем у обычных морских осадков, но ниже, чем, например, в осевой части Восточно-Тихоокеанского поднятия – срединно-океанического хребта (более 300). Причиной, скорее всего, являлось загрязнение описываемых осадочных пород шельфовой зоны пирокластическим материалом, поступающим от близко расположенного палеовулкана.

Для кремнистых, глинистых, кремнистоглинистых и углеродистых пород, образующихся в шельфовой, прибрежно-морской мелководной обстановке, характерна кислая среда с рН от 3,5 до 6,5 ввиду практически полного отсутствия карбонатов. Наиболее выдержанный элемент терригенных отложений - серые, тёмно-серые глинистые, алевритоглинистые, кремнисто-глинистые сланцы. В своём развитии они тяготеют к нижней и верхней частям разреза. Выделяются два генетических типа: первый, преобладающий - западинно-шельфовые (возможно, пелагические) тиховодные глинистые отложения, второй включает редкие слои дистальных алевритоглинистых турбидитов. Образование этих отложений происходило, по-видимому, при начавшемся прогибании шельфовой области в результате очередной активизации Карсакпайской рифтовой зоны.

*Углеродистая толща.* В составе отложений выделяется один обобщённый генетический тип отложений – углеродистые пиритоносные алевроаргиллиты застойных пелагических обстановок осадконакопления. Единич-





Рис. 8. Кремнистые туфогенные алевролиты:

*а* – макро, *b* – микро; николи скрещены

Fig. 8. Tuffaceous cherty siltstones:

a – macro, b – micro; crossed nicols

ные маломощные слои глинисто-алевритовых турбидитов соответствуют элементам инъективного режима осадконакопления. Наиболее полно данная толща соответствует геологической и палеогеографической обстановке глубоководного морского палеобассейна, возможно, с органической циркуляцией, обусловленной существованием мелкодонного порога.

Вулканогенная пачка (5). Наиболее характерные породы – серые до тёмно-серых туфолавы и лавобрекчии риодацитового состава, порфировые, массивные. При изучении под микроскопом лавобрекчий установлено, что породы обладают обломочной текстурой и эвпорфировой структурой. Обломочный облик имеют порфировые выделения плагиоклаза оскольчатой или угловатой формы размером от 0,3-0,4 до 2,5-3,0 мм. Обломки составляют от 15-20 до 30-40 % объёма породы и чётко выделяются на фоне основной массы. Плагиоклазы пелитизированы, пронизаны чешуйками мусковита и реже карбонатизированы. Основная масса мелкозернистая, состоит из полевых шпатов, кварца и мельчайших чешуек биотита, частично замещённого хлоритом. Чешуйки биотита ориентированы по сланцеватости, что придаёт породе полосчатую текстуру. В этом же направлении развиты линзовидные полосы, струи, состоящие из кварца, биотита, замещённого хлоритом, а также скопления мусковита и карбоната с магнетитом, реже – с пиритом.

Туфолавы риодацитового состава (рис. 9) – породы тёмно-серого цвета, во многом сходны с лавобрекчиями. Породы обладают обломочной текстурой, эвпорфировой структурой. Обломки составляют 20-25 % объёма породы и представлены кварцем и полевыми шпатами. Зёрна кварца округлой формы, имеют размеры от 0,3 до 1,0 мм, полевые шпаты оскольчатой формы – от 0,3 до 2,0 мм. Изменены они по-разному: одни только пелитизированы, другие частично замещены серицитом и карбонатом, третьи почти целиком серицитизированы. Основная масса мелкозернистая кварцполевошпатового состава, с незначительным количеством серицита. В основной массе развиты пятнистые выделения мусковита, реже карбоната, а также отдельные чешуйки биотита, хлорита и магнетита. В породе встречены линзовидные и прожилковидные выделения крупнозернистого кварца, содержащие кристаллики магнетита размером 0,03-0,7 мм. Из акцессорных минералов отмечаются апатит и циркон.

Туфы кислого состава (рис. 10). Породы обломочной текстуры мелко- или крупнообломочной структуры. Обломки составляют 10– 25 % объёма породы, они угловатой или окатанной формы, представлены кристаллами плагиоклаза, калиевого полевого шпата и кварца размером 0,25–2,0 мм и кремнистых пород размером до 4,0–5,0 мм. Основная масса





**Рис. 9. Туфолавы, насыщенные обломками:** *а* – макро, *b* – микро; николи скрещены

Fig. 9. Tuff lavas saturated with rock fragments: a - macro, b - micro; crossed nicols

мелкозернистая, состоит из кварца, полевых шпатов и чешуек мусковита. Последние развиты как в виде мелких, так и более крупных чешуек, образующих пятнистые выделения и скопления, приуроченные к зальбандам обломков кристаллов полевых шпатов.

Риодациты. Порода обладает порфировой структурой. Количество фенокристаллов 10–20 % объёма породы. Они представлены плагиоклазом, калиевым полевым шпатом и кварцем (рис. 11). Размер зёрен полевых шпатов 0,3–2,0 мм, кварца – 0,5–1,0 мм. Вкрапленники плагиоклаза замещены чешуйками мусковита, а калиевого полевого шпата – альбитом. Основная масса перекристаллизована, состоит из мелкозернистого кварца, полевых шпатов (0,05–0,3 мм) и чешуек мусковита (0,04–0,3 мм). Все вулканогенные породы месторождения относят к существенно калиевой серии с соотношением K/Na = 3 : 1.

Субвулканические породы, отнесённые к жерловым фациям, представлены автомагматическими брекчиями кислого состава. Последние содержат от 30 до 70 % обломочного материала, содержащего кварц, полевые шпаты и обломки различных по составу изменённых пород. Основная масса состоит из кварца и полевых шпатов, обычно перекристаллизована, обладает флюидальной структурой. Данные породы слагают субпластовые залежи или дайкообразные тела. При изучении под микроскопом установлено, что порода обладает обломочной текстурой и эвпорфировой структурой. Обломки представлены кристаллами кварца и полевых шпатов, хорошо различимыми невооруженным глазом. Обломки кварца округлой формы, размером 0,4-3,0 мм. Обломки кристаллов полевых шпатов – оскольчатой формы, размером до 2,0-2,2 мм, плохой сохранности, их границы размыты. Они пелитизированы и замещены мелкими чешуйками мусковита и карбоната (рис. 12). Часто оконтурены хлоритом или мусковитом. Обломки составляют 15-50 % объёма породы. Основная масса мелко-среднезернистая перекристаллизована, рассланцована, обладает полосчатой текстурой и состоит из кварца, полевых шпатов и мелких чешуек мусковита и биотита. Текстура породы полосчатая или пятнистая, обусловлена распределением чешуек биотита или скоплениями пластинок мусковита. На этом фоне отмечаются пятнистые и лентовидные выделения хлорита, иногда карбоната. Крупнозернистый кварц отмечается в виде гнездово-прожилковых выделений.

В породе развиты также прожилки карбоната мощностью от 0,1 до 1,0 мм. Акцессорные минералы – апатит, титанит. Тонкая вкрапленность рудного минерала пронизывает крупные пластинки слюд и чешуйки хлорита. Более крупные выделения рудных минералов (пирита и сфалерита) отмечаются в ассоциации с карбонатом. Также в породах встречен рудный минерал землистой структуры, вероятно, отвечающий гидроокислам железа.





Рис. 10. Литокристаллокластический туф кислого состава:

*а* – макро, *b* – микро; николи скрещены

Fig. 10. Felsic lithocrystalloclastic tuff: a - macro, b - micro; crossed nicols

Интрузивные образования представлены массивами диоритов, гранодиоритов, а также дайками кислого и основного составов позднеордовикского возраста, обычно чётко секущими к напластованию осадочных и вулканогенных пород. В описываемых пачках встречены следующие магматические породы: габбродолериты, долериты и гранодиориты.

Габбродолерит – порода средне-крупнозернистой структуры, массивной текстуры. Она состоит из идиоморфных лейст плагиоклаза размером 0,5–2,0 мм, расположенных беспорядочно «диабазово». Плагиоклазы частично заменены серицитом, хлоритом, карбонатом, эпи-



дотом. В промежутках между плагиоклазами развиты хлорит, карбонат и рудный минерал (титаномагнетит). Кроме того, отмечаются крупные выделения рудного минерала (пирит). В породе развиты прожилки крупнозернистого карбоната и кварца мощностью до 2,0 мм.

Долерит – порода мелко-среднезернистой структуры, массивной текстуры, состоит из идиоморфных лейст плагиоклаза (размер от 0,3–0,5 до 2,0 мм), расположенных беспорядочно «диабазово». Плагиоклазы серицитизированы, иногда карбонатизированы. В промежутках между плагиоклазами развиты хлорит, карбонат, эпидот и лейкоксен. В по-



### Рис. 11. Риодацит; порфировые выделения плагиоклаза в рассланцованной кварцполевошпат-мусковитовой основной массе:

*а* – макро, *b* – микро; николи скрещены

Fig. 11. Rhyodacite; plagioclase phenocrysts in schistose quartz-feldspar-muscovite groundmass:

 $a-{\rm macro},\,b-{\rm micro};\,{\rm crossed}$ nicols





### Рис. 12. Автомагматическая брекчия:

*а* – макро (контакт автомагматических брекчий и алевропесчаников), *b* – микро; николи скрещены

Fig. 12. Automagmatic breccia:

a – macro (contact between automagmatic breccias and silty sandstones), b – micro; crossed nicols

роде отмечаются прожилковидные выделения пирита.

Гранодиорит – полнокристаллическая, равномернозернистая порода с крупными (1,0-3,0 мм) кристаллами плагиоклаза, калиевого полевого шпата (до 2,0 мм), составляющими 60 % объёма породы, кварца (до 1,0 мм), составляющего 5-10 % объёма породы и цветных минералов, замещённых хлоритом. Плагиоклазы замещаются агрегатом соссюрита, а также мелкими чешуйками серицита и карбонатом, а калиевый полевой шпат – альбитом. Крупные выделения хлорита, иногда с карбонатом и мусковитом, развиты в промежутках между кристаллами полевых шпатов. Отмечаются акцессорные минералы (титанит, циркон), рудный (пирит), а также прожилковидные выделения кварца и мусковита. Структура гипидиоморфнозернистая, текстура массивная.

*Изменённые породы.* Вулканогенные, вулканогенно-осадочные и осадочные породы, развитые в пределах месторождения, претерпели многократные изменения: региональные, поствулканические, контактовые и гидротермальные (околорудные).

Региональные изменения. Региональному метаморфизму подвержены осадочные породы терригенной, углеродисто-терригенной и алевропесчаниковой пачек. Формирование регионально изменённых пород происходило при невысоких температурах в условиях фации филлитов. Особенность филлитов – зависимость минерального состава от первичного состава осадочных пород. За счёт алевролитов, алевроаргиллитов и песчаников с глинистым цементом образуются кварц-серицит-хлоритовые филлиты, за счёт алевролитов, алевроаргиллитов и песчаников с известковистым цементом – кварц-серицит-кальцит-хлоритовые, а за счёт кварц-полевошпатовых песчаников – кварц-альбит-серицит-хлоритовые филлиты.

Поствулканические изменения. Им подвержены породы верхней вулканогенной и нижней туфогенной пачек: туфы кислого состава, лавобрекчии, риолиты, риодациты, автомагматические брекчии кислого состава. При этом по вулканическим породам кислого состава образуются альбит-кварц-серицитовая или альбит-кварц-серицит-хлоритовая минеральные ассоциации, что отвечает фациям пропилитов. С данными фациями пропилитов всегда ассоциирует пирит. Вторичные минералы составляют не более 25–30 % массы породы, так что первичный состав породы сохраняется.

Околорудно-изменённые породы. Полиметаллическое оруденение, развитое на месторождении, сопровождается околорудными изменениями, выраженными в развитии пара-



генезиса: кварц, серицит, мусковит, карбонат, хлорит. Эти изменения составляют от 5–10 до 50 % массы породы, так что её структура и текстура сохраняются. Поскольку рудные минералы (пирит, пирротин, галенит, сфалерит) развиты преимущественно в виде вкрапленности, гнездовидных и прожилковидных выделений, то сопровождающие их околорудные изменения развиты в виде прожилково-метасоматических выделений. Последние отмечаются как пятнистые, прожилковидные, гранобластовые, лепидогранобластовые агрегаты.

Так, при околорудном изменении вулканитов кислого состава (туфов, лавобрекчий, туфолав, риодацитов, автомагматических брекчий) обломки полевых шпатов замещаются серицитом, мусковитом, карбонатом, а в основной массе образуются пятнистые и прожилковидные выделения кварца, серицита, мусковита, карбоната и рудных минералов. При околорудном изменении осадочных пород (алевролитов, алевропесчаников, песчаников и их туфогенных разностей) образуются прожилковидные выделения кварца и мусковита, развитые по сланцеватости, а также пятнистые скопления кварца, серицита, мусковита, карбоната с рудными минералами.

Трудность выделения околорудно-изменённых пород заключается в том, что они подвержены интенсивному динамометаморфизму низко-среднетемпературной ступени зеленосланцевой фации, в результате чего осадочные, вулканогенные, а также околорудно-изменённые породы метаморфизованы, рассланцованы и превращены в сланцы. При этом серицит замещается мусковитом и формируются кварц-мусковитовые сланцы. Это хорошо видно на примере алевроаргиллитов углеродисто-терригенной пачки, которые под воздействием динамометаморфизма рассланцованы и превращены в кварц-мусковитовые сланцы полосчатой и плойчатой микротекстуры (рис. 13). В этом же направлении ориентированы прожилковидные выделения кварца, мусковита, карбоната с рудным минералом, которые являются продуктами околорудного изменения. Но необходимо отметить, что встречаются прожилки кварца, серицита, карбоната, которые являются кососекущими по отношению к рассланцеванию. Имеющиеся в настоящее время факты свидетельствуют о проявлении процесса динамометаморфизма после формирования околорудно-изменённых пород.

Контактовый метаморфизм. Рудное поле эродировано гранитоидами и диоритами. Внедрение крупного массива гранитоидов привело к значительным метаморфическим преобразованиям вулканогенно-осадочных и осадочных пород в условиях мусковит-роговиковой (внешняя зона) и пироксен-роговиковой фаций контактового метаморфизма по Н. Л. Добрецову и Н. В. Соболеву. Метаморфические породы представлены контактовыми роговиками кварц-полевошпатового, кордиерит(?)кварц-биотитового, кварц-биотитового составов.

Зона ороговикованных пород значительно более распространена, чем сами роговики. Ороговикованные породы отмечаются не только в зоне экзоконтакта диоритового массива, но и в достаточной удалённости от него. По интенсивности они весьма различны, от появления в породе единичных контактовых минералов до замещения породы этими минералами на 30–40 %. В алевролитах появляются скопления биотита, мусковита, тремолита. В вулканогенных породах отмечается появление чешу-



# Рис. 13. Алевроаргиллит, превращённый в кварц-мусковитовый сланец с плойчатой микротекстурой; николи скрещены

Fig. 13. Mudstone transformed into quartz-muscovite schist with crenulated microtexture; crossed nicols





Рис. 14. Кварц-эпидотовый роговик с выделениями сфалерита (*a*); кварц-серицит-биотитовый роговик (*b*); николи скрещены

Fig. 14. Hornfelses: (*a*) quartz-epidote hornfels with sphalerite segregations and (*b*) quartz-sericite-biotite hornfels; crossed nicols

ек биотита, часто с кварцем и эпидотом, иногда вместе с этими минералами развивается пирит.

Кварцево-полевошпатовые роговики в основном образуются за счёт пород кислого состава, в меньшей степени кремнистых алевролитов. Бо́льшая часть контактово-метаморфизованных пород – кварц-эпидотовые, биотиткварцевые, кварц-серицит-биотитовые роговики (рис. 14), образовавшиеся, главным образом, за счёт известковистых и кремнистых алевролитов. Они состоят из биотита (15–25 %), кварца (40–70 %), также в различном количестве присутствуют мусковит, эпидот, хлорит, плагиоклаз, апатит.

В составе скарноидов (рис. 15) преобладает пироксен, в кристаллах которого встречаются мелкие отдельные включения и гнёзда граната. Всегда присутствуют буроватый тонкочешуйчатый стильпномелан (?) в виде пятнистых участков, развивающийся по пироксеновой массе, и в значительном количестве кальцит, образующий участки неправильной формы и прожилковые выделения, около которых пироксен перекристаллизован в более крупнозернистый агрегат. Подобные участки являются продуктами более поздних преобразований скарнов.

О взаимоотношении контактового и гидротермального (околорудного) метаморфизма можно судить только по отдельным фактам. Так, в осадочных и вулканогенных породах, содержащих проявления метасоматоза (кварц, серицит, мусковит, карбонат), появляются более высокотемпературные минералы: биотит, эпидот, гранат. О взаимоотношении динамометаморфизма и контактового метаморфизма свидетельствует расположение кристаллов гранатов, вытянутых по направлению рассланцевания. Этот факт говорит о проявлении динамометаморфизма позже контактового. Но окончательное понимание взаимоотношений различных видов метаморфизма требует дополнительных исследований.

Минеральный состав и структурнотекстурные особенности руд. Промышленные руды представлены прожилково-вкрапленной сульфидной минерализацией в углеродистых алевроаргиллитах и алевропесчаниках, в разной степени метасоматически изменённых. Главные рудные минералы: сфалерит, галенит, пирит, пирротин; второстепенные и редкие - халькопирит, арсенопирит, аргентит, магнетит. Спорадически встречаются рутил, ильменит, титанит, циркон. В жильной матрице руд наибольшим распространением пользуется кварц. К второстепенным жильным минералам относятся кальцит, мусковит, серицит, биотит, в качестве акцессорных отмечаются хлорит, эпидот, гранат, минералы редких земель: бастнезит, паризит, монацит.





Рис. 15. Кварц-серицит-эпидот-гранатовый скарноид:

*а* – макро, *b* – микро; николи скрещены

Fig. 15. Quartz-sericite-epidote-garnet skarnoid: a - macro, b - micro; crossed nicols

Специфической особенностью руд является присутствие в них относительно высоких содержаний углеродистого вещества, образующего тесные срастания с сульфидами и частично адсорбирующего свинец и редкие металлы.

Рудные залежи месторождения сложены гетерогенными в возрастном отношении минеральными ассоциациями, отвечающими различным этапам и стадиям процесса рудообразования. Состав и структурно-текстурные особенности руд отражают сложную и длительную историю их формирования. В целом можно выделить три типа рудной минерализации, отражающих эволюцию процессов рудообразования.

Структуры и текстуры первой группы (седиментационные) имеют ограниченное распространение. В эту группу включены текстуры, наблюдаемые для сингенетичных пирит-пирротиновых выделений: просечковая, послойно-вкрапленная, ритмично-слоистая. Характерно, что сульфиды, слагающие просечки, не обнаруживают секущих или коррозионных взаимоотношений с минералами вмещающих пород. Пирит-пирротиновая просечковая либо полосовидная сингенетичная минерализация преимущественно локализована в углеродсодержащих породах. Просечки сложены удлинёнными зёрнами пирротина-1 в ассоциации с пиритом-1 или их цепочками, трассирующими микроскладки во вмещающих породах или ориентированными параллельно сланцеватости. Очень редко в составе ассоциации наблюдаются мелкозернистые халькопирит-1, галенит-1, сфалерит-1 (рис. 16). Отложение первичных сульфидов происходило в условиях застойного осадконакопления прибрежного моря.

Структуры и текстуры второй группы (метасоматического замещения пород и выполнения трещин). Для основной массы руд характерны разнообразные структуры и текстуры, свидетельствующие об их образовании в процессе метасоматического замещения пород и выполнения трещин. К ним относятся: прожилково-вкрапленные, гнездовые, брекчиевидные, полосовидно-вкрапленные текстуры и структуры разъедания, замещения, коррозионная, метакристаллическая, идиоморфнозернистая, гипидиоморфнозернистая, аллотриоморфнозернистая, петельчатая и др. В зонах дробления и смятия в рудах появляются соответствующие структуры и текстуры: брекчиевая, цементации, дробления, плойчатая, полосчатая и др. По размерности прожилкововкрапленные руды, развитые непосредственно в углеродистых породах, являются тонкозернистыми (размер зёрен – сотые, тысячные, иногда десятые доли миллиметра). А руды, приуроченные к кварцевым и кварц-карбонатным жилам и прожилкам, более крупнозернистые (первые миллиметры).

Нитевидные прожилки существенно галенитового (галенит-2) и сфалеритового (сфалерит-2) состава (рис. 17), представляющие собой выполнение тонких разноориентиро-





Рис. 16. Пирит-пирротиновая со сфалеритом полосовидная, сингенетичная минерализация:

a – макро, b – микро; николи скрещены

Fig. 16. Syngenetic banded (sphalerite)-pyrite-pyrrhotite mineralization:

a – macro, b – micro; crossed nicols

ванных трещин преимущественно крутого залегания, секущих напластование и ориентированных параллельно ему просечек. Их образование связано с процессами, сопровождающими внедрение гранитоидов.

Рудная минерализация, сопровождающая кварц-карбонатные прожилки, приурочена преимущественно к их зальбандам и представлена сульфидами третьей генерации: сфалерит-3, галенит-3, пирротин-3, пирит-3, халькопирит-3 (рис. 18). Гнёзда галенита и сфалерита в зальбандах прожилков обычно отдалены друг от друга, реже наблюдаются совместно. Иногда в прожилках присутствуют халькопирит и пирит. В центральной части прожилков галенит и сфалерит практически не встречаются. Наблюдаются гнёзда пирит-пирротинового состава. Отмечаются два типа прожилков: существенно кварцевого состава с молочно-белым кварцем (поздние) и кварц-карбонатного состава (более ранние), причём последним сопутствует рудная минерализация.

Общая последовательность рудообразования следующая. *Стадия 1* – сингенетичная пирит-пирротиновая со сфалеритом и галенитом; *стадия 2* – прожилковая нитевидная сфалерит-галенитовая, редко с халькопиритом; *стадия 3* – прожилково-жильная кварцкальцитовая с гнёздами пирит-пирротинового и галенит-сфалеритового состава.

Важную роль в процессе рудообразования играет углеродистое вещество (УВ), которое представлено рассеянными в массе породы тонкодисперсными скоплениями, цементирующими корродированные зёрна нерудных минералов. Иногда к таким скоплениям приурочены сульфидные гнёзда. Органическое вещество на месторождении представлено скрытокристаллической разновидностью. Отмечаются тончайшие чешуйки углеродистого вещества и их агрегаты, неравномерно рассеянные во вмещающих породах, маломощные линзочки среди вмещающих пород и сульфидов руд. Вокруг зёрен кварца отмечаются оторочки поперечно-волокнистого углеродистого вещества.

На основании приведённого выше материала можно сделать вывод, что углеродистое вещество содержалось в первичных породах и имело биогенное происхождение. Его накопление происходило одновременно с отложением рудных элементов. Известно, что углерод является прекрасным адсорбентом, изучению его сорбционных свойств посвящено множество работ. Исследования углерода как природного геохимического барьера ведутся с 60-х гг.

Опыты по сорбционной активности УВ проводились при изучении золотоносных черносланцевых толщ, и основной результат этих исследований – выявление факта, что при поступлении золотоносных растворов нерастворимое УВ может служить природным сорбционным барьером, участвовать в накоплении и концентрировании рудого вещества [6]. При мобилизации углеродистого вещества, содержащегося в породах, произошла его контаминация





Рис. 17. Нитевидные прожилки сфалерита с галенитом в углеродистом алевроаргиллите: *а* – макро, *b* – микро

Fig. 17. Filamentous stringers of sphalerite with galena in carbonaceous mudstone: a - macro, b - micro



### Рис. 18. Кварцевая жила с пирротиновой, пиритовой, халькопиритовой, сфалеритовой и галенитовой минерализацией:

a – макро; b – микро; фрагмент гнезда пирита с включениями сфалерита

Fig. 18. Quartz vein with pyrrhotite, pyrite, chalcopyrite, sphalerite, and galena mineralization:

a – macro, b – micro; fragment of a pyrite nest with sphalerite inclusions

рудными компонентами. При процессах региональной складчатости углеродистое вещество «выжималось» в своды складок и микроскладок. Под воздействием метаморфизма произошёл переход УВ в антраксолит (?). По материалам Д. Х. Мартихаевой и др. [7] известно, что при таком переходе происходит изменение структур УВ, приводящее к перераспределению рудных элементов, в том числе свинца и цинка. В данном случае высвобождение свинца и цинка из углеродистого вещества с последующим его перераспределением. Следовательно, углеродистое вещество может являться геохимическим барьером для свинца и цинка. Накопление органического углерода типично для застойных пелагических обстановок вблизи континента. Освобождение ряда металлов при метаморфизме УВ углеродистых



сланцев является важным рудоподготовительным процессом [1, 9].

Для уточнения генетических особенностей оруденения исследован изотопный состав серы сульфидов двух главных типов минерализации (таблица). Установлено следующее.

Субпослойные линзовидно-вкрапленные скопления сульфидов железа (пирита и пирротина) существенно обогащены лёгким изотопом <sup>32</sup>S при широких вариациях значений  $\delta^{34}$ S – от -7,6 до -20,7 ‰. Эта особенность указывает на то, что основным источником серы служил биогенный сероводород, образовавшийся в бассейне осадконакопления в результате бактериальной сульфат-редукции при низких температурах. Это, однако, не исключает вероятности поступления в бассейн некоторой части сероводорода (и металлов) в составе субмаринных эксгаляций.

Известно, что в восстановительной среде углеродистых пород процессы метаморфизма и/или переотложения сульфидов не сопровождаются сколько-нибудь значимыми изменениями в изотопном составе серы. Поэтому пирротин, образовавшийся за счёт осадочно-диагенетического пирита, унаследовал изотопный состав серы последнего и первично-осадочную неоднородность в распределении значений  $\delta^{34}$ S.

Секущие сульфидно-кварцевые и карбонатсульфидные прожилки относительно обогащены тяжёлым изотопом серы <sup>34</sup>S (до +0,7 ‰). Данный факт однозначно свидетельствует о привносе серы в период рудообразования из другого источника (наиболее вероятно – магматического). При этом пониженные значения  $\delta^{34}$ S прожилковых сульфидов (до -9,8 ‰) в рассматриваемом случае обусловлены частичным заимствованием серы из осадочно-метаморфических сульфидов.

Таким образом, результаты изотопных исследований исключают вероятность осадочно-метаморфогенного происхождения изученной прожилковой полиметаллической минерализации на объекте.

На основе приведённых выше данных предлагается многостадийная схема рудообразования на месторождении, которая включает

### Изотопный состав серы сульфидов

Isotopic composition of sulfur sulfides

Минерал	δ <sup>34</sup> SCDT, ‰
Пирротин 1	-20,7
Пирит 1	-12,5
Пирротин 1	-13,3
Пирротин 1	-10,4
Пирротин1	-10,9
Пирротин 2	-8,8
Пирит 2	-7,6
Клейофан 2	-9,8
Пирротин 2	-4,1
Сфалерит 3	+0,8

Примечание. Анализы выполнены в ФГБУ «ЦНИГРИ» С. Г. Кряжевым. Серу сульфидов переводили в SO<sub>2</sub> посредством реакции с CuO при 760 °C в вакууме с последующей 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  $\delta^{34}$ S = +0,7 %0 и стандартный образец сфалерита NBS 123 с  $\delta^{34}$ S = +17,3 ‰. Точность измерений составляет ± 0,2 ‰.

гидротермально-осадочное образование первичных рудных концентраций и их последующие преобразования на этапах прогрессивного и регрессивного метаморфизма.

Первичные рудные концентрации накапливались в локальных палеодепрессиях застойного моря, контролировавшихся конседиментационными разломами глубокого заложения, по которым дискретно происходил подток рудоносных коллоидных растворов. Пути миграции растворов были обусловлены палеорельефом морского дна, а условия рудоотложения – перепадами градиентов рН морской воды и растворов, приводящих к коагуляции коллоидов, осаждению сульфидно-кремнистого геля и его захоронению терригенным углеродисто-алевроглинистым материалом. Их образование связано с широко развитыми вулканическими постройками.



Основную промышленную ценность руд представляет нитевидная прожилковая и гнездово-вкрапленная минерализация сфалеритгаленитового состава. Образование этого типа руд, скорее всего, связано с процессами метаморфизма, мобилизации и регенерации первично сингенетичных руд под воздействием тепловых полей гранитоидов.

Наиболее поздними образованиями являются прожилки мощностью от первых сантиметров до 20 см, сложенные кварц-карбонатным (кальцит) материалом с гнёздами средне-крупнозернистых сульфидов. Эти прожилки локализованы, главным образом, в нижележащей терригенной пачке, ориентированы практически параллельно оси керна буровых скважин и секут напластование вмещающих пород. Иногда данные прожилки наблюдаются также в лежачем боку углеродистой пачки. В этом случае наблюдаются наиболее богатые по содержанию свинца, цинка и серебра руды. Образование прожилков наиболее позднее, так как они секут все продукты метаморфических преобразований (роговики) вмещающих пород и руд, образованных в первые две стадии. Источником вещества могли служить гранитоидные массивы, широко развитые в пределах месторождения.

### Выводы.

1. Месторождение локализовано в пределах развития структурно-вещественных комплексов со стратифицированными толщами верхнего протерозоя, включая сланцевую толщу флишоидного строения с графитистыми и кремнистыми сланцами, графитовыми филлитами, кварцитами, мраморами, железистыми кварцитами, бластопсаммитовыми серицитобиотито-полевошпатовыми сланцами, серицито-полевошпатовыми сланцами, серицито-полевошпатовыми сланцами, горизонтами базальтовых порфиритов, порфироидами по литокристаллокластическим туфам и лавам дацит-риолитового состава.

2. В геологическом строении месторождения принимают участие отложения нижней подсвиты жиландысайской свиты верхнего протерозоя, в пределах которой выделяются пять пачек, снизу вверх: туфогенная, алевропесчаниковая, углеродисто-терригенная (рудовмещающая), терригенная и вулканогенная. Субвулканические породы относятся к жерловым фациям и представлены автомагматическими брекчиями кислого состава. Терригенные и углеродисто-терригенные отложения относятся к удалённым от центра вулканизма зонам и включают в себя шельфовые и прибрежно-морские фации. Выделяются два генетических типа: западинно-шельфовые (возможно, пелагические) тиховодные глинистые отложения (преобладают), которые включают редкие слои дистальных алевритоглинистых турбидитов. Образование последних происходило, по-видимому, при начавшемся общем некомпенсированном прогибании шельфовой области.

3. Вулканогенные, вулканогенно-осадочные и осадочные породы, развитые в пределах месторождения, претерпели многократные изменения: региональные, поствулканические, контактовые и гидротермальные (околорудные). Формирование регионально изменённых пород происходило при невысоких температурах в условиях фации филлитов. Поствулканическим изменениям подвержены породы верхней вулканогенной и нижней туфогенной пачек с образованием альбит-кварц-серицитовых или альбит-кварц-серицит-хлоритовых пород, что отвечает фациям пропилитов. При околорудном изменении пород разреза образуются прожилковидные выделения кварца и мусковита, развитые по сланцеватости, а также пятнистые скопления кварца, серицита, мусковита, карбоната с рудными минералами. Внедрение крупного массива гранитоидов привело к значительным контактово-метаморфическим преобразованиям вулканогенно-осадочных и осадочных пород в условиях мусковит-роговиковой (внешняя зона) и пироксен-роговиковой фации контактового метаморфизма.

4. Промышленные руды представлены прожилково-вкрапленной сульфидной минерализацией в углеродистых алевроаргиллитах и алевропесчаниках, в разной степени метасоматически изменённых. Главные рудные минералы – сфалерит, галенит, пирит, пирротин;



второстепенные и редкие – халькопирит, арсенопирит, аргентит, магнетит. Иногда встречаются рутил, ильменит, титанит, циркон.

5. Рудные залежи месторождения сложены гетерогенными в возрастном отношении минеральными ассоциациями, отвечающими различным этапам и стадиям процесса рудообразования. Состав и структурно-текстурные особенности руд отражают сложную и длительную историю их формирования. Первичные руды отлагались в локальных палеодепрессиях застойного моря, контролировавшихся конседиментационными разломами глубокого заложения, по которым дискретно происходил подток рудоносных коллоидных растворов. Их образование связано с широко развитыми вулканическими постройками. Основную промышленную ценность руд представляет нитевидная прожилковая и гнездово-вкрапленная минерализация сфалерит-галенитового состава. Образование этого типа руд, скорее всего, связано с процессами метаморфиз-

### Список литературы

- Авдонин В. В. Прогнозирование и поиски колчеданно-полиметаллических месторождений. – М.: МГУ, 1995. – 52 с.
- 2. Ермолов П. В., Антонюк Р. М., Гранкин М. С. Геодинамика Южного Улытау в позднем протерозое // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук. 2012. № 2. С. 5–15.
- Исабаев Е. О. Изучение оруденения и характеристика рудных зон месторождения Дюсембай // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXIV Международного симпозиума им. академика М. А. Усова студентов и молодых учёных, посвящённого 75-летию Победы в Великой Отечественной войне. – Томск, 2020. – С. 126–128.
- Каримов Е. К. Перспективы и потенциал месторождения Дюсембай // IV Всероссийская научно-практическая конференция «Передовые научно-технические и социально-гуманитарные проекты в современной науке» : сборник статей. – 2019. – С. 40–43.
- Марков М. С. Тектоника южной части Карсакпайского синклинория. – М. : Академия наук СССР, 1962. – Вып. 72. – 141 с.

ма, мобилизации и регенерации первично сингенетичных руд под воздействием тепловых полей гранитоидов. Наиболее поздними образованиями являются прожилки мощностью от первых сантиметров до 20 см, сложенные кварц-карбонатным (кальцит) материалом с гнёздами средне-крупнозернистых сульфидов. Образование прожилков наиболее позднее, так как они секут все продукты метаморфических преобразований (роговики) вмещающих пород и руд, образованных в первые две стадии. Источником вещества могли служить гранитоидные массивы, широко развитые в пределах месторождения.

6. Исходя из анализа всего приведённого материала можно констатировать, что данное месторождение относится к новому формационному типу свинцово-цинковых месторождений, локализованных в черносланцевых толщах при значительной роли вулканической активности, и является ремобилизованным месторождением типа SEDEX.

- Макрыгина В. А., Развозжаева Э. А., Мартихаева Д. Х. Органическое вещество и микроэлементы в процессе метаморфизма метапелитов (Хамар-Дабан, Юго-западное Прибайкалье) // Геохимия. – 1991. – № 3. – С. 358–369.
- Мартихаева Д. Х., Развозжаева Э. А., Воронцов А. Е. Углеродистое вещество в метаморфических и гидротермальных породах. – М. : СО РАН, Гео, 2001. – 121 с.
- Нуржанов Г. Н. Возможности и опыт проведения наземных геофизических исследований АО «Казгеология» // Геология и охрана недр. – 2016. – № 4 (61). – С. 49–55.
- Развозжаева Э. А., Будяк А. Е., Прокопчук С. И. Сорбционная активность нерастворимого углеродистого вещества черносланцевых образований в процессе регионального метаморфизма (Байкало-Патомское нагорье) // Геохимия. – 2013. – № 1. – С. 92–96.
- Соболев М. В., Торегожин А. Р., Ли Е. С. Геологическое строение и петрографическая характеристика пород каратургайского комплекса северного Улытау // Студенческий вестник: электронный научный журнал. – № 16 (114), Ч. 5. – С. 30–37. – URL: https://studvestnik.ru/journal/ stud/herald/114 (дата обращения: 15.11.2022).



- 11. Третьяков А. А., Данукалов Н. К., Дестярев К. Е. Позднедокембрийские вулканогенные и вулканогенно-осадочные толщи Улытауского массива (Центральный Казахстан): особенности состава и обоснование возраста // Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики: Материалы LII Тектонического совещания. – М.: ГЕОС, 2020. – Т. 2. – С. 338–343.
- 12. Третьяков А. А., Дегтярев К. Е., Каныгина Н. А., Ковач В. П., Федоров Б. В. Позднедокембрий-

### References

- 1. Avdonin V. V. Prognozirovanie i poiski kolchedanno-polimetallicheskikh mestorozhdenii [Forecasting and searching for pyrite-polymetallic deposits], Moscow, MGU Publ., 1995, 52 p.
- Ermolov P. V., Antonyuk R. M., Grankin M. S. Geodinamika Yuzhnogo Ulytau v pozdnem proterozoe [Geodynamics of Southern Ulytau in the Late Proterozoic], Izvestiya Natsional'noi akademii nauk Respubliki Kazakhstan. Seriya geologii i tekhnicheskikh nauk [Proceedings of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences], 2012, No 2, pp. 5–15. (In Russ.).
- 3. Isabaev E. O. Izuchenie orudeneniya i kharakteristika rudnykh zon mestorozhdeniya Dyusembai [The study of mineralization and characteristics of ore zones of the Dyusembay deposit], Problemy geologii i osvoeniya nedr: trudy XXIV Mezhdunarodnogo simpoziuma im. akademika M. A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 75-letiyu Pobedy v Velikoi Otechestvennoi voine [Problems of geology and subsoil development: proceedings of the XXIV International Symposium named after Academician M. A. Usov for students and young scientists dedicated to the 75th anniversary of Victory in the World War II], Tomsk, 2020, pp. 126–128.
- Karimov E. K. Perspektivy i potentsial mestorozhdeniya Dyusembai [Prospects and potential of the Dyusembay deposit], IV Vserossiiskaya nauchnoprakticheskaya konferentsiya "Peredovye nauchnotekhnicheskie i sotsial'no-gumanitarnye proekty v sovremennoi nauke" [IV All-Russian Scientific and practical conference "Advanced scientific, technical and socio-humanitarian projects in modern science"], 2019, pp. 40–43.
- 5. Markov M. S. Tektonika yuzhnoi chasti Karsakpaiskogo sinklinoriya [Tectonics of the southern part of the Karsakpai synclinorium], Moscow, Akademiya nauk SSSR Publ., 1962, V. 72, 141 p.

ские риолит-гранитные вулкано-плутонические ассоциации Южного Улутау (Центральный Казахстан). – Геотектоника. – 2022. – № 4.– С. 3–34.

- 13. Хамзин Б. С., Тангишев А. А., Беляков С. Н., Есимханова Н. Д. Успешное комплексирование геофизических методов с заверкой бурением на примере месторождения Дюсембай в Центральном Казахстане // Геология и охрана недр. – 2020. – № 2 (75). – С. 59–62.
- Makrygina V. A., Razvozzhaeva E. A., Martikhaeva D. Kh. Organicheskoe veshchestvo i mikroelementy v protsesse metamorfizma metapelitov (Khamar-Daban, Yugo-zapadnoe Pribaikal'e) [Organic matter and trace elements in the process of metamorphism of metapelites (Khamar-Daban, South-Western Baikal region)], *Geokhimiya* [*Geochemistry International*], 1991, No 3, pp. 358–369. (In Russ.).
- 7. Martikhaeva D. Kh., Razvozzhaeva E. A., Vorontsov A. E. Uglerodistoe veshchestvo v metamorficheskikh i gidrotermal'nykh porodakh [Carbonaceous matter in metamorphic and hydrothermal rocks], Moscow, SO RAN, Geo Publ., 2001, 121 p.
- Nurzhanov G. N. Vozmozhnosti i opyt provedeniya nazemnykh geofizicheskikh issledovanii AO "Kazgeologiya" [Opportunities and experience of conducting ground-based geophysical research of JSC "Kazgeologiya"], *Geologiya i okhrana nedr* [*Geology* and protection of mineral resources], 2016, No 4 (61), pp. 49–55. (In Russ.).
- Razvozzhaeva E. A., Budyak A. E., Prokopchuk S. I. Sorbtsionnaya aktivnost' nerastvorimogo uglerodistogo veshchestva chernoslantsevykh obrazovanii v protsesse regional'nogo metamorfizma (Baikalo-Patomskoe nagor'e) [Sorption activity of insoluble carbonaceous matter of black shale formations in the process regional metamorphism (Baikal-Patom Upland)], *Geokhimiya* [*Geochemistry International*], 2013, No 1, pp. 92–96. (In Russ.).
- Sobolev M. V., Toregozhin A. R., Li E. S. Geologicheskoe stroenie i petrograficheskaya kharakteristika porod karaturgaiskogo kompleksa severnogo Ulytau [Geological structure and petrographic characteristics of rocks of the Karaturgai complex of northern Ulytau], Studencheskii vestnik: elektronnyi nauchnyi zhurnal [Student Bulletin: electronic scientific journal], V. 16 (114), No 5, pp. 30-37, available at: https://studvestnik.ru/ journal/stud/herald/114 (Accessed: 15.11.2022).



- Tret'yakov A. A., Danukalov N. K., Degtyarev K. E. Pozdnedokembriiskie vulkanogennye i vulkanogenno-osadochnye tolshchi Ulytauskogo massiva (Tsentral'nyi Kazakhstan): osobennosti sostava i obosnovanie vozrasta [Late Precambrian volcanogenic and volcanogenic-sedimentary strata of the Ulytau massif (Central Kazakhstan): features of composition and justification of age], Fundamental'nye problemy tektoniki i geodinamiki: Materialy LII Tektonicheskogo soveshchaniya [Fundamental problems of tectonics and geodynamics: Materials of the LII Tectonic Meeting], Moscow, GEOS Publ., 2020, V. 2, pp. 338–343. (In Russ.).
- Tret'yakov A. A., Degtyarev K. E., Kanygina N. A., Kovach V. P., Fedorov B. V. Pozdnedokembriiskie riolit-granitnye vulkano-plutonicheskie assotsiatsii

### Авторы

#### Нуржанов Галым Жумабаевич

генеральный директор <sup>1</sup> barlau@ kazakhmys.kz

#### Кузнецов Владимир Вениаминович

кандидат геолого-минералогических наук начальник отдела<sup>2</sup> okt@tsnigri.ru

### Ниценко Павел Александрович

главный геолог <sup>1</sup> pavel.nitsenco@kazakhmys.kz

### Кудрявцева Нелли Георгиевна

кандидат геолого-минералогических наук старший научный сотрудник <sup>2</sup> ngkudryavtseva@tsnigri.ru

### Кузнецова Татьяна Петровна

кандидат геолого-минералогических наук ведущий научный сотрудник<sup>2</sup> kuznetsova@tsnigri.ru

### Мурзагулов Мерген Муратбекович

ведущий геолог<sup>1</sup> mergen.murzagulov@kazakhmys.kz

<sup>1</sup> ТОО «Казахмыс Барлау», г. Астана, Казахстан
<sup>2</sup> ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва, Россия Yuzhnogo Ulutau (Tsentral'nyi Kazakhstan) [Late Precambrian rhyolite-granite volcanic-plutonic associations of Southern Ulutau (Central Kazakhstan)], *Geotektonika* [*Geotectonics*], 2022, No 4, pp. 3–34. (In Russ.).

13. Khamzin B. S., Tangishev A. A., Belyakov S. N., Esimkhanova N. D. Uspeshnoe kompleksirovanie geofizicheskikh metodov s zaverkoi bureniem na primere mestorozhdeniya Dyusembai v Tsentral'nom Kazakhstane [Successful integration of geophysical methods with drilling verification on the example of the Dyusembay deposit in Central Kazakhstan], Geologiya i okhrana nedr [Geology and protection of mineral resources], 2020, No 2 (75), pp. 59–62. (In Russ.).

### **Authors**

Galym Zh. Nurzhanov Director General<sup>1</sup> barley@ kazakhmys.kz

#### Vladimir V. Kuznetsov

PhD in Geology and Mineralogy Head of Department <sup>2</sup> okt@tsnigri.ru

### Pavel A. Nicenko

Chief Geologist <sup>1</sup> pavel.nitsenco@kazakhmys.kz

### Nelly G. Kudryavtseva

PhD in Geology and Mineralogy Senior Researcher<sup>2</sup> ngkudryavtseva@tsnigri.ru

### Tatiana P. Kuznetsova

PhD in Geology and Mineralogy Leading Researcher<sup>2</sup> kuznetsova@tsnigri.ru

### Mergen M. Murzagulov

Leading Geologist <sup>1</sup> mergen.murzagulov@kazakhmys.kz

> <sup>1</sup> Kazakhmys Barlau LLP, Astana, Kazakhstan

<sup>2</sup> FStBI "Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals", Moscow, Russia



СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.412`44 (571.61/.62)

### Особенности локализации колчеданнополиметаллических руд Тушканихинского месторождения (Рудный Алтай)

Localization features of pyrite-polymetallic ores of the Tushkanikhinskoye deposit (Rudny Altai)

### Серавина Т. В., Кузнецова С. В., Филатова Л. К., Донец А. И., Конкин В. Д.

### Seravina T. V., Kuznetsova S. V., Filatova L. K., Donets A. I., Konkin V. D.

Тушканихинское месторождение приурочено к базальтсодержащей риолитовой известково-кремнистотерригенной формации девона, которая представлена осадочными, вулканогенно-осадочными, осадочно-вулканогенными, пирокластическими, вулканогенными породами кислого и основного составов, а также их субвулканическими аналогами. В кислых вулканических породах проявляются признаки игнимбритов. Выявлены первичные колчеданно-полиметаллические руды с неравномерным распределением главных сульфидов: сфалерита, пирита, галенита и халькопирита. Присутствие в рудах колломорфного, фрамбоидального пирита, пирита гранобластовой структуры, а также наличие брекчиевых осадочных руд с кластическими сульфидами в обломках и цементе свидетельствуют о первичном, гидротермально-осадочном происхождении руд. Рудные тела месторождения являются разрушенными гидротермальными постройками, так называемыми рудными холмами.

Ключевые слова: Рудный Алтай, колчеданно-полиметаллические руды, Тушканихинское месторождение, VMS. The Tushkanikhinskoye deposit is confined to the Devonian basalt-bearing rhyolite calcareous-siliceousterrigenous formation, which is represented by sedimentary, volcano-sedimentary, sedimentary-volcanogenic, pyroclastic, volcanic rocks of felsic and basic composition, as well as their subvolcanic equivalents. Felsic volcanogenic rocks show signs of ignimbrites. Primary pyrite-polymetallic ores with an uneven distribution of the main sulfides: sphalerite, pyrite, galena, and chalcopyrite have been identified. The presence of collomorphic, framboidal and granoblastic pyrite in the ores, as well as the presence of sedimentary breccia ores with sulfides in clasts and matrix advocates for the hydrothermal-sedimentary origin of the ores. The ore bodies represent destroyed hydrothermal structures, so-called "ore hills".

Keywords: Rudny Altai, pyrite-polymetallic ores, Tushkanikhinskoye deposit, VMS.

Для цитирования: Серавина Т. В., Кузнецова С. В., Филатова Л. К., Донец А. И., Конкин В. Д. Особенности локализации колчеданно-полиметаллических руд Тушканихинского месторождения (Рудный Алтай). Руды и металлы. 2022. № 4. С. 102–118. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10024

For citation: Seravina T. V., Kuznetsova S. V., Filatova L. K., Donets A. I., Konkin V. D. Localization features of pyrite-polymetallic ores of the Tushkanikhinskoye deposit (Rudny Altai). Ores and metals, 2022, № 4, pp. 102–118. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10024

Тушканихинское месторождение расположено в пределах Берёзовогорского рудного поля, которое находится на северо-западе Змеиногорского рудного района. В строении рудного поля принимают участие осадочные, вулканогенно-осадочные и вулканогенные породы мельничной (D<sub>1-2</sub>mn), заводской (D<sub>2</sub>zv) и сосновской свит (D<sub>2</sub>ss), субвулканические риодациты ранне-среднедевонского возраста мельнично-сосновского вулканического комплекса  $(\pi D_{1-2}ms)$  и верхнедевонские породы змеиногорского интрузивного комплекса ( $\gamma \pi, \delta \pi D_3 z$ ). Палеозойский фундамент на 90-95 % перекрыт рыхлыми мел-палеоген-четвертичными образованиями различных состава и мощности [1, 2]. В структурном плане Берёзовогорское рудное поле отвечает одноимённой синклинали - складчатой структуре второго порядка, осложняющей Быструшинский синклинорий, которая вытянута в субширотном направлении на 18-20 км. Полиметаллическая минерализация в пределах рудного поля была известна с конца XVIII в., детальные исследования в пределах Берёзовогорского рудного поля проводились в 1950-60 гг.

Первое упоминание о Тушканихинском месторождении относится к 1953 г. В это время геологом А. А. Волковым (ВАГТ) проводилась геологическая съёмка частей листов М-44-30-В, Г и М-44-32-А, Б, В, Г. В результате проведённых работ в районе тригопункта была выявлена зона окварцевания с наличием бурых охр. В 1957 г. Берёзовогорская партия приступила к проведению поисково-разведочных работ в этом районе, выявивших новое месторождение, которое впоследствии было названо Тушканихинским [5, 6]. В структурном отношении месторождение приурочено к северному крылу Берёзовогорской синклинали, осложнённому дополнительной мелкой складчатостью. Ведущее простирание слагающих пород – субширотное, падение южное в среднем под углом 45-50°. С глубиной иногда намечается постепенное выполаживание структур.

Вмещающие породы относятся к базальтсодержащей риолитовой известково-кремнисто-терригенной формации девона (рис. 1). В строении месторождения участвуют осадочные, вулканогенно-осадочные, осадочно-вулканогенные, пирокластические, вулканогенные породы кислого и основного составов и их субвулканические аналоги. Основные рудные тела приурочены к пачке вулканогенно-осадочных пород, которая характеризуется частым переслаиванием туфоаргиллитов, кремнистых туфоалевролитов и туффитов, а также мелкозернистых и пелитоморфных известняков с кислыми тефроидами, лавами, лавобрекчиями, игнимбритами, реже базальтами [6, 8].

Надрудные породы представлены преимущественно игнимбритами, кислыми лавами, лавобрекчиями с небольшими прослоями мелко- и среднезернистых туфов, тефроидов, глинисто-кремнистых туфоалевролитов. На отдельных участках месторождения для таких отложений характерно проявление интенсивной гидротермальной проработки и наличие вкрапленного оруденения, иногда с промышленным содержанием полезных компонентов.

Собственно осадочные породы, не содержащие примесь вулканогенного материала, очень малочисленны, это мелкозернистые и пелитоморфные известняки. Известняки отличаются присутствием примеси тонкочешуйчатого хлорита, а также мелкозернистого железистого кальцита и хлорита, расположенных в виде прерывистых обособлений, отчасти напоминающих сложные узоры.

Все остальные разности осадочных пород содержат переменное (не менее 10 %) количество пирокластического материала и не могут рассматриваться как чисто осадочные породы.

Вулканогенно-осадочные породы представлены туфоаргиллитами и кремнистыми туфоалевролитами. Первые имеют тонкозернистую (первично пелитовую) структуру, тонкослоистую текстуру. Слоистость подчёркивается субпараллельно расположенными мелкими линзовидными выделениями тонкозернистого рудного минерала. Породы состоят из тончайшего агрегата серицита, хлорита, гидрослюд и кварца, а также переменного (не более 5 %) количества алевритовых зёрен кварца и обильной вкрапленности мельчайших зёрен рудного минерала (магнетит и пирит) (рис. 2, *a*).







© Серавина Т. В., Кузнецова С. В., Филатова Л. К., Донец А. И., Конкин В. Д., 2022 © Seravina T. V., Kuznetsova S. V., Filatova L. K., Donets A. I., Konkin V. D., 2022



### Рис. 1. Литолого-фациальная карта и разрез по линии АБ Тушканихинского месторождения:

фации вулканогенных пород кислого состава: *1* – жерловая зона, игнимбриты (автомагматические брекчии риолитов и крупнопорфировые риолиты); околожерловая зона: *2* – лавобрекчии кислого состава, игнимбриты, *3* – туфы и тефроиды кислого состава грубообломочные; промежуточная зона: *4* – лавы и лавобрекчии кислого состава; *5* – туфы и тефроиды кислого состава мелкообломочные; фации вулканогенно-осадочных пород, удалённая зона: *6* – переслаивание кремнистых туффитов, тефроидов и туфоалевролитов, *7* – переслаивание туфоаргиллитов, кремнистых туфоалевролитов, кремнистых и пелитоморфных известняков; *8* – рудные тела; *9* – скважины: *a* – на карте, *b* – на разрезе, *10* – разрывные нарушения

Fig. 1. Lithofacies map and cross-section along the AB line of the Tushkanikhinskoe deposit:

facies of felsic volcanic rocks: 1 – crater zone, ignimbrites (automagmatic breccias of rhyolite and coarse porphyritic rhyolite); near-crater zone: 2 – felsic lava breccia, ignimbrite; 3 – coarse clastic felsic tuff and tephroid; intermediate zone: 4 – felsic lavas and lava breccia; 5 – small-grained tuff and tephroid of felsic composition; facies of volcano-sedimentary rocks; remote zone: 6 – interbedding of siliceous tuffite, tephroid, and tuffaceous siltstone; 7 – interbedding of tuffaceous mudstone, siliceous tuffaceous siltstone, siliceous tuffite, fine-grained and pelitomorphic limestone; 8 – ore bodies; 9 – wells: a – on the map, b – in the section, 10 – faults





### Рис. 2. Вулканогенно-осадочные и осадочно-вулканогенные породы:

a – туфоаргиллит, b – кремнистый туфоалевролит, c – кремнистый туффит. Николи скрещены

Fig. 2. Volcano-sedimentary and sedimentary-volcanic rocks:

a-tuffaceous argillite, b-siliceous tuffaceous silt<br/>stone, c-siliceous tuffite. Crossed nicols



Кремнистые туфоалевролиты – однородномассивные породы, алевритовый материал которых представлен неокатанным и слабосортированным по размеру кварцем. Цементирующая масса – криптозернистый, существенно гидрослюдисто-кварцевый агрегат с подчинённым тонкочешуйчатым хлоритом (см. рис. 2, *b*).

Осадочно-вулканогенные породы в рудовмещающем разрезе представлены разнообразными кремнистыми туффитами (пирокластического материала до 50 %). Породы состоят из тонкого срастания криптозернистого агрегата кварца, местами слабораскристаллизованного и тонкочешуйчатого хлорита, пронизанного мелкой рудной вкрапленностью (см. рис. 2, с). Имеются теневые кристаллы полевого шпата с реликтовой спайностью, а также отдельные крупные чешуи мусковита, реже их скопления. Некоторые овальные выделения мелкозернистого кварца, возможно, являются реликтовыми радиоляриями. Иногда туффиты содержат более крупный пирокластический материал – в основном это осколки кристаллов кварца и полевых шпатов (~ 10 %).

Пирокластические породы представлены туфами и тефроидами кислого состава. Последние отличаются от туфов сортировкой пирокластического материала по размеру (сортированные зернистые туфы) без признаков его обработки. Макроскопически тефроиды очень похожи на туфопесчаники, полимиктовые и аркозовые песчаники, и даже – мелкозернистые гранитоиды. Структура тефроидов кислого состава гетерокластовая, текстура мелкопятнистая. В породе присутствует много кристаллокластов кварца (~ 1/3), полевых шпатов оскольчатой и угловатой форм, немногочисленные кристаллокласты тёмноцветных минералов, мелкие литокласты олигофировых риолитов, хлоритизированного кислого стекла и обломков железистого карбоната с хлоритом и лейкоксеном. Каждый обломок окружён тонкой каёмкой из серицита или хлорита. Обработка обломков отсутствует, но сортировка видна (рис. 3, *a*).

Среди вулканических пород кислого состава выделяются два типа: к первому отнесены олигофировые разности риолитов, ко второму – игнимбриты.

Вулканические породы первого типа (олигофировые риолиты) внешне очень похожи на кремнистые породы, однако всегда содержат



### Рис. 3. Пирокластические и вулканические породы кислого состава:

*а* – тефроид, *b* – олигофировый риолит. Николи скрещены

Fig. 3. Felsic pyroclastic and volcanic rocks:

a – tephroid, b – oligophyric rhyolite. Crossed nicols


реликты порфировой структуры, структур и текстур первично стекловатой основной массы. Лавы и лавобрекчии олигофировых риолитов – породы с неравномерно перекристаллизованной гетерогранобластовой основной массой и незначительным количеством мелких (до 1 мм) вкрапленников кварца, калиевого полевого шпата (микроклина) и альбитизированного плагиоклаза. В отдельных лавовых обломках имеется тонкая флюидальность. Основная масса кварцево-полевошпатовая с переменным количеством чешуек серицита. В калиевом полевом шпате видна тонкая микроклиновая решётка (см. рис. 3, *b*).

Вулканические породы второго типа в подавляющей части проявляют признаки игнимбритов. Текстурно-структурные неоднородности обусловлены ликвационными процессами, а не свариванием (спеканием) пирокластического материала, как это изначально было предложено П. Маршаллом. В отношении игнимбритов мы придерживаемся точки зрения А. Стейнера (1963 г.), изучавшего те же породы, что и П. Маршалл, и установившего, что основная масса в них состоит из двух различных по показателю преломления (и, следовательно, составу) стёкол. Он предложил несмешиваемость расплава, тем самым устранив противоречие между особенностями их структур (часто пепловидных) и геологическим (подводным, иногда интрузивным) залеганием пород, исключающим сваривание (спекание) пирокластического материала [7]. А. Стейнер предложил оставить термин «игнимбрит» как описательный, а не как генетический.

Эти породы чрезвычайно разнообразны по своим структурно-текстурным особенностям, резко варьирующим. Отмечаются порфировые разности с вкрапленниками нескольких поколений кварца, полевых шпатов (плагиоклаз, микроклин), часто опацитизированного тёмноцветного минерала (биотит, реже роговая обманка). Имеются средне- и густопорфировые (невадитовые) разности (до 40 % вкрапленников) (рис. 4, *a*), реже – афировые игнимбриты.

Чётко выделяется несколько поколений вкрапленников (минимум два), при этом ранние – более мелкие, часто обломочной и оскольчатой форм, поздние – крупные, содержат больше включений; иногда кварц имеет корродированную основной массой специфическую «бухтообразную» форму (см. рис. 4, *b*).

Основная масса неоднородная, гидротермально проработанная. Состоит из агрегата кварца, полевых шпатов и переменного, часто преобладающего количества тонкочешуйчатого хлорита. Иногда наравне с ним присутствует серицит. Оба минерала развиваются по вулканическим стёклам, отличным по своему составу и свойствам от стёкол, замещённых тонким кварц-полевошпатовым агрегатом. Взаимоотношения этих двух типов стёкол и обусловливают всё разнообразие структур и текстур игнимбритов (см. рис. 4, c-d).

Вулканические породы основного состава представлены оливиновыми базальтами. Это породы порфировой структуры, содержащие вкрапленники разложенного оливина и клинопироксена. Оливин сохранился в виде теневых реликтов с частично различимой ячеистой структурой, образованной в процессе серпентинизации. Клинопироксен призматического габитуса, местами с двумя системами спайности, псевдоморфно замещён хлоритом, последний с отчётливым плеохроизмом. Имеются также гломеропорфировые сростки серицитизированного и соссюритизированного плагиоклаза. Основная масса – мелкозернистый агрегат хлорита, серицита, альбита и тонкой густой вкрапленности рудного минерала. Рудный минерал - титаномагнетит неправильной и скелетной форм - частично замещён лейкоксеном, распределён очень неравномерно, размер 0,05-1 мм.

Среди субвулканических пород кислого состава выделяются олигофировые риолиты и игнимбриты, основного – долериты.

Олигофировые риолиты субвулканической фации внешне мало чем отличаются от эффузивных аналогов. Главный критерий отнесения пород к субвулканической фации – характер контактов с вмещающими толщами.

Игнимбриты субвулканической фации обладают некоторыми специфическими петрографическими особенностями, отличающими их от эффузивных аналогов:





# Рис. 4. Структурно-текстурные особенности игнимбритов:

а – игнимбрит с густопорфировой (невадитовой) структурой. Видны фенокристаллы плагиоклаза и микроклина в гетерогранолепидобластовой основной массе; b – характерные формы фенокристаллов «бухтообразного» кварца в игнимбритах; c – реликты перлитовой структуры основной массы в игнимбритах, d – игнимбриты с линзовидно-полосчатой сложной флюидальностью. Светлые полосы и линзы выполнены серицитолитами. Николи скрещены

Fig. 4. Structural and textural features of ignimbrite:

a – ignimbrite with densely porphyritic (non-validity) structure. Plagioclase and microcline phenocrysts are visible in the heterogranolepidoblast groundmass; b – characteristic forms of phenocrysts of "bay-like" quartz in ignimbrites; c – relics of the perlite structure of the groundmass in ignimbrite; d – ignimbrite with lenticular-banded complex fluidity. Light stripes and lenses of sericitolite. Crossed nicols

• степень порфировости значительно выше, чем в эффузивных аналогах (до 70 %);

• отсутствие опацитизации тёмноцветных минералов;

• более высокая степень хлоритизации основной массы;

• специфический характер контактов с вмещающими породами.

Это выражено наличием инъекционнометасоматических ореолов вблизи контактов с субвулканическими игнимбритами (автомагматическими брекчиями риолитов). Контак-



товые породы содержат обломки необычной «хвостатой» формы (макро- и микроинъекции автомагматических брекчий), выполненные серицитом или хлоритом. Такие инъекции иногда наблюдаются на достаточном удалении от основного субвулканического тела.

Субвулканические игнимбриты подразделяются на автомагматические брекчии риолитов и крупнопорфировые риолиты.

Автомагматические брекчии риолитов обладают в отличие от своих излившихся аналогов невадитовой структурой и более однородным характером цементирующей основной массы. Вкрапленников нескольких поколений светлоцветных минералов более 40 %. Среди полевых шпатов резко доминирует калиевый (микроклин). Тёмноцветный минерал (биотит) слабо хлоритизирован и практически не опацитизирован (рис. 5, *a*). В основной массе отмечаются участки со структурой, напоминающей трахитоидную. Возможно, данные породы обладают несколько повышенной калиевостью.

Крупнопорфировые риолиты отличаются от автомагматических брекчий риолитов более однородным внутренним строением, меньшей степенью порфировости и автобрекчирования. Породы содержат вкрапленники кварца, микроклина, разложенного плагиоклаза (до 30 %); довольно крупные вкрапленники кварца (2 мм и более), которые, как правило, частично сохраняют огранку. Корродирование основной массой значительно слабее, чем в вулканитах лавовой фации (см. рис. 5, *b*), мелкие вкрапленники имеют оскольчатую форму. В крупных кристаллах видны первично-магматические расплавные включения с рудным минералом. Основная масса породы гетеролепидогранобластовая, в ней отмечаются участки хлоритизированного стекла и подчинённые им выделения серицита. Присутствуют отдельные (0,5-1 мм) метасферолиты с сегментным характером угасания и поздний гидротермальный идиоморфный гексагональный кварц правильной длиннопризматической формы.



Рис. 5. Породы субвулканической фации:

*а* – порфировые выделения кварца и биотита в автомагматической брекчии риолитов; *b* – крупнопорфировый риолит. Николи скрещены

a – porphyritic segregations of quartz and biotite in automagmatic rhyolite breccia; b – coarse porphyritic rhyolite. Crossed nicols

Fig. 5. Rocks of subvolcanic facies:



Долериты субвулканической фации имеют полную раскристаллизацию основной массы. Прекрасно видна офитовая структура. Породы порфировые, содержат вкрапленники длиннопризматической формы и лейстовидные выделения плагиоклаза, последние и формируют офитовую структуру (см. рис. 5, c). В интерстициях плагиоклаза отмечаются мелкие ксеноморфные выделения хлоритизированного и эпидотизированного тёмноцветного минерала. Встречаются кварцевые гнёзда со сфалеритом (0,01–0,1–0,2 мм) изометрической и неправильной форм.

Вмещающие породы Тушканихинского месторождения в результате метасоматических процессов под воздействием гидротерм претерпели значительные изменения, но сохранили признаки первичного происхождения. Это кварц-пиритовые, пирит-кварцевые, карбонатсодержащие породы по олигофировым риолитам, хлорит-карбонатные кварцсодержащие, брекчированные олигофировые риолиты с пирит-кварцевым цементом, серицитхлоритовые метасоматиты по игнимбритам, слюдисто-известковистые кварцсодержащие породы по известковистым туфоалевролитам, серицитолиты. Отмечается также неравномерное, в целом не очень интенсивное брекчирование пород и минералов.

Слюдисто-известковистый кварцсодержащий сланец по известковистому туфоалевролиту – зернистая порода, состоящая из кристаллов кальцита неправильной формы, кварца алевритовой размерности, полос серицита и мусковита. Слюдистые полосы более тёмные, иногда собраны в микроскладки (рис. 6, *a*).

Среди контактово-изменённых пород отмечаются кварцевые и кварц-эпидотовые роговики по риолитам. В основной ткани кварцевых роговиков по олигофировым риолитам содержится небольшое количество (менее 1 %) изометрических выделений скелетного тита-







### Рис. 6. Изменённые породы:

а – слюдисто-известковистый кварцсодержащий сланец по известковистому туфоалевролиту;
b – кварцевый роговик по олигофировому риолиту;
с – кварцэпидотовый роговик по риолиту. Николи скрещены

a – micaceous-calcareous quartz-bearing schist after calcareous tuffaceous siltstone; b – quartz hornfelses after oligophyre rhyolite; c – quartz-epidote hornfelses after rhyolite. Crossed nicols

Fig. 6. Altered rocks:

номагнетита (см. рис. 6, *b*). Структура породы роговиковая, основная масса первичной породы, вероятно, представляла собой фельзитовый, микропойкилитовый и микросферолитовый агрегаты. Среди акцессорных минералов заметно проявлен апатит (~ 0,1 мм) короткостолбчатой формы и в виде кристаллов с шестиугольными поперечными изотропными сечениями.

Кварц-эпидотовые роговики по риолитам имеют полосчатую текстуру, возможно, унаследованную от первичной флюидальности (см. рис. 6, *c*). Эпидот сложен удлинёнными кристаллами с поперечной спайностью и мелкими изометрическими зёрнами. В интерстициях между выделениями эпидота расположен микрозернистый халцедоновидный кварц. Относительно крупные зёрна кварца, возможно, являются порфиробластами, их размер достигает 0,3 мм. Присутствуют прожилки кварца с эпидотом, сложенные роговиковым кварцем и удлинёнными шестоватыми кристаллами эпидота.

Рудные зоны месторождения имеют сложное внутреннее строение. Среди них нередко обосабливаются несколько сближенных рудных тел, ориентированных параллельно друг другу и разделённых слабоминерализованными или безрудными породами. По форме это часто согласные или субсогласные линзовидные залежи со значительными колебаниями мощностей и неравномерным содержанием полезных компонентов. Контакты рудных тел нечёткие, с постепенным снижением интенсивности оруденения и переходом в зону рассеянной сульфидной минерализации в виде убогой вкрапленности и микропрожилков.

Мощность рудных тел варьирует в пределах от 0,4 до 39,0 м, однако чаще не превышает 10–15 м. Руды Тушканихинского месторождения сульфидные. Окисленные разности распространены весьма ограниченно. По вещественному составу руды существенно свинцово-цинковые с небольшим содержанием меди и неравномерным распределением полезных компонентов. Минерализация встречается в виде вкрапленности, гнёзд, просечек, прожилков, сульфидов в обломках и цементе брекчий. Главные рудные минералы – сфалерит, пирит, галенит, халькопирит. Эпизодически в рудах присутствуют блёклая руда, пирротин, гематит, вюрцит, марказит, арсенопирит, висмутин, акантит, теллуровисмутит, ковеллин и халькозин. Из жильных минералов развит в основном кварц, реже серицит, хлорит, кальцит, доломит, сидерит, барит и флюорит. Текстуры: гнездово-вкрапленная, прожилково-вкрапленная, вкрапленно-гнездово-прожилковая, брекчиевая, массивная, полосчатая, линзовидная; микротекстуры: колломорфная и тонкопетельчатая. Структуры минералов: гипидиоморфнозернистая, аллотриоморфнозернистая, ксеноморфная, цементации, интерстициальная, концентрическизональная, фрамбоидальная, деформационная, дробления, катаклаза и гранобластовая [4].

Имеются участки со значительным преобладанием одного или двух главных сульфидов, реже всех основных сульфидов примерно в равных соотношениях. Наблюдаются вкрапленность, гнёзда и прожилки – пиритгаленит-сфалеритовые, халькопирит-галенитсфалеритовые, халькопирит-сфалеритовые, пирит-халькопирит-сфалеритовые, галенитхалькопирит-сфалеритовые, галенитхалькопирит-сфалеритовые, галениткопирит-галенитовые, пирит-галенитовые, пирит-блёклорудно-халопирит-сфалерит-галенитовые, халькопирит-пиритовые, сфалерит-халькопирит-пиритовые, халькопирит-галенит-пиритовые, гематит-халькопиритовые.

Содержание полезных компонентов в рудах колеблется в широких пределах. Максимальное содержание Cu, Pb и Zn составляет 7,15, 49,34 и 39,43 % соответственно. Среднее по месторождению – 0,23, 1,11 и 2,6 %. Соотношение средних содержаний Cu, Pb и Zn – 1:5:11.

Особенности свинцово-цинковых руд. В целом свинцово-цинковая минерализация отмечается в виде гнёзд, просечек и вкрапленности, в небольшом количестве в пределах гнёзд могут присутствовать пирит и халькопирит.

Сфалерит встречается в виде разрозненных угловатых выделений, похожих на обломки (размер 2–3 мм), содержащих многочис-



ленные трещины. В обломках присутствует эмульсионная вкрапленность халькопирита и включения пирита. Сфалерит корродирован нерудными минералами. Пирит отмечается как тонкая вкрапленность около или в пределах выделений галенита, а также в виде гипидиоморфных скоплений (0,3–1 мм) на контакте с галенитом (рис. 7, *a*). В интерстициях зёрен внутри скоплений сфалерита развивается галенит.

Галенит образует просечки и гнёзда (1,5– 2 см), в пределах которых представляет собой ветвящиеся выделения размером до нескольких миллиметров. Внутренняя область этих



# Рис. 7. Особенности свинцово-цинковых руд:

а – морфология выделения халькопирит(жёлтый)-пирит(светло-жёлтый)-галенитовых(светло-серый) срастаний; *b* – морфология выделений галенита (светло-серый); *c* – выделения блёклой руды (серая) на контакте с галенитом (светло-серый); *d* – морфология выделений галенита (светло-серый), сфалерита (тёмно-серый) и халькопирита (жёлтый)

Fig. 7. Lead-zinc ores:

a – morphology of chalcopyrite(yellow)-pyrite(light yellow)-galena(light gray) intergrowths; b – morphology of galena (light gray); c – fahlore (grey) on contact with galena (light gray); d – morphology of galena (light gray), sphalerite (dark gray) and chalcopyrite (yellow)



выделений представлена сплошным галенитом, периферия – тонкопетельчатым за счёт развития галенита в интерстициях нерудного минерала (см. рис. 7, *b*). В срастании с галенитом в пределах данной минерализации изредка встречается акантит.

Халькопирит и пирит находятся в тесной ассоциации. Халькопирит цементирует и замещает пирит, содержит также мелкие, частично замещённые включения пирита. Кроме этого, встречается в виде включений (0,04– 0,06 мм) в галените и сфалерите.

Участками галенит-сфалеритовая минерализация переходит в существенно галенитовую, представленную гнёздами, вкрапленностью и просечками состава кварц – блёклая руда – халькопирит – сфалерит – галенит. Галенит составляет бо́льшую часть гнёзд и просечек и присутствует в виде выделений петельчатой текстуры. Границы выделений извилистые, зубчатые. Эта минерализация содержит множество вростков нерудных минералов, главным образом кварца, а также чешуйчатых минералов – хлорита или серицита. Блёклая руда находится в тесном прорастании с галенитом в пределах некоторых просечек. Выделения изометрические, размером 0,1-0,5 мм (см. рис. 7, с). Образования халькопирита (0,05-0,1 мм) располагаются на контакте галенита и блёклой руды, в других случаях на контакте со сфалеритом либо около его выделений. Сфалерит встречается в виде небольших скоплений, которые корродируются и замещаются галенитом (см. рис. 7, *d*), и содержит очень тонкую эмульсионную вкрапленность халькопирита, распределённую крайне неравномерно. Сфалерит катаклазирован, размер выделений 0,1-0,4 мм. Пирит (в пределах выделений галенита) представляет собой корродированные, частично замещенные зёрна размером 0,08-0,15 мм, которые окружены редкой вкрапленностью изометрических зёрен сфалерита и петельчатых выделений галенита. В породе присутствуют растащенные выделения фрамбоидального и глобулярного пирита.

Особенности медно-колчеданных руд. Гнёзда и прожилки, представляющие собой срастания пирита и халькопирита, иногда с небольшой примесью других сульфидов, достаточно широко распространены на месторождении. Выделяются два типа срастаний. Особенностью первого является присутствие большого количества сильно раздробленного и перетёртого пирита. Его скопления сцементированы халькопиритом (рис. 8, *а*), который кроме того развивается по его трещинам. В ряде случаев халькопирит замещает пирит. Халькопирит, в свою очередь, в некоторых крупных выделениях несёт следы деформации, но несколько затушёванные вследствие большей пластичности данного минерала. Халькопирит, замещающий пирит, а также представленный петельчатыми выделениями в интерстициях нерудных минералов, не деформирован. Очевидно, что массивный халькопирит выделился несколько позже пирита, но почти одновременно с ним, а далее эти минералы испытали деформационно-метаморфическое воздействие. Вследствие этого часть вещества халькопирита была перераспределена с образованием петельчатого халькопирита, который развивался по трещинам и в интерстициях нерудных минералов. В пределах данной минерализации были встречены единичные выделения арсенопирита, псевдоморфно замещённого пиритом. Во втором случае характерными пиритхалькопиритовыми срастаниями являются выделения халькопирита, содержащие скопления пирита округлого облика, концентрирующиеся вокруг «каверн» разного размера (см. рис. 8, *b*), чаще полых, но иногда выполненных кварцем.

Такой же тип халькопирит-пиритовых срастаний на контакте со сфалеритом характерен для медно-цинково-колчеданных руд с подчинённым количеством галенита. В составе данной минерализации эпизодически присутствует блёклая руда, в единичных случаях установлен висмутин.

Также следует отметить присутствие брекчиевых руд с сульфидными обломками и руд, где тонкокластические и новообразованные сульфиды являются цементом брекчий. В обоих случаях среди обломков встречаются частично окатанные обломки алевролитов. В цементе различных брекчиевых разностей преобладает аллотриоморфный пирит. После





#### Рис. 8. Особенности медно-колчеданных руд:

*а* – раздробленный пирит (светло-жёлтый) цементируется халькопиритом (жёлтый); *b* – зона повышенной кавернозности сложного строения в халькопирите (жёлтый), вокруг округлых «каверн» развивается пирит (светло-жёлтый)

#### Fig. 8. Copper-pyrite ores:

a – fractionated pyrite (light yellow) cemented by chalcopyrite (yellow); b – a zone of increased number of caverns with a complex structure in chalcopyrite (yellow), pyrite is formed around rounded caverns (light yellow)

структурного травления выявляется колломорфное, фрамбоидальное (рис. 9, *a*) или тонкодисперсное строение пирита. Пирит значительно катаклазирован и перекристаллизован. Перекристаллизованные разности представлены гипидиоморфнозернистым пиритом, который цементируется сфалеритом, галенитом и халькопиритом. Пирит в обломках массивный, размером до 1,5 см (см. рис. 9, *b*).

Особенности минерализации штокверковых зон. К данному типу можно отнести минерализацию в трещинах и локальных зонах дробления вмещающих пород [3].

Сульфиды, развивающиеся по сети тонких трещин во вмещающих породах, отмечаются в виде халькопирит-сфалеритовых, халькопирит-галенит-сфалеритовых и галенитовых агрегатов. Гнёзда представляют собой раздувы или скопления раннего пирита, в интерстициях которого развиваются полиметаллы. Сфалерит в прожилках образует сплошные выделения с крайне неровными зубчатыми границами. Его особенность – наличие наряду с тонкой эмульсионной вкрапленностью крупных округлых выделений халькопирита (около 0,02 мм), равномерно распределённых в сфалеритовой массе (рис. 10, *a*). Вокруг выделений сфалерит очищен, что может свидетельствовать о перераспределении вещества. Галенит развивался в пределах тех же прожилков, однако выделился несколько позднее, так как его взаимоотношения со сфалеритом носят коррозионный характер: галенит корродирует и замещает сфалерит. В тесной ассоциации с галенитом находится хлорит. Прорастания галенита с хлоритом имеют характерный облик и тянутся вдоль многих прожилков; карбонат также образует оторочки вдоль границ сульфидов.

Среди сульфидов в цементе локальных зон дробления преобладает сфалерит, присутствует халькопирит, в небольшом количестве наблюдаются пирит и галенит. Сфалерит интенсивно катаклазирован и образует сплошные выделения в пределах цемента. Он содержит неравномерную эмульсионную вкрапленность халькопирита (на некоторых участках она отсутствует), а также выделения халькопирита и галенита. В ряде случаев вкрапленность халькопирита укрупняется (см. рис. 10, *b*) или





# Рис. 9. Особенности брекчиевых руд:

a – скопление фрамбоидов пирита обрастает колломор<br/>фным пиритом; b – интенсивно катаклазированный обломок пирита

#### Fig. 9. Breccia ores:

a – accumulation of pyrite framboids overgrew by colloform pyrite; b – intensely cataclased pyrite fragment





# Рис. 10. Особенности минерализации штокверковых зон:

 а – прожилок галенит(светло-серый)-сфалеритовый
(тёмно-серый); b – сфалерит (тёмно-серый), насыщенный вкрапленностью халькопирита (жёлтый);
с – выделения халькопирита (жёлтый) на контакте со сфалеритом (тёмно-серый)

#### Fig. 10. Stockwork zones:

a – galena (light gray)-sphalerite (dark gray) vein; b – sphalerite (dark gray), saturated with disseminated chalcopyrite (yellow); c – chalcopyrite (yellow) precipitation at contact with sphalerite (dark gray)



перераспределяется вдоль двойниковых швов или по другим ослабленным зонам. По трещинам в сфалерите развиваются карбонат и халькопирит. Они пересечены более интенсивной системой (мощность трещин 0,1–0,3 мм), что свидетельствует о наложении поздних деформаций. Также присутствует переотложенный сфалерит, который наблюдается в обломках породы и цементе (в интерстициях нерудного минерала). Он характеризуется интерстициальной структурой и отсутствием деформаций и эмульсионной вкрапленности. Халькопирит рассредоточен неравномерно, образует изометрические выделения размером до 3 мм в сфалерите (см. рис. 10, с). Выделяются катаклазированные участки, корродированные и пересечённые кварцем, а также переотложенный халькопирит без трещин, цементирующий сфалерит. Галенит (0,01–0,2 мм) в пределах сульфидных агрегатов ассоциирует с халькопиритом обоих типов и корродирует катаклазированный халькопирит. Образуется почти синхронно с переотложенным халькопиритом. Пирит находится в пределах других сульфидов в виде реликтов корродированных зёрен размером 0,05-0,2 мм.

Таким образом, в пределах штокверковых зон явно выделяются более ранняя и более поздняя генерации сульфидов. Подобные зоны могут носить синрудный характер, свидетельством чего может служить присутствие первичных сульфидов в цементе, затушёванность обломков метасоматическими преобразованиями до такой степени, что в некоторых зонах обломки трудноразличимы.

Выводы:

1. Месторождение приурочено к базальтсодержащей риолитовой известково-кремнисто-терригенной формации девона.

2. В строении месторождения участвуют осадочные, вулканогенно-осадочные, осадочно-вулканогенные, пирокластические, вулканогенные породы кислого и основного составов и их субвулканические аналоги.

3. Кислые вулканические породы второго типа проявляют признаки игнимбритов.

4. Вмещающие породы подвержены гидротермальной проработке (карбонатизации, окварцеванию, хлоритизации), а также брекчированию. Эпидотизация проявлена довольно редко. Породы в зонах рудной минерализации – метасоматиты различного состава.

5. В пределах месторождения выявлены первичные колчеданно-полиметаллические руды с неравномерным распределением главных сульфидов: сфалерита, пирита, галенита и халькопирита.

6. Присутствие в рудах колломорфного, фрамбоидального пирита, пирита гранобластовой структуры, а также наличие брекчиевых осадочных руд с кластическими сульфидами в обломках и цементе свидетельствуют о первичном, гидротермально-осадочном происхождении руд.

7. Прожилково-вкрапленные руды отвечают области подводящего канала. Зоны повышенной кавернозности сложного строения лежат выше штокверковых зон и, по всей видимости, маркируют участки подъёма флюидов.

8. Сульфиды месторождения в значительной степени катаклазированы и перекристаллизованы (затушёвано не только колломорфное строение, но и гранобластовое), в ряде случаев в сульфидах присутствуют каймы регенерации или переотложенные новообразованные сульфиды вдоль границ первичных выделений, что говорит о деформационно-метаморфических воздействиях с перекристаллизацией и частичным перераспределением вещества.

9. Для основного рудного тела характерен раздув мощности, наличие осадочных брекчий с кластическим сульфидным материалом в обломках и цементе, колломорфных сульфидных корок, фрамбоидального пирита в кровле и рудокластов в вышележащих породах. Рудовмещающими породами служат вулканогенно-осадочные отложения с сортированным пирокластическим материалом. Эти факты свидетельствует о том, что рудные тела месторождения представляют собой разрушенные гидротермальные постройки, так называемые рудные холмы.

10. Исходя из анализируемых данных очевидно, что Тушканихинское месторождение – типичный представитель VMS (месторождения в вулканогенных ассоциациях).



# Список литературы

- Кузнецов В. В., Кудрявцева Н. Г., Галямов А. Л., Кузнецова С. В., Серавина Т. В. Геолого-генетические основы прогноза и поисков колчеданно-полиметаллических месторождений рудно-алтайского типа // Отечественная геология. – 2014. – № 2. – С. 30–38.
- Кузнецов В. В., Кудрявцева Н. Г., Серавина Т. В., Мурзин О. В., Корчагина Д. А., Кузнецова С. В., Миляев С. А. Основы прогноза и поисков колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая. – М.: ЦНИГРИ, 2019. – 207 с.
- Кузнецова С. В. Метаморфические преобразования первичных гидротермально-осадочных руд (На примере Змеиногорского рудного района Рудного Алтая) // XX Всероссийская научная конференция «Уральская минералогическая школа-2014: сборник статей». – 2014. – С. 133–142.
- 4. *Кузнецова С. В.* Некоторые вопросы генезиса и минералогические особенности стратиформных руд колчеданно-полиметаллических место-

#### References

- Kuznetsov V. V., Kudryavtseva N. G., Galyamov A. L., Kuznetsova S. V, Seravina T. V. Geologo-geneticheskie osnovy prognoza i poiskov kolchedannopolimetallicheskikh mestorozhdenii rudnoaltaiskogo tipa [Geological and genetic foundations of forecasting and prospecting for pyrite-polymetallic deposits of the Rudnoaltai type], *Otechestvennaya* geologiya [National Geology], 2014, No 2, pp. 30– 38. (In Russ.).
- Kuznetsov V. V., Kudryavtseva N. G., Seravina T. V., Murzin O. V., Korchagina D. A., Kuznetsova S. V., Milyaev S. A. Osnovy prognoza i poiskov kolchedannopolimetallicheskikh mestorozhdenii Rudnogo Altaya [Fundamentals of forecasting and prospecting for pyrite-polymetallic deposits of the Ore Altai], Moscow, TsNIGRI Publ., 2019, 207 p.
- 3. Kuznetsova S. V. Metamorficheskie preobrazovaniya pervichnykh gidrotermal'no-osadochnykh rud (Na primere Zmeinogorskogo rudnogo raiona Rudnogo Altaya) [Metamorphic transformations of primary hydrothermal-sedimentary ores (On the example of the Zmeinogorsky ore district of the Ore Altai)], XX Vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya "Ural'skaya mineralogicheskaya shkola-2014: sbornik statei" [XX All-Russian Scientific Conference

рождений Рудного Алтая, Алтайский край // Руды и металлы. – 2017. – № 2. – С. 40–50.

- Серавина Т. В. Обстановки локализации полиметаллических руд Березовогорского рудного поля (Рудный Алтай) // Руды и металлы. – 2014. – № 4. – С. 30–36.
- Серавина Т. В. Геологическое строение и петрохимические особенности рудоносных вулканогенно-осадочных отложений Березовогорского рудного поля (Рудный Алтай) // Отечественная геология. – 2015. – № 4. – С. 3–8.
- 7. Филатова Л. К., Филатов Е. И. Кремнекислые вулканиты девонской базальт-риолитовой формации Рудного Алтая // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2015. – № 1. – С. 37–44.
- Чекалин В. М. Полезные ископаемые северо-западного Алтая: позиция, изученность и перспективы открытия новых месторождений // Руды и металлы. – 2006. – № 5. – С. 39–47.

"Ural Mineralogical School-2014: collection of articles"], 2014, pp. 133–142. (In Russ.).

- Kuznetsova S. V. Nekotorye voprosy genezisa i mineralogicheskie osobennosti stratiformnykh rud kolchedanno-polimetallicheskikh mestorozhdenii Rudnogo Altaya, Altaiskii krai [Some questions of genesis and mineralogical features of stratiform ores of pyrite-polymetallic deposits of Ore Altai, Altai Krai], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2017, No 2, pp. 40–50. (In Russ.).
- Seravina T. V. Obstanovki lokalizatsii polimetallicheskikh rud Berezovogorskogo rudnogo polya (Rudnyi Altai) [Localization conditions of polymetallic ores of the Berezogorsky ore field (Rudny Altai)], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2014, No 4, pp. 30–36. (In Russ.).
- Seravina T. V. Geologicheskoe stroenie i petrokhimicheskie osobennosti rudonosnykh vulkanogenno-osadochnykh otlozhenii Berezovogorskogo rudnogo polya (Rudnyi Altai) [Geological structure and petrochemical features of ore-bearing volcanogenic sedimentary deposits of the Berezogorsky ore field (Rudny Altai)], Otechestvennaya geologiya [National Geology], 2015, No 4, pp. 3–8. (In Russ.).



 Filatova L. K., Filatov E. I. Kremnekislye vulkanity devonskoi bazal't-riolitovoi formatsii Rudnogo Altaya [Silicic acid volcanites of the Devonian basaltrhyolite formation of the Ore Altai], Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya [Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Research], 2015, No 1, pp. 37–44. (In Russ.).

# Авторы

#### Серавина Татьяна Валерьевна

кандидат геолого-минералогических наук заместитель начальника отдела seravina@tsnigri.ru

#### Кузнецова Светлана Владимировна

научный сотрудник skuznetsova@tsnigri.ru

#### Филатова Людмила Константиновна

кандидат геолого-минералогических наук старший научный сотрудник filatova@tsnigri.ru

#### Донец Александр Иванович

доктор геолого-минералогических наук ведущий научный сотрудник donets@tsnigri.ru

# Конкин Виктор Дмитриевич

доктор геолого-минералогических наук ведущий научный сотрудник konkin@tsnigri.ru

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва, Россия 8. Chekalin V. M. Poleznye iskopaemye severo-zapadnogo Altaya: pozitsiya, izuchennost' i perspektivy otkrytiya novykh mestorozhdenii [Minerals of the north-western Altai: position, study and prospects for the discovery of new deposits], *Rudy i metally* [*Ores and Metals*], 2006, No 5, pp. 39–47. (In Russ.).

# **Authors**

### Tatiana V. Seravina

PhD in Geology and Mineralogy Deputy Head of Department seravina@tsnigri.ru

#### Svetlana V. Kuznetsova

Researcher skuznetsova@tsnigri.ru

# Lyudmila K. Filatova

PhD in Geology and Mineralogy Senior Researcher filatova@tsnigri.ru

### **Alexander I. Donets**

D. Sc. in Geology and Mineralogy Leading Researcher donets@tsnigri.ru

# Viktor D. Konkin

D. Sc. in Geology and Mineralogy Leading Researcher konkin@tsnigri.ru

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

УДК 553.481 : 929

# Основы теории магматического рудообразования в трудах М. Н. Годлевского и их современное развитие Foundations of the theory of magmatic ore formation in works by M. N. Godlevsky and their modern development

#### Криволуцкая Н.А.

К 120-летию со дня рождения выдающегося геолога, исследователя магматических сульфидных месторождений Михаила Николаевича Годлевского в Центральном научно-исследовательском геологоразведочном институте цветных и благородных металлов, где он трудился в 1961–1984 гг., готовится книга о жизни этого замечательного человека «Из глубины норильских руд. Михаил Годлевский». Публикуемый ниже материал базируется на статье «Теория магматического рудообразования в трудах М. Н. Годлевского и её современные аспекты» из юбилейного издания и содержит небольшие редакционные изменения.

Рассматриваются основные положения магматического генезиса Норильских платино-медно-никелевых месторождений, разработанные М. Н. Годлевским в его трудах. Особое внимание уделено его оставшейся неопубликованной докторской диссертации, охватывающей все аспекты генезиса уникальных норильских руд: от условий образования рудоносных магм на северо-западе Сибирской платформы и их кристаллизации в верхних зонах земной коры до формирования вкрапленных и жильных руд месторождений Норильск 1 и Зуб-Маркшейдерское. Представлены современные взгляды на происхождение месторождений Норильского района, которые были охарактеризованы в работах М. Н. Годлевского.

Ключевые слова: Сибирские траппы, медно-никелевые руды, Норильский район, магматические месторождения, дифференциация, ассимиляция.

# Krivolutskaya N. A.

On the occasion of the 120th anniversary of the birth of Mikhail Nikolayevich Godlevsky, an outstanding geologist and researcher of magmatic sulfide deposits, a book about the life of this remarkable man "From the depths of the Norilsk ores. Mikhail Godlevsky" is being prepared at the Central Research Geological Prospecting Institute for Base and Precious Metals, where he worked in 1961-1984. The material published below is based on the article "The theory of magmatic ore formation in works by M. N. Godlevsky and its modern aspects" from the anniversary edition and contains minor editorial changes. The article considers the principal theoretical provisions of the magmatic genesis of the Norilsk platinum-copper-nickel deposits, that were developed by M. N. Godlevsky in his works. Particular attention is paid to his still unpublished doctoral dissertation that covers all aspects of the genesis of the unique Norilsk ores: from the formation conditions of the ore-bearing magmas in the northwest Siberian Platform and their crystallization in the upper zones of the earth's crust, to the formation of disseminated and veined ores of the Norilsk 1 and Zub-Marksheiderskoe deposits. Modern views are presented on the origin of ore deposits of the Norilsk region, which were characterized in the works by M. N. Godlevsky.

Key words: Siberian traps, copper-nickel ores, Norilsk region, magmatic ore deposits, differentiation, assimilation.

Для цитирования: Криволуцкая Н. А. Основы теории магматического рудообразования в трудах М. Н. Годлевского и их современное развитие. Руды и металлы. 2022. № 4. С. 119–135. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10025

For citation: Krivolutskaya N. A. Foundations of the theory of magmatic ore formation in works by M. N. Godlevsky and their modern development. Ores and metals, 2022, № 4, pp. 119–135. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10025





Магматические месторождения, связанные с ультрабазит-базитовыми комплексами, являются главными поставщиками на мировой рынок чёрных (Fe, Ti, V) и цветных (Cu, Ni) металлов, а также металлов платиновой группы. Состав и генезис руд этих трёх групп различен и обсуждается на протяжении более чем вековой истории их изучения. Самым сложным представляется образование сульфидных медно-никелевых месторождений из-за низкой растворимости серы в расплавах основного и ультраосновного составов. Теоретические основы генезиса магматических сульфидных месторождений всех регионов мира практически полностью базируются на представлениях об образовании норильских руд [25, 33, 35], изучение которых имеет совершенно исключительное значение для развития теории рудообразования и петрологии.

Эти основы были заложены Михаилом Николаевичем Годлевским, одним из крупнейших геологов Советского Союза. Волею судеб он стал признанным лидером в области изучения магматического рудообразования в нашей стране. Первоначально М. Н. Годлевский рассмотрел различные аспекты генезиса сульфидных руд на примере Норильского рудного района [4, 6], позже он совершенствовал теорию, исследуя другие провинции - Карело-Кольскую, Воронежского щита, Северного Прибайкалья, которыми ему пришлось заниматься на протяжении многих лет. Разрабатываемая М. Н. Годлевским теория рудообразования базировалась также на его обширных знаниях о многочисленных уникальных мировых объектах, таких как месторождения Садбери (Канада), Бушвельд (ЮАР) и многих других, что наиболее ярко отражено в написанном им разделе «Магматические месторождения» в книге «Генезис эндогенных рудных месторождений», вышедшей в 1968 г. под редакцией академика В. И. Смирнова [5].

Анализ творчества Михаила Николаевича Годлевского представляет собой непростую задачу в силу особенностей его жизненного пути. Многие работы учёного были анонимными или даже числились под другими фамилиями из-за статуса заключённого, в котором он начал свои исследования в Норильске (это относится и к научным текстам, написанным другими геологами Норильлага, в частности, В. К. Котульским, чьи работы М. Н. Годлевский высоко ценил). В одном из писем к Н. Ю. Икорниковой упомянута эта ситуация «...у меня добрая половина отчётов подписана сторонними лицами»<sup>1</sup>. Поэтому каждая его публикация – это отстаивание своего «я», своей позиции, ответ «им». 21 сентября 1958 г. он пишет: «...Я узнал радостную для меня новость: в "Горном журнале" появилась моя статья о Норильске [3]. Конечно, это пустяк, написано для горняков с целью ознакомить их с Норильском. Важна не сама заметка, а то, что после 15 лет втаптывания в грязь снова я появился в открытой печати»<sup>2</sup>.

Секретность материалов по Норильску также сыграла свою негативную роль при оценке творчества Михаила Николаевича. В письме к Н. Ю. Икорниковой в феврале 1959 г. он отмечает: «Вчера я получил из Гостехиздата авторскую вёрстку своей работы "Траппы и рудоносные интрузии" и вожусь с ней вот уже второй день. Дело заключается не в самой корректуре, а в определении, что надо из работы ещё выкинуть, чтобы её "не завернули" в цензуре. Норильск числится в списках, и поэтому ко всему подходят с сугубой осторожностью»<sup>3</sup>. В одном из предыдущих писем звучит та же мысль: «Для Бетехтина я написал статью (для его нового журнала<sup>4</sup>) о генезисе сульфидных медно-никелевых месторождений. Там кроме общих рассуждений ничего нет, т. е. ничего конкретного, однако наш редакционный со-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Письма М. Н. Годлевского жене Нине Юрьевне Икорниковой, подлинники, рукопись. РГАЭ Ф. 838, опись 1, дело № 155. (Здесь и далее упомянуты документы, хранящиеся в отделе личных фондов Российского государственного архива экономики и публикуемые впервые благодаря подготовке к печати книги «Из глубины норильских руд. Михаил Годлевский»).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Там же.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Письма М. Н. Годлевского жене Н. Ю. Икорниковой, подлинники, рукопись. РГАЭ Ф. 838, опись 1, дело № 158.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Научный журнал «Геология рудных месторождений».

РУДЫ Металлы

вет<sup>5</sup>, который даёт разрешение на печатание, работу забраковал, т. к., мол, есть "установка" (неписаная!) по Норильску ничего не публиковать. Не мог же я действие перенести на Луну! Всё это очень меня волнует и раздражает...»<sup>6</sup>. Особые обстоятельства, в которых велась работа М. Н. Годлевского, не позволяли оценить его истинный вклад в те или иные проблемы норильской геологии. Однако изучение не только опубликованных, но и фондовых материалов помогает воссоздать картину деятельности учёного.

Публикационная активность Михаила Николаевича всегда была очень высокой. Это характерно как для довоенного периода его творчества, так и для последующей деятельности, несмотря на отмеченные трудности. Ещё в 1937 г. Анатолий Капитонович Болдырев написал: «За истекшие 2 <sup>1</sup>/<sub>2</sub> года список Годлевского возрос до 26 названий, что составляет в среднем 10 работ в год. Это подтверждает ярко один из моих прежних выводов о большой производительности научной работы автора...». Сразу после амнистии появляются статьи Михаила Николаевича, посвящённые геологии Норильского района и его полезным ископаемым – угольным и никелевым месторождениям. Его продуктивность удивляет и вызывает восхищение, особенно учитывая тот факт, что, как написано в одном из писем, он «тринадцать с половиной лет не держал геологических книг в руках»! При появившейся возможности он быстро начинает навёрстывать упущенное время, читая иностранную литературу. Стоит ознакомиться со списками зарубежных источников в статьях и книгах М. Н. Годлевского, где он анализирует новейшие данные о геологии месторождений, минералогии, материалы экспериментальных исследований.

Список работ Михаила Николаевича довольно хорошо известен специалистам. Однако самая крупная его работа – докторская диссертация «Траппы и сульфидные медноникелевые месторождения Норильского района» (1959) - так и осталась неопубликованной, к огромному сожалению. Изданная в то же самое время книга «Траппы и рудоносные интрузии Норильского района» [6] представляет собой лишь её краткий реферат, не позволяющий полностью оценить вклад М. Н. Годлевского в проблему генезиса месторождений, так как многие важнейшие детали, которые обсуждаются в диссертации, остались за её пределами. Глубокий анализ геологических фактов, логика многочисленных выводов и общее построение теории рудообразования остались за рамками книги и, таким образом, не стали достоянием читателей. Докторская диссертация Михаила Николаевича Годлевского явилась той фундаментальной базой, на которой в дальнейшем происходило развитие главных направлений исследования магматизма и формирования руд как Норильского района, так и других территорий в нашей стране. Анализ этой работы необходим для понимания роли её автора в развитии теории магматического рудообразования, фактически отсутствовавшей в целостном виде в конце 1950-х годов.

Главной особенностью работы «Траппы и сульфидные медно-никелевые месторождения Норильского района», характерной для творчества Михаила Николаевича в целом, является чрезвычайно широкий охват проблемы формирования месторождений. Поражает объём диссертации – четыре книги общим объёмом текста в 1300 страниц и с более чем 300 рисунками, объединённые в два тома, каждый из которых состоит из двух частей. Первый том посвящён траппам, второй - месторождениям. Сам Годлевский характеризовал её так: «Так как вся работа (первая часть) представляет собой совершенно законченное целое (петрография севера Сибирской платформы, включая дифференцированные интрузии), то её собственно можно было бы защищать одну как докторскую. Но такая перемена фронта меня не устраивает. Я всё же в основном рудник и центр тяжести у меня в руде... Руду я не хочу оставлять за бортом, тем более что основ-

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> В письме речь идёт об учёном совете ВСЕГЕИ.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Письма М. Н. Годлевского жене Н. Ю. Икорниковой, подлинники, рукопись. РГАЭ Ф. 838, опись 1, дело № 157.



ные теоретические построения как раз относятся к рудам. Но теорию нельзя давать без описания месторождения, без минералогии и геохимии...». Этот чрезвычайно важный подход следует отметить особо, поскольку в современном мировом геологическом сообществе доминируют генетические построения, базирующиеся, как правило, на локальных данных, оторванных от геологического строения самих месторождений. Во многом это обусловлено бурным развитием аналитических методов в последние три десятилетия и их применением к разным объектам.

Диссертационная работа Михаила Николаевича читается как современное описание геологии норильских месторождений в силу вошедших в наше сознание введённых им представлений об образовании интрузивов и руд. Хотя она написана до открытия крупнейших месторождений Норильского района – Талнахского и Октябрьского, – принципиальные вопросы генезиса были решены М. Н. Годлевским уже на основании изучения месторождения Норильск 1, хотя, как будет показано ниже, они оспариваются во многих современных публикациях.

Остановимся на главных достижениях Михаила Николаевича, нашедших обоснование в докторской диссертации.

1. Впервые отмечается особая позиция Норильского района в структуре трапповой провинции, которая подкрепляется ссылкой на новые геофизические данные того времени. Норильский район выделяется М. Н. Годлевским как особая петрографическая провинция в пределах Сибирской платформы, поскольку характеризуется гораздо большим разнообразием пород по сравнению с другими её частями. Именно здесь распространены высокомагнезиальные породы как эффузивного генезиса – пикриты и пикритовые базальты, так и интрузивы, в том числе дифференцированные, содержащие в своём составе пикритовые габбродолериты. Своеобразие района определяется и присутствием здесь субщелочных и щелочных пород обоих типов. На основании современных аналитических данных можно добавить, что сейчас этот район

рассматривается как особая геохимическая провинция, поскольку выделенные ранее высокомагнезиальные породы имеют совершенно разные геохимические характеристики и генезис.

2. Разработан фациальный подход при исследовании магматических пород района и проведении региональных работ. Это касается в первую очередь выделенных М. Н. Годлевским фаций – эффузивных и интрузивных пород. Своим большим достижением Михаил Николаевич считал составление геологической карты района масштаба 1 : 100 000, которую из-за секретности не удалось не только опубликовать, но и поместить в диссертацию. Он предполагал сделать секретной только эту карту, чтобы диссертация была доступна коллегам, в итоге пришлось ограничиться схемой геологического строения района (рис. 1), которая ничем не отличается от современных. Он очень огорчался по этому поводу: «Я уже убрал все горизонтали, объекты, но карта остаётся секретной...». Любой геолог знает, что геологическая карта - основа всех последующих работ. Это чрезвычайно важная часть работы М. Н. Годлевского в Норильске. Отрадно, что фациальный подход развивается в работах современных исследователей, в частности В. А. Радько в книге «Фации интрузивного и эффузивного магматизма Норильского района» [21].

3. Огромна роль М. Н. Годлевского в изучении магматических образований Норильского района. Он впервые установил циклический характер проявленного в районе магматизма, в котором принимали участие туфы, лавы и интрузивы. Были выделены четыре главных цикла - один пермский и три триасовых, во время которых образовывались либо только лавы, а потом интрузивы, либо они появлялись совместно. Анализ развития магматизма в таком ключе позволяет реконструировать его эволюцию как в пространстве, так и во времени. В настоящее время специалисты связывают цикличность магматизма с вариациями магнитного поля Земли и с определёнными импульсами, но при этом не указывают, что впервые данному вопросу были

Руды и металлы № 4/2022, с. 119–135 / Ores and metals № 4/2022, р. 119–135 DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10025





Рис. 1. Схематическая геологическая карта, составленная М. Н. Годлевским в 1957 г.: 1 – нижний палеозой морской; 2 – средний палеозой морской; 3 – верхний палеозой континентальный; 4 – лавовая толща; 5 – интрузии траппов; 6 – четвертичные отложения; 7 – опорные разрезы; 8 – рудопроявления

Fig. 1. Schematic geological map, compiled by M. N. Godlevsky in 1957:

- 1 Lower Paleozoic, marine; 2 Middle Paleozoic, marine; 3 Upper Paleozoic, continental; 4 lava sequence;
- 5 trap intrusions; 6 Quaternary deposits; 7 reference sections; 8 ore occurrences



посвящены специальные работы Михаила Николаевича Годлевского. В зарубежных же публикациях вообще не принимаются во внимание работы по строению геологии туфолавовой толщи, начатые М. Н. Годлевским и продолженные по его инициативе геологами Норильской комплексной геологоразведочной экспедиции и другими организациями. Например, в статье С. Д. Бюргесса и Боуринга [26] только на основании изучения U-Pb системы в цирконах предложена схема туфы – базальты – интрузивы, которая не соответствует геологическим данным. Михаил Николаевич пытался отстоять свой приоритет в этом направлении геологического изучения района, когда писал Нине Юрьевне 19 декабря 1959 г.: «Заочно хочу получить из Норильска справку о том, когда мною был сдан в фонды отчёт по эффузивам и когда я делал первый доклад на эту тему. Во ВСЕГЕИ на годичной сессии я докладывал 4/IV 1956 года. На картах Урванцева этого времени ещё совершенно не расчленены эффузивы, что делает мой приоритет бесспорным». Он был доволен, что новая карта НИИГА «охватывает очень большую часть платформы и на всей этой колоссальной территории они приняли схему деления эффузивов, которая оказалась пригодна не только для Норильского района, но и далеко за его пределами. Словом, я, сидя в Норильске, предугадал строение лав на всей платформе. Мне кажется, что всё это надо опубликовать в печати»<sup>7</sup>.

4. Большое достижение М. Н. Годлевского – установление факта начала магматизма в конце пермского периода на основании изучения осадочных пород тунгусской серии, в которых появляются пепловые отложения, а затем лавы. На геологических картах района это нашло отражение ещё в конце 1950-х годов и в более поздних изданиях [10]; позже начало магматизма было подтверждено палеомагнитными данными, согласно которым породы самой ранней, ивакинской, свиты характеризуются обратной полярностью, типичной для конца пермской системы [29]. В настоящее время этот факт широко используется геологами всего мира при интерпретации массового вымирания жизни на Земле на границе перми и триаса, которое связывают с образованием в этот период Сибирских траппов [27, 39]. Несмотря на популярность названной версии исчезновения видов, она не может считаться доказанной, в первую очередь из-за недостаточной корректировки возраста самих траппов (как отмечал ещё Михаил Николаевич, основная их часть образовалась в триасе, т. е. после вымирания), но главное – из-за недостаточного объяснения причин этого вымирания, особенно на континентах.

5. М. Н. Годлевским было выполнено первое определение позиции интрузивных образований в общей схеме развития магматизма на Сибирской платформе. Он выделил несколько разных типов интрузивов – прообразы современных интрузивных комплексов [6]. В частности, субщелочные силлы представлены как аналоги ивакинской свиты (1-й цикл), самостоятельным внедрением магмы обусловлено появление дифференцированных рудоносных интрузивов (конец 3-го цикла), силлы габбродолеритов (катангский комплекс тогда уже существовал) близки к главному циклу вулканизма (4-й цикл), и завершают эволюцию более поздние секущие дайки, соответствующие интрузивам далдыканского комплекса.

Наиболее значимым в числе этих построений является, конечно, рассмотрение позиции рудоносных интрузивов и их связи с лавами. Михаил Николаевич отмечал своеобразие состава рудоносных интрузивов – их повышенную магнезиальность, пониженные содержания в породах титана и повышенные – хрома. Всё это существенно отличает их от типичных траппов и сближает с производными гипербазитовых магм, характеризующихся более глубинными условиями формирования, чем обычные базальты. Данные отличия неоднократно подчёркивались им в ряде работ.

Взаимоотношения рудоносных массивов с базальтами – чрезвычайно важный аспект ра-

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Письма М. Н. Годлевского жене Н. Ю. Икорниковой, подлинники, рукопись. РГАЭ Ф. 838, опись 1, дело № 164.



#### Рис. 2. Основные модели образования норильских месторождений:

а – в условиях закрытой магматической системы из специфической ультрабазитовой магмы, обогащённой металлами и летучими компонентами (М. Н. Годлевский, 1959; О. А. Дюжиков, 1988; А. П. Лихачёв, 1983, 2006, 2019); b – в условиях открытой магматической системы из обычной толеитовой магмы с рядовыми концентрациями металлов (В. А. Радько, 1991; А. J. Naldrett, 1992; Р. С. Lightfoot et al., 1994; С. Li et al., 2009)

Fig. 2. The principal models of formation of the Norilsk ore deposits:

a – in closed magmatic system from specific ultrabasic magma, enriched in metals and volatile components (M.N. Godlevsky, 1959; O. A. Dyuzhikov, 1988; A.P. Likhachev, 1983, 2006, 2019); b – in open magmatic system from ordinary tholeiitic magma with ordinary concentrations of metals (V. A. Radko, 1991; A. J. Naldrett, 1992; P. C. Lightfoot et al., 1994; C. Li et al., 2009)

боты, приобретающий особое значение в свете обсуждения генезиса норильских руд, особенно активного в последние 30 лет. Это связано с публикацией В. А. Радько [20], в которой представлена модель образования сульфидов в единой магматической системе, связывающей интрузивы и базальты мокулаевской свиты (рис. 2). Согласно этой схеме, рудоносные интрузивы представляют собой горизонтальные части каналов, по которым магма поступала на поверхность. За счёт снижения скорости её течения при переходе от вертикальных к горизонтальным участкам существовавшие сульфиды (или частично образующиеся на месте) оседали на дно. Огромные массы протекавшей магмы, сформировавшей значительную часть Сибирских траппов, позволили накопить большой объём сульфидов, образующих мощные залежи массивных руд норильских месторождений. Модель весьма привлекательна именно с точки зрения объяснения высокого содержания сульфидного вещества относительно силикатных пород (до 15 % объёма на Октябрьском месторождении). Идея была подхвачена западными геологами. Для доказательства связи интрузивов с лавами они привлекли данные по содержанию редких элементов в обоих типах пород, оказавшихся очень близкими, а также дополнили модель процессом ассимиляции магмой сульфатов (ангидритов) in situ. Последние рассматриваются как реальный источник се-



ры на месторождениях, поскольку обычный базальтовый расплав не даёт её необходимого количества для образования месторождения [33, 35]. Описанная модель стала господствующей в мире и применяется ко многим медно-никелевым месторождениям. При этом основные выводы Михаила Николаевича полностью игнорируются, а именно не принимается во внимание несоответствие составов лав и интрузивов. Но главным остаётся, конечно, отсутствие геологических доказательств связи рудоносных интрузивов с базальтами, хотя таковые имеются [31]. М. Н. Годлевский неоднократно подчёркивал, что руды образуются в закрытой камере [4, 6]. Таким образом, его выводы приобретают особое значение в наше время.

6. В связи со сказанным выше очень важное значение имели детальное описание морфологии интрузива Норильск 1 и построенный М. Н. Годлевским продольный разрез, который до сих пор приводят в публикациях, часто без ссылки на первоисточник. Впервые интрузив был описан Михаилом Николаевичем как хонолит с прогибами подошвы и более ровной кровлей; он охарактеризовал «выпахивание» магмой подстилающих пород при внедрении (в случае особых структурных условий). Сейчас данная тема также стала модной, поскольку этому процессу придаётся решающее значение в образовании приконтактовых сульфидных руд (в частности, в коматиитах). Следует отметить, что для других интрузивов Норильского района более характерна ленточная форма.

7. Было детально рассмотрено внутреннее строение рудоносных интрузивов, особенно месторождения Норильск 1, и охарактеризованы условия их формирования. В настоящий момент эти данные представляют большой интерес, так как структура интрузива Норильск 1 в целом уже не доступна прямым наблюдениям в связи с тем, что наиболее мощная центральная его часть отработана карьерами. Михаил Николаевич использовал наименования пород и буквенные обозначения горизонтов, предложенные В. К. Котульским (согласно записи в диссертации со ссылкой на неопубликованные материалы), хотя и немного модифицировал их: в частности, он объединил нижний такситовый горизонт с контактовыми габбродолеритами (в то время породы назывались габбродиабазы, как палеотипные их аналоги). Следует отметить, что эти наименования пород и горизонтов сохраняются и в современных публикациях.

Наибольший интерес в работе представляют описания пикритовых габбродолеритов и пойкилоофитовых оливиновых габбродолеритов, названных «ядром» интрузива, остальные разновидности отнесены им к контактовым образованиям. В самых мощных разрезах пикритового горизонта М. Н. Годлевский отмечает слоистость, выражающуюся в накоплении оливина у подошвы прослоя, и насчитывает до 10 таких слоёв в 120-метровом горизонте! В настоящее время доступны только краевые части интрузива, где пикриты имеют мощность всего несколько метров и где подобная слоистость отсутствует. Михаил Николаевич обратил особое внимание на своеобразные крупнокристаллические породы, сложенные плагиоклазом, они часто встречаются внутри интрузива. Позже их изучение легло в основу кандидатской диссертации А. П. Лихачёва и его основополагающей статьи «Роль лейкократового габбро в формировании норильских дифференцированных интрузий» [17], несомненно, стимулированных наблюдениями М. Н. Годлевского. Эти работы отражают идею Михаила Николаевича о докамерной кристаллизации части магмы (абиссальная кристаллизация), успешно развитую в дальнейших работах А. П. Лихачёва, объяснившего во многом строение Талнахского и Хараелахского интрузивов и их руд за счёт оседания кристаллов оливина и сульфидов при изменении течения магмы от ламинарного к турбулентному [18].

8. М. Н. Годлевским получены первые данные о составе породообразующих минералов. Им прекрасно произведено петрографическое описание пород с изучением состава минералов, выполненное в то время с использованием столика Фёдорова. Несмотря на «домикрозондовую эпоху» проведения исследований,



были получены очень точные сведения о составе оливинов, пироксенов и плагиоклазов, подтверждённые современными аналитическими данными [22]. Следует отметить, что Михаил Николаевич не просто описал породы, а исходя из взаимоотношений и состава представил анализ условий их образования (оценку температур, давлений кристаллизации) с учётом экспериментальных данных (в частности, по пироксенам). Аналогичные описания редко встречаются в современных работах.

9. Впервые проведено детальное геохимическое исследование пород. Породообразующие оксиды были определены с помощью силикатного анализа, а примесные элементы (54 эл.) – с помощью спектрального. Конечно, Михаил Николаевич не выполнял аналитические работы, но отбор образцов, а главное обработку результатов анализов осуществлял сам тщательнейшим образом. С помощью метода Заварицкого он сумел подразделить интрузивы на разные типы, отличить рудоносные от безрудных. Он писал, что «приём Заварицкого самый совершенный, т. к. он без натяжек даёт естественную группировку окислов. Система Заварицкого помогла во многом при практических работах (например, у нас на Севере я установил промышленные интрузии по диаграммам Заварицкого. И все вновь открываемые интрузии дают те же диаграммы.) Особенно важны диаграммы Заварицкого при анализе дифференцированных серий, когда приходится сравнивать десятки и даже сотни анализов. Ну-ка, попробуй, без диаграммы разберись во всём этом! А диаграмма позволяет "проигрывать" анализ по двум векторам (или проекциям)».

Это был первый опыт обработки такого большого объёма проб. Полученные средневзвешенные составы для ряда интрузивов (Норильск 1, г. Зуб, Норильск 2) до сих пор применяются для сравнения с составами вновь обнаруженных массивов. Позже были получены многочисленные данные по составу пород Сибирской трапповой провинции [14]. Теперь аналогичные исследования проводятся с использованием современных аналитических методов [19, 30], позволяющих очень точно определять концентрации элементов (в идеале – до 10-12), но фундаментальные геохимические характеристики основных интрузивов были получены уже в начале 1950-х годов.

10. Впервые детально описаны жильные поля месторождения Норильск 1. Приведённые М. Н. Годлевским данные совершенно бесценны. Он детально описывает рудные тела разных жильных полей, которые уже не известны нам вследствие их отработанности. Наибольший интерес представляет характеристика сульфидных шлиров, расположенных внутри интрузива и окружённых сульфидной вкрапленностью, которая формирует как бы «хвост» типа кометы и указывает направления движения – передняя часть отличается очень маломощным ореолом вкрапленности, а задняя – длинным шлейфом. Михаил Николаевич делает справедливый вывод о формировании шлира в докамерных условиях и внедрении его вместе с магмой в интрузивную камеру. Иногда такие шлиры имеют расслоенное строение, аналогичное вкрапленным рудам – сверху они халькопиритового состава, а внизу – пирротинового (что сейчас обсуждается во многих современных работах, особенно зарубежных геологов). Годлевским также описана крупная сульфидная жила в приконтактовой части интрузива (рис. 3), имеющая зональное строение. Размеры жил были достаточно большие, мощность одной из них достигала 20 м в раздуве! Михаилом Николаевичем детально описаны вертикальные жилы, которые существовали в самой прогнутой части интрузива. Он изучил трещинную тектонику массива Норильск 1, на основании чего сделал выводы о формировании сульфидных жильных тел в тангенциальных по отношению к удлинению массива трещинах. Несмотря на открытие уникальных месторождений Талнахского рудного узла и их значение для мировой экономики, подобных описаний для них не было сделано за 60 лет разведки и эксплуатации! А ведь главная залежь Октябрьского месторождения уже также выработана, кроме схемы её зональности в литературе почти не осталось сведений о ней.





# Рис. 3. Строение сульфидной жилы района скважины 415:

*а* – план изолиний мощности (градации по интенсивности штриховки от центра к периферии, в м: полностью закрашенное поле > 5 м, далее – 4–5, 3–4, 2–3, 1–2, 0,08–1); *b* – распределение пирротина, *c* – пентландита, *d* – халькопирита (градации по уменьшению количества в жиле от плотной штриховки к редкой)

Fig. 3. Structure of a sulfide vein in the vicinity of Borerhole 415:

a – plan of thickness isolines (gradations by the intensity of shading, from the center to the periphery, in m: the completely shaded field, > 5 m; then – 4–5, 3–4, 2–3, 1–2, 0.08–1 m); b – distribution of pyrrhotite, c – pentlandite, d – chalcopyrite (gradations from dense to rare shading, according to decreasing in the mineral abundance in the vein)

11. Выполнено *первое систематическое* описание руд: текстур и структур рудных минералов, их ассоциаций, последовательности выделения, химического состава. Михаил Николаевич отмечает, что каждый минерал имеет несколько генераций (халькопирит, пирротин, пентландит), причём указывает, что пентландит встречается не только в структурах распада, но и кристаллизуется из расплава. Охарактеризованы весьма разные разновидности руд – от обычных халькопиритпирротиновых до халькопирит-кубанитовых и халькопирит-борнитовых! Последние мы теперь не видим. Аналогичные руды найдены в юго-западной ветви Талнахского месторождения [40]. М. Н. Годлевский впервые от-



метил отличие норильских месторождений от других месторождений мира, заключающееся в высоком отношении содержаний меди к никелю в составе руд.

Пожалуй, именно работы по изучению минерального состава руд получили наибольшее развитие в последующие годы. Это обусловлено двумя причинами: появлением локального микрорентгеноспектрального анализа и открытием уникальных по составу месторождений Талнахского рудного узла. Уже в конце 1950-х годов М. Н. Годлевский использовал первые появившиеся данные А. Д. Генкина по платиновым минералам [1], хотя некоторые фазы (самородное золото, сперрилит) были обнаружены им самим в аншлифах. За прошедшие десятилетия (с января 1960 г. – то есть даты защиты докторской диссертации М. Н. Годлевского) открыто огромное количество новых минералов в рудах, преимущественно элементов платиновой группы [13, 41 и др.], а также названный в честь Михаила Николаевича сульфид никеля - годлевскит [15]. Данные об этих открытиях обобщены А. Д. Генкиным ещё в 1981 г. [2]. С тех пор обобщающие работы по минералогии руд не появлялись, и генетическая интерпретация новых парагенезисов, к сожалению, отстаёт от фактических данных. Важным событием явилось обнаружение нового типа руд – малосульфидного, которому в настоящее время уделяется много внимания [23].

12. С характеристикой руд в экзоконтактах интрузивов тесно связано *первое описание метаморфических и метасоматических ореолов*, развитых вокруг массивов. Это направление, заложенное М. Н. Годлевским, также получило интенсивное развитие в работах его учеников – В. В. Юдиной, Д. М. Туровцева и др. Квинтэссенцией исследований можно считать книгу последнего [24], в которой обобщены многочисленные данные, накопленные за многие годы работы в Норильском районе (1960–2002 гг.).

13. Для обоснования генезиса норильских месторождений М. Н. Годлевский анализирует строение и условия образования главных никелевых месторождений мира по литера-

турным данным, сгруппировав их с учётом тектоническим обстановок. Удивительно зримо представляются читателю геологическое строение и особенности месторождений Канады (Садбери и более мелких), Южной Африки (Бушвельда, Инсизвы), Балтийского щита (Мончегорского района, Печенги, месторождений Норвегии, Швеции), – настолько логично обобщён Михаилом Николаевичем огромный опубликованный материал, выделено главное и отброшено второстепенное!

В период, когда М. Н. Годлевский писал диссертацию, противоборствовали две главные гипотезы образования медно-никелевых месторождений – магматическая и гидротермальная. Последнюю отстаивал Н. А. Елисеев на примере месторождений Кольского полуострова. Михаил Николаевич внимательно и вдумчиво оценивает факты «за» и «против» обеих гипотез для конкретных месторождений. В большинстве случаев он делает выводы о магматическом происхождении руд, хотя для ряда объектов конец процесса мог быть связан с действием флюидов и приводить в небольшом объёме к гидротермальным образованиям. Сам он писал: «Я завидую тем лицам, которые ни в чём никогда не сомневаются, которые твёрдо верят либо в Боуэна, либо в Коржинского, либо в Рейнольдса. Для меня же подчас мучительно трудно остановиться на чём-либо, ибо часто имеется столько же аргументов в пользу одной точки зрения, сколько и для диаметрально противоположной... Конечно, опыт на многое открывает глаза, но хотя лаборатория – это часть природы и всё в лаборатории происходит по её законам, но системы, с которыми вы работаете, до смешного упрощены и, вероятно, достаточно внести какое-либо одно добавочное условие, чтобы всё пошло прахом».

Большое внимание Михаил Николаевич уделил вопросу о возможных источниках серы в месторождениях Норильского района. Он был инициатором изучения её изотопного состава в сульфидах [7], которым потом многих лет занималась Л. Н. Гриненко [11, 28]. Первоначальное предположение об ассимиляции расплавом серы из вмещающих пород,



казалось, подтвердилось тяжёлым изотопным составом сульфидов в рудах (до  $\delta^{34}$ S до 18 ‰), но затем Л. Н. Гриненко на основании масс-балансовых расчётов (отсутствие предполагаемого обогащения кальцием пород) пришла к выводу о комплексном характере серы: возможном поступлении из расплава и газовых залежей Сибири [28]. Михаил Николаевич, выделяя в верхних зонах интрузивов гибридные породы, образованные за счёт дифференциации исходного расплава и ассимиляции им вмещающих пород, признавал их незначительный объём относительно основного объёма интрузивных тел (что имело важное значение при подсчёте средневзвешенного состава отдельных массивов). В настоящее время идея ассимиляции магмами вмещающих пород вновь продолжает развиваться в работах многих российских и зарубежных учёных [32, 38]. Но, несмотря на огромный массив полученных данных [37], принципиально новых выводов не сделано и явные доказательства ассимиляции не приводятся.

Таким образом, М. Н. Годлевским детальнейшим образом рассмотрен процесс образования месторождений: от внедрения специфических магм на северо-западе Сибирской платформы в конце второго триасового цикла магматизма через начало их абиссальной кристаллизации и ликвации до гипабиссальной кристаллизации и образования сингенетической вкрапленности во внутрикамерных условиях и формирования эпигенетической (отжатой) сульфидной минерализации в окружающих породах. При этом Михаилом Николаевичем были определены термодинамические условия кристаллизации пород и руд (температура, давление) с привлечением физико-химических диаграмм (фугитивность серы, кислорода) [8, 9].

Столь многогранных работ по генезису норильских месторождений не появилось до сих пор. Отдельные направления, рассмотренные М. Н. Годлевским, нашли развитие в исследованиях многих геологов: региональное изучение магматических пород – в работах В. В. Золотухина и его коллег из Новосибирска (ИГиГ СО АН СССР), образование магм и интрузивов – в работах А. П. Лихачёва (ЦНИГРИ), исследование контактовых ореолов интрузивов – в работах В. В. Юдиной, Д. М. Туровцева и др. (ЦНИГРИ), изучение минералогии руд – в работах сотрудников ИГЕМ под руководством А. Д. Генкина, а также О. Е. Юшко-Захаровой в ИМГРЭ, изотопии серы – в работах Л. Н. Гриненко (МГУ), К. Н. Малича и О. В. Петрова (ВСЕГЕИ) и зарубежных коллег (Э. Рипли, Ч. Ли в Университете Индианы, США), а также многих других.

Однако создание достаточно стройной теории образования месторождений в 1960 г. не означает окончательного решения проблемы генезиса уникальных норильских руд. Во-первых, потому, что в то время ещё не была экспериментально показана низкая растворимость серы в базитовых расплавах (0,2 мас. %, а Михаил Николаевич ссылается на опыты с 6-8 % серы в расплавах, что достаточно для образования руд), а во-вторых, не были известны низкие содержания летучих компонентов в магмах, в частности воды, особенно в магмах платформенного типа [36]. Последнее практически снимает вопрос о гидротермальном происхождении руд. За исключением некоторых предложенных экзотических теорий [34] магматический генезис руд в настоящее время получил практически всеобщее признание. Он однозначно доказан благодаря обнаружению С. Ф. Служеникиным в жилах рудника Морозова закалённых твёрдых растворов сульфидов [12], которые ранее были получены в экспериментах с сульфидными расплавами при высоких температурах.

Однако вопросы об источниках серы и механизмах концентрирования сульфидов остаются открытыми. Большой вклад в магматогенную теорию рудообразования внёс А. П. Лихачёв, который последовательно старался решить проблемы происхождения исходных магм, их кристаллизации, переноса сульфидов и изотопного фракционирования серы [16]. Наряду с этим продолжает развиваться идея единой системы интрузивов с лавами, причём отвергается описанная Михаилом Николаевичем гравитационная сепарация сульфидов, а предполагается их всплы-



вание в магме за счёт летучих компонентов («пузырей») [25]. Названные противоречия тормозят создание адекватной теории образования норильских месторождений.

Разработка генетической модели норильских месторождений чрезвычайно важна для дальнейших успешных поисков новых интрузивов с богатыми сульфидными рудами не только в Сибири, но и в других трапповых

#### Список литературы

- 1. *Генкин А. Д*. О закономерностях срастания магнетита и пирротина // Записки Всесоюзного минералогического общества. – 1950. – Ч. XXIX, № 3. – С. 229–230.
- Генкин А. Д., Дистлер В. В., Гладышев Г. Д. [и др.]. Сульфидные медно-никелевые руды норильских месторождений. – М. : Наука, 1981. – 295 с.
- 3. Годлевский М. Н. Геология и рудные месторождения Норильского района // Горный журнал. 1958. № 6. С. 9–14.
- 4. Годлевский М. Н. К вопросу о генезисе сульфидных медно-никелевых месторождений на Сибирской платформе // Геология рудных месторождений. – 1959. – № 2. – С. 17–30.
- Годлевский М. Н. Магматические месторождения // Генезис эндогенных рудных месторождений. – М. : Недра, 1968. – С. 7–83.
- Годлевский М. Н. Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. – М. : Госгеолтехиздат, 1959. – 68 с.
- 7. Годлевский М. Н., Гриненко Л. Н. Некоторые данные об изотопном составе серы сульфидов норильских месторождений // Советская геология. 1963. № 1. С. 27–39.
- Годлевский М. Н., Лихачев А. П. Медно-никелевое оруденение в Норильском районе // Генетические модели эндогенных рудных формаций. – Новосибирск : Наука, 1983. – Т. 1. – С. 47–54.
- Годлевский М. Н., Лихачев А. П. Условия зарождения и кристаллизации рудоносных магм, формирующих медно-никелевые месторождения // Основные параметры природных процессов эндогенного рудообразования. – Новосибирск : Наука. – 1987. – С. 109–118.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (новая версия). Лист R(45)-47. Норильск. Объяснитель-

провинциях Земли, чему придавал огромное значение М. Н. Годлевский. Хочется верить, что непротиворечивая теория образования руд, соответствующая геологическим данным, будет создана новыми исследователями на базе разработанных Михаилом Николаевичем теоретических положений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект 22-27-00378).

ная записка. – СПб. : Издательство ВСЕГЕИ, 2000. – 479 с.

- 11. Гриненко Л. Н. Сероводородсодержащие газовые залежи как источник серы при сульфуризации магм промышленно-рудоносных интрузий Норильского района // Доклады Академии наук СССР. – 1984. – Т. 278, № 3. – С. 730–732.
- Дистлер В. В., Кулагов Э. А., Служеникин С. Ф., Лапутина И. П. Закалённые сульфидные твёрдые растворы в рудах Норильского месторождения // Геология рудных месторождений. – 1996. – Т. 38, № 1. – С. 41–53.
- Евстигнеева Т. Л., Генкин А. Д., Коваленкер В. А. Новый висмутид палладия – соболевскит – и номенклатура минералов системы PdBi-PdTe-PdSb // Записки Всесоюзного минералогического общества. – 1975. – Ч. 104, Вып. 5. – С. 568.
- Золотухин В. В., Лагута О. Н. О фракционировании магнезиальных базитовых расплавов и многообразии траппов на Сибирской платформе // Доклады Академии наук СССР. 1985. Т. 280, № 4. С. 967–972.
- Кулагов Э. А., Евстигнеева Т. Л., Юшко-Захарова О. Е. Новый сульфид никеля годлевскит // Геология рудных месторождений. – 1969. – № 3. – С. 115–121.
- 16. Лихачёв А. П. Возможность самообогащения рудным веществом и тяжёлым изотопом серы (<sup>34</sup>S) мантийных магм, формирующих Cu-Ni месторождения и перспективное место для локализации руд в Норильском районе // Отечественная геология. – 2019. – № 3. – С. 1–18.
- Лихачёв А. П. Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. – М. : Эслан, 2006. – 496 с.
- Лихачёв А. П. Роль лейкократового габбро в формировании норильских дифференцированных интрузий // Известия Академии наук СССР. Серия геологическая. – 1965. – № 12. – С. 50–66.



- Нестеренко Г. В., Авилова Н. С., Смирнова Н. П. Редкие элементы в траппах Сибирской платформы // Геохимия. – 1964. – № 10. – С. 1015–1021.
- Радько В. А. Модель динамической дифференциации интрузивных траппов северо-запада Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 1991. – № 11. – С. 19–27.
- 21. *Радъко В. А.* Фации интрузивного и эффузивного магматизма Норильского района. СПб. : ВСЕГЕИ, 2016. 226 с.
- 22. Рябов В. В., Шевко А. Я., Гора М. П. Магматические породы Норильского района. – Новосибирск : Нонпарель, 2000. – Т. 1, 2.
- Служеникин С. Ф., Дистлер В. В., Дюжиков О. А. [и др.]. Малосульфидное платиновое оруденение в норильских дифференцированных интрузивах // Геология рудных месторождений. – 1994. – Т. 36, № 3. – С. 195–217.
- 24. *Туровцев Д. М.* Контактовый метаморфизм норильских интрузий. – М. : Научный мир, 2002. – 318 с.
- 25. Barnes S. J. [et al.]. Droplets and bubbles: solidification of sulphide-rich vapour-saturated orthocumulates in the Norilsk-Talnakh Ni–Cu–PGE ore-bearing intrusions // Journal of Petrology. – 2019. – V. 60, № 2. – P. 269–300.
- Burgess S. D., Bowring S. A. High-precision geochronology confirms voluminous magmatism before, during, and after Earth's most severe extinction. Science Advances. – 2015. – № 1. – e1500470.
- Campbell I. H., Czamanske G. K., Fedorenko V. A., Hill R. I., Stepanov V. K. Synchronism of the Siberian Traps and the Permian-Triassic boundary // Science. – 1992. – V. 258. – P. 1760–1763.
- Grinenko L. N. Sources of sulfur of the nickeliferous and barren gabbrodolerite intrusions of the northwest Siberian platform // International Geology Review. – 1985. – V. 27. – P. 695–708.
- Gurevich E., Heuneman C., Rad'ko V., Westphal M., Bachtadse V., Pozzi J. P., Feinberg H. Paleomagnetism and magnetostratigraphy of the Permian– Triassic northwest central Siberian Trap Basalts // Tectonophysics. – 2000. – V. 379. – P. 211–226.
- Hawkesworth C. J., Lightfoot P. C., Fedorenko V. A. [et al.]. Magma differentiation and mineralization in the Siberian continental flood basalts // Lithos. - 1995. - V. 34. - P. 61-81.
- Krivolutskaya N., Gongalsky B., Kedrovskaya T., Kubrakova I., Tyutyunnik O., Chikatueva V., Bychkova Y., Kovalchuk E., Yakushev A., Kononkova N. Geology of the Western Flanks of the Oktyabr'-

skoe Deposit, Noril'sk District, Russia : Evidence of a Closed Magmatic System // Mineralium Deposita. – 2019. – V. 54. – P. 611–630.

- 32. Li C., Naldrett A. J., Shmitt A. K. [et al.]. Magmatic anhydrite-sulfide assemblages in plumbing system of the Siberian Traps // Geology. – 2009. – V. 37. – P. 259–262.
- 33. Li C., Ripley E. M., Naldrett A. J. A new genetic model for the giant Ni-Cu-PGE sulfide deposits associated with the Siberian flood basalts // Economic Geology. – 2009. – № 104. – P. 291–301.
- 34. Lightfoot P. C., Zotov I. A. Geological Relationships between intrusions, country rocks and Ni-Cu-PGE sulfides in the Kharaelakh intrusion, Noril'sk region: implication to the role of sulfide differentiation and metasomatic in their genesis // Northeastern Geology. – 2014. – V. 47, № 1. – P. 1–35.
- 35. Naldrett A. J. A model for the Ni-Cu-PGE ores of the Noril'sk region and its application to other areas of flood basalts // Economic Geology. – 1992. – V. 87. – P. 1945–1962.
- 36. Naumov V. B., Dorofeeva V. A., Girnis A. V., Yarmolyuk V. V. Mean Contents of Volatile Components, Major and Trace Elements in Magmatic Melts in Major Geodynamic Environments on Earth. I. Mafic Melts // Geochemistry International. – 2017. – V. 55 – P. 629–653.
- 37. Petrov O. V. Isotope Geology of the Norilsk Deposits. Springer : Berlin/Heidelberg, Germany, 2019. 306 p.
- 38. Ripley E. M., Li C., Craig H. [et al.]. Micro-scale S isotope studies of the Kharaelakh intrusion, Noril'sk region, Siberia: Constraints on the genesis of coexisting anhydrite and sulfide minerals // Geochimica et Cosmovhimica Acta. – 2010. – V. 74. – P. 634–644.
- Sobolev S. V., Sobolev A. V., Kuzmin D. V., Krivolutskaya N. A., Petrunin A. G., Arndt N. T., Rad'ko V. A., Vasil'ev Yu. R. Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes // Nature. – 2011. – V. 477. – P. 312–316.
- 40. Tolstykh N. [et al.] Unique Cu-rich sulphide ores of the Southern-2 orebody in the Talnakh Intrusion, Noril'sk area (Russia): Geochemistry, mineralogy and conditions of crystallization // Ore Geology Reviews. – 2020. – V. 122. – P. 103525.
- 41. Vymazalová A. [et al.] Sluzhenikinite, Pd<sub>15</sub>(Sb<sub>7-x</sub>Sn<sub>x</sub>) 3≤ x≤ 4, a new platinum group mineral (PGM) from the Oktyabrsk deposit, the Norilsk deposits, Russia // Mineralogical Magazine. 2022. V. 86, Nº 4. P. 577–585.



# References

- Genkin A. D. O zakonomernostyakh srastaniya magnetita i pirrotina [On the patterns of intergrowth of magnetite and pyrrhotite], Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva [Notes of the All-Union mineralogical society], 1950, V. XXIX, No 3, pp. 229–230. (In Russ.).
- Genkin A. D., Distler V. V., Gladyshev G. D. [et al.]. Sul'fidnye medno-nikelevye rudy noril'skikh mestorozhdenii [Sulfide copper-nickel ores of the Norilsk deposits], Moscow, Nauka Publ., 1981, 295 p.
- 3. Godlevskii M. N. Geologiya i rudnye mestorozhdeniya Noril'skogo raiona [Geology and ore deposits of the Norilsk region], *Gornyi zhurnal* [*Mining journal*], 1958, No 6, pp. 9–14. (In Russ.).
- Godlevskii M. N. K voprosu o genezise sul'fidnykh medno-nikelevykh mestorozhdenii na Sibirskoi platforme [On the issue of the genesis of sulfide copper-nickel deposits on the Siberian platform], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 1959, No 2, pp. 17–30. (In Russ.).
- Godlevskii M. N. Magmaticheskie mestorozhdeniya [Magmatic deposits], Genezis endogennykh rudnykh mestorozhdenii [Genesis of endogenous ore deposits], Moscow, Nedra Publ., 1968, pp. 7–83.
- 6. Godlevskii M. N. Trappy i rudonosnye intruzii Noril'skogo raiona [Traps and ore-bearing intrusions of the Norilsk region], Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1959, 68 p.
- Godlevskii M. N., Grinenko L. N. Nekotorye dannye ob izotopnom sostave sery sul'fidov noril'skikh mestorozhdenii [Some data on the isotopic composition of sulfur in sulfides of Norilsk deposits], *Sovetskaya geologiya* [Soviet Geology], 1963, No 1, pp. 27–39. (In Russ.).
- Godlevskii M. N., Likhachev A. P. Medno-nikelevoe orudenenie v Noril'skom raione [Copper-nickel mineralization in the Norilsk region], Geneticheskie modeli endogennykh rudnykh formatsii [Genetic models of endogenous ore formations], Novosibirsk, Nauka Publ., 1983., V. 1, pp. 47–54.
- Godlevskii M. N., Likhachev A. P. Usloviya zarozhdeniya i kristallizatsii rudonosnykh magm, formiruyushchikh medno-nikelevye mestorozhdeniya [Conditions for the origin and crystallization of ore-bearing magmas that form copper-nickel deposits], Osnovnye parametry prirodnykh protsessov endogennogo rudoobrazovaniya [Basic parameters of natural processes of endogenous ore formation], Novosibirsk, Nauka, 1987, pp. 109–118.

- Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000 (novaya sersiya). List R(45)-47. Noril'sk. Ob"yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1 000 000 (new version). Sheet R(45)-47. Norilsk. Explanatory note], Saint-Petersburg, VSEGEI Publ., 2000, 479 p.
- Grinenko L. N. Serovodorodsoderzhashchie gazovye zalezhi kak istochnik sery pri sul'furizatsii magm promyshlenno-rudonosnykh intruzii Noril'skogo raiona [Hydrogen sulfide-bearing gas deposits as a source of sulfur during the sulfurization of magmas of commercial ore-bearing intrusions in the Norilsk region], *Doklady Akademii nauk SSSR* [*Reports of the Academy of Sciences of the USSR*], 1984, V. 278, No 3, pp. 730–732. (In Russ.).
- 12. Distler V. V., Kulagov E. A., Sluzhenikin S. F., Laputina I. P. Zakalennye sul'fidnye tverdye rastvory v rudakh Noril'skogo mestorozhdeniya [Hardened sulfide solid solutions in the ores of the Norilsk deposit], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 1996, V. 38, No 1, pp. 41–53. (In Russ.).
- Evstigneeva T. L., Genkin A. D., Kovalenker V. A. Novyi vismutid palladiya – sobolevskit – i nomenklatura mineralov sistemy PdBi-PdTe-PdSb [New palladium bismuthide – sobolevskite – and the nomenclature of minerals of the PdBi-PdTe-PdSb system], Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva [Notes of the All-Union mineralogical society], 1975, V. 104, I. 5, p. 568.
- 14. Zolotukhin V. V., Laguta O. N. O fraktsionirovanii magnezial'nykh bazitovykh rasplavov i mnogoobrazii trappov na Sibirskoi platforme [On Fractionation of Magnesian Mafic Melts and Diversity of Traps on the Siberian Platform], *Doklady Akademii nauk SSSR* [*Reports of the Academy of Sciences of the USSR*], 1985, V. 280, No. 4, pp. 967–972. (In Russ.).
- Kulagov E. A., Evstigneeva T. L., Yushko-Zakharova O. E. Novyi sul'fid nikelya – godlevskit [New nickel sulfide – godlevskite], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 1969, No 3, pp. 115–121. (In Russ.).
- 16. Likhachev A. P. Vozmozhnosť samoobogashcheniya rudnym veshchestvom i tyazhelym izotopom sery (<sup>34</sup>S) mantiinykh magm, formiruyushchikh Cu-Ni mestorozhdeniya i perspektivnoe mesto dlya lokalizatsii rud v Noril'skom raione [Possibility of self-enrichment in ore matter and heavy sulfur isotope (<sup>34</sup>S) of mantle magmas forming Cu-Ni



deposits and a promising place for ore localization in the Norilsk region], *Otechestvennaya geologiya* [*National geology*], 2019, No 3, pp. 1–18. (In Russ.).

- Likhachev A. P. Platino-medno-nikelevye i platinovye mestorozhdeniya [Platinum-copper-nickel and platinum deposits], Moscow, Eslan Publ., 2006, 496 p.
- Likhachev A. P. Rol' leikokratovogo gabbro v formirovanii noril'skikh differentsirovannykh intruzii [The role of leucocratic gabbro in the formation of differentiated Norilsk intrusions], *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya geologicheskaya [Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Geological series*], 1965, No 12, pp. 50–66. (In Russ.).
- Nesterenko G. V., Avilova N. S., Smirnova N. P. Redkie elementy v trappakh Sibirskoi platformy [Rare elements in the traps of the Siberian platform], *Geokhimiya* [*Geochemistry International*], 1964, No 10, pp. 1015–1021. (In Russ.).
- 20. Rad'ko V. A. Model' dinamicheskoi differentsiatsii intruzivnykh trappov severo-zapada Sibirskoi platformy [Model of dynamic differentiation of intrusive traps in the northwest of the Siberian Platform], *Geologiya i geofizika* [*Russian Geology and Geophysics*], 1991, No 11, pp. 19–27. (In Russ.).
- 21. Rad'ko V. A. Fatsii intruzivnogo i effuzivnogo magmatizma Noril'skogo raiona [Facies of intrusive and effusive magmatism in the Norilsk region], Saint-Petersburg, VSEGEI Publ., 2016, 226 p.
- 22. Ryabov V. V., Shevko A. Ya., Gora M. P. Magmaticheskie porody Noril'skogo raiona [Igneous rocks of the Norilsk region], Novosibirsk, Nonparel' publ., 2000, V. 1, 2.
- 23. Sluzhenikin S. F., Distler V. V., Dyuzhikov O. A. [et al.]. Malosul'fidnoe platinovoe orudenenie v noril'skikh differentsirovannykh intruzivakh [Lowsulfide platinum mineralization in the Norilsk differentiated intrusions], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 1994, V. 36, No 3, pp. 195–217. (In Russ.).
- 24. Turovtsev D. M. Kontaktovyi metamorfizm noril'skikh intruzii [Contact metamorphism of the Norilsk intrusions], Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2002, 318 p.
- Barnes S. J. [et al.]. Droplets and bubbles: solidification of sulphide-rich vapour-saturated orthocumulates in the Norilsk-Talnakh Ni–Cu–PGE orebearing intrusions, *Journal of Petrology*, 2019, V. 60, No 2, pp. 269–300.

- 26. Burgess S. D., Bowring S. A. High-precision geochronology confirms voluminous magmatism before, during, and after Earth's most severe extinction, *Science Advances*, 2015, 1, e1500470.
- Campbell I. H., Czamanske G. K., Fedorenko V. A., Hill R. I., Stepanov V. K. Synchronism of the Siberian Traps and the Permian-Triassic boundary, *Science*, 1992, V. 258, pp. 1760 –1763.
- 28. Grinenko L. N. Sources of sulfur of the nickeliferous and barren gabbrodolerite intrusions of the northwest Siberian platform, *International Geolo*gy Review, 1985, V. 27, pp. 695–708.
- Gurevich E., Heuneman C., Rad'ko V., Westphal M., Bachtadse V., Pozzi J. P., Feinberg H. Paleomagnetism and magnetostratigraphy of the Permian– Triassic northwest central Siberian Trap Basalts, *Tectonophysics*, 2000, V. 379, pp. 211–226.
- Hawkesworth C. J., Lightfoot P. C., Fedorenko V. A. [et al.]. Magma differentiation and mineralization in the Siberian continental flood basalts, *Lithos*, 1995, V. 34, pp. 61–81.
- 31. Krivolutskaya N., Gongalsky B., Kedrovskaya T., Kubrakova I., Tyutyunnik O., Chikatueva V., Bychkova Y., Kovalchuk E., Yakushev A., Kononkova N. Geology of the Western Flanks of the Oktyabr'skoe Deposit, Noril'sk District, Russia : Evidence of a Closed Magmatic System, *Mineralium Deposita*, 2019, V. 54, pp. 611–630.
- 32. Li S., Naldrett A. J., Shmitt A. K. [et al.]. Magmatic anhydrite-sulfide assemblages in plumbing system of the Siberian Traps, *Geology*, 2009, V. 37, pp. 259–262.
- 33. Li C., Ripley E. M., Naldrett A. J. A new genetic model for the giant Ni-Cu-PGE sulfide deposits associated with the Siberian flood basalts, *Economic Geology*, 2009, No 104, pp. 291–301.
- 34. Lightfoot P. C., Zotov I. A. Geological Relationships between intrusions, country rocks and Ni-Cu-PGE sulfides in the Kharaelakh intrusion, Noril'sk region: implication to the role of sulfide differentiation and metasomatic in their genesis, *Northeastern Geology*, 2014, V. 47, No 1, pp. 1–35.
- 35. Naldrett A. J. A model for the Ni-Cu-PGE ores of the Noril'sk region and its application to other areas of flood basalts, *Economic Geology*, 1992, V. 87, pp. 1945–1962.
- 36. Naumov V. B., Dorofeeva V. A., Girnis A. V., Yarmolyuk V. V. Mean Contents of Volatile Components, Major and Trace Elements in Magmatic Melts



in Major Geodynamic Environments on Earth. I. Mafic Melts, *Geochemistry International*, 2017, V. 55, pp. 629-653.

- Petrov O. V. Isotope Geology of the Norilsk Deposits, *Springer*, Berlin/Heidelberg, Germany, 2019, 306 p.
- 38. Ripley E. M., Li C., Craig H. [et al.]. Micro-scale S isotope studies of the Kharaelakh intrusion, Noril'sk region, Siberia: Constraints on the genesis of coexisting anhydrite and sulfide minerals, *Geochimica et Cosmovhimica Acta*, 2010, V. 74, pp. 634–644.
- 39. Sobolev S. V., Sobolev A. V., Kuzmin D. V., Krivolutskaya N. A., Petrunin A. G., Arndt N. T., Rad'-

# Автор

#### Криволуцкая Надежда Александровна

доктор геолого-минералогических наук ведущий научный сотрудник nakriv@mail.ru

ФГБУН Институт геохимии и аналитической химии имени В. И. Вернадского РАН, г. Москва, Россия ko V. A., Vasil'ev Yu. R. Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes, *Nature*, 2011, V. 477, pp. 312–316.

- 40. Tolstykh N. [et al.] Unique Cu-rich sulphide ores of the Southern-2 orebody in the Talnakh Intrusion, Noril'sk area (Russia): Geochemistry, mineralogy and conditions of crystallization, *Ore Geology Reviews*, 2020, V. 122, pp. 103525.
- Vymazalová A. [et al.] Sluzhenikinite, Pd<sub>15</sub>(Sb<sub>7-x</sub> S<sub>nx</sub>) 3≤x≤4, a new platinum group mineral (PGM) from the Oktyabrsk deposit, the Norilsk deposits, Russia, *Mineralogical Magazine*, 2022, V. 86, No. 4, pp. 577–585.

# **Author**

# Nadezhda A. Krivolutskaya

D. Sc. in Geology and Mineralogy Leading Researcher nakriv@mail.ru

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia



Руды и металлы № 4/2022, с. 136, 137 Ores and metals № 4/2022, р. 136, 137

# Список статей, опубликованных в журнале «Руды и металлы» в 2022 г.

# Новости, информация

Журналу «Руды и металлы» 30 лет. – № 4. – С. 6–9.

#### Общие вопросы недропользования

#### Гермаханов А. А., Черных А. И., Гирфанов М. М., Истомин В. А., Сватков А. С.

Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы твёрдых полезных ископаемых Боливарианской Республики Венесуэла. – № 4. – С. 10–30.

#### Кременецкий А. А., Спиридонов И. Г., Пилицын А. Г., Веремеева Л. И.

Минерально-сырьевые кластеры Арктической зоны России и перспективы расширения внешней границы её континентального шельфа. – № 4. – С. 32–53.

### Прикладная металлогения

#### Гриненко В. С., Баранов В. В., Девятов В. П.

Северо-Азиатская черносланцевая рудоносная мегапровинция на северо-востоке Евразии и её перспективная минерагения. – № 2. – С. 36–55.

#### Калашников В. В.

Перспективы освоения месторождений Южно-Янского оловорудного района. – № 2. – С. 56–64.

#### Иванов А. И., Агеев Ю. А., Конкин В. Д., Мигачёв И. Ф., Донец А. И.

Особенности золотого рудообразования в юговосточной части Байкало-Патомской металлогенической провинции (Джалагунское рудное поле). – № 3. – С. 6–44.

### Черных А. И., Окулов А. В., Кряжев С. Г., Арсентьева И. В.

Геологическое строение и золотоносность Шаманского рудного узла Алтае-Саянской склад-

чатой области (Республика Хакасия). – № 4. – С. 54–77.

# Методы и методики прогноза, поисков, оценки и разведки месторождений

#### Воробьёв С. А., Миляев С. А.

Геохимические поиски рудных месторождений, не выходящих на дневную поверхность. Состояние и перспективы. – № 1. – С. 6–23.

### Бардухинов Л. Д., Зинчук Н. Н.

Алмазы из древних осадочных толщ и их поставщики (на примере Якутской кимберлитовой провинции). – № 2. – С. 65–86.

# Охунов А. Х., <u>Зималина В. Я.,</u> Рахмонова Н. Б., Мухаммедов Ж. Э.

Причины неподтверждения разведанных запасов на золоторудном месторождении Чармитан. – № 3. – С. 45–56.

### Строение рудных месторождений

# Максаров Р. А., Прокопьев И. Р., Дорошкевич А. Г., Редин Ю. О., Малютина А. В.

Новые данные по минералогии золото-сульфидного типа руд месторождения Каральвеем, Чукотка. – № 1. – С. 24–43.

# Столяренко В. В., Минаков А. В., Рябошапко А. Г., Минаева С. В., Алфёрова В. А.

Прогнозно-поисковая модель золотого оруденения в пределах мезозойских впадин в Центрально-Алданском рудно-россыпном районе (на примере Верхне-Якокутского рудного поля). – № 1. – С. 44–76.

### Вдовина Л. Г.

Тирехтяхский, арга-ыннах-хайский и кестёрский интрузивные комплексы по материалам ГДП-200 на территории листов Q-53-IX, X. – № 2. – С. 88–98.



# Болонин А. В., Мамедов В. И., Мызников И. К.

Железистые кварциты горного хребта Симанду (Гвинейская Республика). – № 3. – С. 57–77.

#### Нуржанов Г. Ж., Кузнецов В. В., Ниценко П. А., Кудрявцева Н. Г., Кузнецова Т. П., Мурзагулов М. М.

Особенности геологического строения и генезиса месторождения Дюсембай Центральный (Саяхат). – № 4. – С. 79–101.

# Серавина Т. В., Кузнецова С. В., Филатова Л. К., Донец А. И., Конкин В. Д.

Особенности локализации колчеданно-полиметаллических руд Тушканихинского месторождения (Рудный Алтай). – № 4. – С. 102–118.

#### Строение месторождений алмазов

### Зинчук Н. Н.

Коры выветривания и их роль в формировании посткимберлитовых осадочных толщ. – № 2. – С. 100–120.

# Вещественный состав и свойства пород и руд

#### Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д.

Алмазы из низкопродуктивных кимберлитов. – № 1. – С. 77–93.

# Шишканова К. О., Округин В. М., Философова Т. М.

Особенности минералогии руд южного фланга золото-серебро-полиметаллического месторождения Мутновское (Южная Камчатка). – № 3. – С. 78–100.

# Комплексное использование минерального сырья

#### Левченко Е. Н., Соленикова Е. О.

Морфоструктурные особенности гранатов прибрежно-морских россыпей, определяющие технологию их переработки. – № 1. – С. 94–105.

# Некипелова А. В., Сокол Э. В., Кох С. Н., Филиппова К. А.

Керченские осадочные железные руды – нетрадиционный источник Nd и MREE: особенности и перспективы. – № 1. – С. 106–120.

#### Дискуссии

Соколов Е. П., Бабкина Т. Г., Макогонов И. В., Линник И. А., Халгаев Е. У., Шматкова Л. Е., Анисимова Г. С., Кондратьева Л. А., Кардашевская В. Н.

Новый тип золотого оруденения в породах фундамента Алдано-Становой золотоносной провинции. – № 2. – С. 122–140.

#### Барышев А. Н.

Адвективные структуры толщ дна озера Натрон и его окружения (Танзания). – № 3. – С. 101–109.

#### Страницы истории

#### Калашников В. В., Ковалёв Л. Н.

Геологические работы в Республике Саха (Якутия) за 100 лет. – № 2. – С. 6–24.

#### Толстов А. В., Зинчук Н. Н.

Вклад Алмазной лаборатории ЦНИГРИ в научную кладовую Якутии. – № 2. – С. 25–35.

#### Криволуцкая Н. А.

Основы теории магматического рудообразования в трудах М. Н. Годлевского и их современное развитие. – № 4. – С. 119–135.

#### Поздравляем с юбилеем

А. Г. Волчкова (№ 1)

#### Посвящается памяти

Е. А. Козловского (№ 1) В. А. Ян-Жин-Шина (№ 2)

Список статей, опубликованных в журнале «Руды и металлы» в 2022 г. – № 4. – с. 136, 137

Редакция: Г. В. Вавилова, О. А. Грибовская, В. С. Жаркова Вёрстка: О. А. Грибовская, В. С. Жаркова, В. Ю. Козлова Оригинал-макет: А. С. Рязанцева Фото на обложке (висмут): http://www.kingbismuth.com/tag/arts-and-crafts/page/2/

Подписано в печать 20.12.22 г. Формат 290 × 205. Бумага листовая. Печать цифровая Отпечатано в ФГБУ «ЦНИГРИ»: 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, 129, корп. 1

Адрес редакции: 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, 129, корп. 1, ФГБУ «ЦНИГРИ» Телефон: 8 (495) 315-28-47 Факс: 8 (495) 315-43-47 E-mail: rudandmet@tsnigri.ru, rudandmet@yandex.ru Сайт: http://www.rm.tsnigri.ru

© «Руды и металлы», 2022