



РУДЫ и МЕТАЛЛЫ



научно-технический журнал

1
2021

И РУДЫ и МЕТАЛЛЫ



научно-технический журнал

№ 1 январь – май 2021

Учредитель

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

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

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

Москва ЦНИГРИ 2021

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Черных Александр Иванович

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

Иванов Анатолий Иннокентьевич

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

Пирайно Франко

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

Наумов Евгений Анатольевич

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

Жаркова Вера Сергеевна

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

Аракчеев Дмитрий Борисович

генеральный директор ФГБУ «Росгеолфонд»
кандидат технических наук

Волчков Алексей Гордеевич

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

Вымазалова Анна

Чешская геологическая служба, г. Прага, Чешская Республика

Голубев Юрий Конкордьевич

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

Горячев Николай Анатольевич

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

Дементьев Владимир Евгеньевич

генеральный директор АО «Иргиредмет»
кандидат технических наук

Звездов Вадим Станиславович

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

Калинин Юрий Александрович

главный научный сотрудник ИГМ СО РАН
доктор геолого-минералогических наук

Кременецкий Александр Александрович

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

Кряжев Сергей Гаврилович

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

Кузнецов Владимир Вениаминович

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

Ленц Дэвид

профессор, Университет Нью Брунсвик, Канада

Мишенин Сергей Григорьевич

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

Похиленко Николай Петрович

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

Проскурнин Василий Фёдорович

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

Зельтманн Реймар

профессор, Музей естественной истории,
г. Лондон, Великобритания

Толстов Александр Васильевич

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

Третьякова Ирина Геннадьевна

учёный секретарь ФГБУ «ЦНИГРИ»
кандидат геолого-минералогических наук

Фридовский Валерий Юрьевич

директор ИГАБМ СО РАН
доктор геолого-минералогических наук, профессор



СОДЕРЖАНИЕ CONTENTS

НОВОСТИ, ИНФОРМАЦИЯ

Состоялось заседание Коллегии
Федерального агентства
по недропользованию

05

NEWS, INFORMATION

Rosnedra board meeting

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

**Лаптева А. М., Мустафа Т. С.,
Смошникова А. В., Чернова А. Д.**

Оценка перспектив рационального
освоения ресурсов железомарганцевых
конкреций дна Мирового океана в контексте
эволюции мировых рынков меди, никеля,
кобальта и марганца

06

SUBSOIL USE

**Lapteva A. M., Mustafa T. S.,
Smolnikova A. V., Chernova A. D.**

Assessment of potential efficient
development of the world ocean
ferromanganese nodules in the context
of global copper, nickel, cobalt
and manganese market evolution

МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА, ПОИСКОВ, ОЦЕНКИ И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Кузнецов В. В., Чижова И. А.

Опыт разработки и применения
интеллектуально-графических
компьютерных систем

26

PROGNOSIS, PROSPECTING AND EXPLORATION: TECHNIQUES AND METHODS

Kuznetsov V. V., Chizhova I. A.

Experience in developing and using
intelligent graphical computer systems

**Рогизный В. Ф.,
Куликов Д. А., Карпукхина М. В.,
Черемисин А. А., Хромов В. М.**

Оценка инвестиционной привлекательности
платиноносных и медно-никелевых объектов
Мончегорского рудного района
в современных условиях

42

**Rogizny V. F.,
Kulikov D. A., Karpukhina M. V.,
Cheremisin A. A., Khromov V. M.**

Investment appeal assessment of Pt-rich
and Cu-Ni deposits of Monchegorsky ore
district in current conditions

СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

**Андреев А. В., Гирфанов М. М.,
Старостин И. А., Авилова О. В.,
Кряжев С. Г. Юрмазов Д. Н.,
Бабкин И. А., Семёнов М. И.**

Геологическое строение, рудно-метасоматическая и минералогическая зональность золотосодержащего молибден-медно-порфирирового месторождения Кызык-Чадр, Республика Тыва

57

STRUCTURE OF ORE DEPOSITS

**Andreev A. V., Girfanov M. M.,
Starostin I. A., Avilova O. V.,
Kryazhev S. G., Yurmazov D. N.,
Babkin I. A., Semenov M. I.**

Geological structure, ore-metasomatic and mineralogical geochemical zoning of Au-Mo-Cu porphyry Kyzyk-Chadr deposit, Tyva republic

**Шведов Г. И.,
Самородский П. Н., Макаров В. А.,
Муромцев Е. А., Шадчин М. В.,
Лобастов Б. М., Глушков Ю. В.**

Мышьяковистая самородная медь золото-медно-порфирирового месторождения Ак-Суг, Восточная Тыва

77

**Shvedov G. I.,
Samorodsky P. N., Makarov V. A.,
Muromtsev E. A., Shadchin M. V.,
Lobastov B. M., Glushkov Yu. V.**

Arsenical native copper from Au-Cu porphyry Ak-Sug deposit, Eastern Tyva

СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АЛМАЗОВ

**Игнатов П. А.,
Зарипов Н. Р., Толстов А. В.,
Колесник А. Ю., Мальцев М. В.**

Гидротермальная минерализация в осадочных породах кембрия как индикатор рудовмещающей структуры кимберлитов Слюдякарского поля Якутии

93

GEOLOGY OF DIAMOND DEPOSITS

**Ignatov P. A.,
Zaripov N. R., Tolstov A. V.,
Kolesnik A. Yu., Maltsev M. V.**

Hydrothermal mineralization hosted by Cambrian sedimentary rocks as evidence of kimberlite-hosting structure, Syuldyukarskoye field, Yakutia

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА ПОРОД И РУД

Власова Э. А., Хмельков А. М.

Морфогенетические особенности гранатов из россыпи Дьюкунах, Якутская алмазоносная провинция

106

COMPOSITION AND PROPERTIES OF ROCKS AND ORES

Vlasova E. A., Khmelkov A. M.

Morphogenetic features of garnets from Dyukunakh placer (Yakutian diamondiferous province)

ПОЗДРАВЛЯЕМ С ЮБИЛЕЕМ

**Иванова А. И.
Кряжева С. Г.
Беневольского Б. И.**

113

OUR CONGRATULATIONS

**Ivanova A. I.
Kryazhev S. G.
Benevol'sky B. I.**

ПОСВЯЩАЕТСЯ ПАМЯТИ

**В. И. Куторгина
В. Д. Крюкова**

118

IN MEMORIAM

**V. I. Kutorgin
V. D. Krukov**



Заместитель Министра природных ресурсов и экологии РФ – руководитель Федерального агентства по недропользованию

Е. А. Киселёв

Уважаемые геологи – работники и ветераны отрасли!

От всей души поздравляю вас с профессиональным праздником – Днём геолога! 55 лет назад страна по достоинству оценила наш труд, утвердив государственный статус Дня геолога!

Геологи внесли уникальный вклад в создание российской минерально-сырьевой базы, укрепление отечественного промышленного, энергетического потенциала, способствовали освоению огромных территорий. Сегодня благодаря самоотверженному труду геологов открываются и осваиваются новые месторождения на суше и в акваториях морей, увеличиваются запасы полезных ископаемых, стабильно работают промышленные предприятия.

Быть геологом – это большая честь и большая ответственность. Уверен, что ваши знания, опыт и высокий профессионализм и в дальнейшем будут продвигать геологическую отрасль вперёд и укреплять экономику России.

Коллеги, друзья! В день профессионального праздника примите искренние слова благодарности за ваш нелёгкий труд. Крепкого здоровья, счастья и благополучия вам, вашим родным и близким, а также оптимизма в жизни и радости новых открытий!

Дорогие коллеги, от всей души поздравляю вас с Днём геолога!

В 2021 году нашему профессиональному празднику исполняется 55 лет! Это знаменательная дата для каждого геолога. И, конечно, с особенной теплотой мы чествуем сегодня ветеранов геологоразведочной отрасли, создававших минерально-сырьевой фундамент державы в XX веке.

Символично, что в 2021 году отмечается и 55-летие I Всесоюзного слёта юных геологов нашей страны. Для многих участников детско-юношеского геологического движения геология стала судьбой! Мы сердечно приветствуем педагогов объединений юных геологов и их воспитанников!

Время всегда ставило перед отечественными геологами сложные задачи. Сегодня нужны принципиально новые, прорывные идеи для восполнения разведанных минерально-сырьевых ресурсов России. И у нас есть основания с оптимизмом смотреть в будущее, потому что предшественниками создан огромный теоретический задел, в отрасль приходит талантливая молодёжь, работают высококлассные специалисты.

Это большое счастье заниматься любимой работой, делиться друг с другом профессиональным опытом, вместе анализировать новые данные, спорить, разгадывая тайны Земли, и идти вперёд – навстречу вольным ветрам и геологическим открытиям!

Дорогие друзья, я желаю вам крепкого здоровья и уверенности в своих силах, творческого беспокойства и сомнений, без которых невозможен научный поиск! И пусть вам сопутствует успех!



Генеральный директор ФГБУ «ЦНИГРИ»
главный редактор журнала
«Руды и металлы»

А. И. Черных

Состоялось заседание Коллегии Федерального агентства по недропользованию

9 апреля 2021 года под председательством заместителя Министра природных ресурсов и экологии Российской Федерации – руководителя Федерального агентства по недропользованию Евгения Аркадьевича Киселёва состоялось заседание Коллегии Роснедр. В связи со сложившейся эпидемиологической ситуацией мероприятие прошло в режиме видео-конференц-связи.

В заседании принимали участие представители Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, руководители территориальных органов, а также учреждений, подведомственных Роснедрам, работники центрального аппарата Федерального агентства по недропользованию.

На Коллегию были приглашены председатель Комитета Государственной Думы по природным ресурсам, собственности и земельным отношениям Николай Петрович Николаев, член Комитета Совета Федерации по аграрно-продовольственной политике и природопользованию Геннадий Иванович Орденков, заместитель начальника Контрольного управления Президента Российской Федерации Валентин Васильевич Летуновский и заместитель начальника Управления Генеральной Прокуратуры РФ по надзору за исполнением законодательства в экологической сфере – начальник отдела по надзору за исполнением законодательства в сфере использования природных ресурсов Главного управления по надзору за исполнением федерального законодательства Генеральной Прокуратуры РФ Канунцев Александр Александрович.

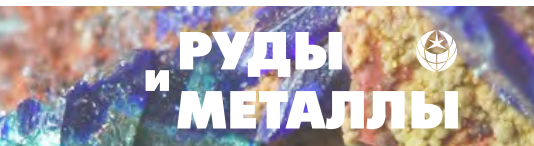
Среди основных вопросов повестки дня заседания – рассмотрение Итогового доклада о работе Федерального агентства по недропользованию в 2020 году и планов на 2021–2023 гг., с которым выступил заместитель Министра природных ресурсов и экологии РФ – руково-

дитель Федерального агентства по недропользованию Е.А. Киселёв, а также Публичной декларации целей и задач Федерального агентства по недропользованию на 2021 год.

В обсуждении представленных материалов приняли участие председатель Общественного совета при Роснедрах Евгений Гатович Фаррахов, заместитель руководителя Роснедр Сергей Алексеевич Аксёнов, руководитель Департамента по недропользованию по Центрально-Сибирскому округу Юрий Алексеевич Филиппов, генеральный директор ФБУ «ГКЗ» Игорь Викторович Шпуров.

В завершение мероприятия члены Коллегии Роснедр единогласно утвердили итоги работы Федерального агентства по недропользованию в 2020 году и планы на 2021–2023 гг., а также Публичную декларацию целей и задач Федерального агентства по недропользованию на 2021 год.





Оценка перспектив рационального освоения ресурсов железомарганцевых конкреций дна Мирового океана в контексте эволюции мировых рынков меди, никеля, кобальта и марганца

Assessment of potential efficient development of the World ocean ferromanganese nodules in the context of global copper, nickel, cobalt and manganese market evolution

Лаптева А. М., Мустафа Т. С.,
Смольникова А. В., Чернова А. Д.

Lapteva A. M., Mustafa T. S.,
Smolnikova A. V., Chernova A. D.

Приведены результаты анализа возможных последствий добычи железомарганцевых конкреций (ЖМК) и производства из них меди, никеля, кобальта и марганца. Рассмотрены возможные сценарии развития потребления, наземного производства и перспективы развития сырьевых баз указанных металлов до 2035 г. Показано, что в этот период на рынках каждого из рассматриваемых металлов ожидается дефицит предложения, который может быть компенсирован за счёт глубоководного производства. Однако условия и сроки возникновения дефицита разных металлов сильно отличаются. В результате при совпадении начала добычи ЖМК с наиболее ранними проявлениями дефицита на остальных рынках возникнет профицит, что негативно повлияет не только на наземные производства и проекты освоения новых месторождений и проведения ГРП, но и снизит рентабельность самой глубоководной добычи вплоть до перехода её в категорию нерентабельной. Добыча ЖМК с извлечением из них меди, никеля, кобальта и марганца может быть осуществлена без негативных последствий для всех участников рынка не ранее 2030 г.

Ключевые слова: медь, никель, кобальт, марганцевые руды, железомарганцевые конкреции, потребление, производство, глубоководная добыча, проекты освоения, прогноз.

The paper analyzes implications of ferromanganese nodule mining and copper, nickel, cobalt and manganese production for their land-based producers. Potential scenarios are considered for consumption development, onshore production and long-term development of these metals' mineral bases through 2035. It is shown that each metal market could be undersupplied over this period; this shortage can be offset by deepsea production. However, conditions and deficit emergence for various metals vary greatly. As a result, coincidence of nodule mining with the earliest deficit signs in the remaining markets will lead to oversupply, which will negatively affect onshore production, new mining and exploration projects; this will also reduce profitability of deepsea mining even making it uneconomic. It is not until 2030 that nodule mining involving copper, nickel, cobalt and manganese production can be implemented with no negative effects for market players.

Keywords: copper, nickel, cobalt, manganese ores, ferromanganese nodules, consumption, production, deep-sea mining, development project, forecast.

Для цитирования: Лаптева А. М., Мустафа Т. С., Смольникова А. В., Чернова А. Д. Оценка перспектив рационального освоения ресурсов железомарганцевых конкреций дна Мирового океана в контексте эволюции мировых рынков меди, никеля, кобальта и марганца. Руды и металлы. 2021. № 1. С. 6–25. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10001.

For citation: Lapteva A. M., Mustafa T. S., Smolnikova A. V., Chernova A. D. Assessment of potential efficient development of the World ocean ferromanganese nodules in the context of global copper, nickel, cobalt and manganese market evolution. Ores and metals, 2021, № 1, pp. 6–25. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10001.



Статистические данные о производственных показателях мировой горнорудной промышленности однозначно свидетельствуют о нарастающей нагрузке на минерально-сырьевую базу Земли. По оценкам Геологической службы США [20], за весь XX век мировое производство товарных железных руд составило 43,1 млрд т, а за 2000–2015 гг. – 25,9 млрд т. Для марганцевых руд в пересчёте на металл эти показатели составили 433,3 и 198,2 млн т соответственно, для меди – 396,4 и 251,2 млн т, никеля – 34,8 и 28,6 млн т. Добыча бокситов и кобальта в период с 2000 по 2015 г. практически достигла показателей предыдущих 100 лет: для бокситов она составила 3,35 против 3,42 млрд т за 1900–1999 гг., для кобальта – 1,31 против 1,34 млн т.

Интенсификация добычи твёрдых полезных ископаемых (ТПИ) обусловила ускоренное истощение разрабатываемых месторождений, сокращение числа невовлечённых в эксплуатацию объектов, расположенных в районах традиционной добычи или в легко доступных регионах, привела к снижению качества добываемых руд. Однако благодаря прогрессирующему развитию технологической базы как в сфере использования минеральных ресурсов, так и в сфере геологоразведки (ГРП) количественного сокращения ресурсов подавляющего большинства ТПИ не происходит (табл. 1). Это позволяет с уверенностью говорить о том, что истощение сырьевых баз промышленных металлов является весьма отдалённой перспективой. Тем не менее, работы по определению источников металлического сырья для будущего активно ведутся уже достаточно давно, чему также содействует технологический прогресс. В первую очередь в таком качестве рассматриваются минеральные ресурсы дна Мирового океана: железомарганцевые конкреции (ЖМК), из-за сложности состава также называемые полиметаллическими, кобальтоносные железомарганцевые корки и глубоководные полиметаллические сульфиды.

С точки зрения перспектив промышленной добычи на первом месте стоят ЖМК. И хотя пока трудно прогнозировать, когда начнётся их

1. Выявленные ресурсы некоторых промышленных металлов в 1995 и 2015 гг. и суммарное горное производство этих металлов за 1995–2015 гг. (по данным Геологической службы США)

1. Identified resources of some economic metals in 1995 and 2015 and their cumulative mine production for 1995–2020

Полезное ископаемое	Выявленные ресурсы		Суммарное горное производство за 1995–2015 гг.
	1995 г.	2015 г.	
Железные руды, млрд т	> 800	> 800	31,0
Бокситы, млрд т	> 55	> 55	4,0
Медь, млрд т	1,6	2,1	0,3
Никель, млн т	130*	130*	34
Кобальт, млн т	11	25	1,5

*Ресурсы, содержащие не менее 1 % никеля.

разработка и с какой интенсивностью она будет вестись, уже есть первая компания (бельгийская Global Sea Mineral Resources), заявившая о готовности приступить к ней в 2027 г. [14]. Со временем число таких компаний может расти: если сейчас разведку ЖМК ведут 18 компаний-контракторов, то в ближайшие 10–15 лет часть из них может начать производство [24].

Имеется несколько экономических моделей глубоководной добычи ЖМК [22]. Все они предполагают, что по одному эксплуатационному контракту будет добываться 3 млн т конкреций, из которых будут извлекаться медь, никель, кобальт и марганец, но принятые в разных моделях содержания полезных компонентов в ЖМК и показатели их извлечения несколько отличаются. В табл. 2 приведены указанные характеристики, использованные в модели Массачусетского технологического

2. Качественные характеристики ЖМК и потенциальный уровень производства заключённых в них металлов при ведении добычи 2, 6 или 12 компаниями-контракторами, по [22, 23]

2. Quality nodule characteristics and potential production of contained metals by 2, 6 or 12 contractors, after [22, 23]

	Содержание компонента, %	Извлечение компонента, %	Количество извлекаемых металлов, тыс. т/год		
			2 компании / 6 млн т ЖМК	6 компаний / 18 млн т ЖМК	12 компаний / 36 млн т ЖМК
Медь	1,1	90	59,4	178,2	356,4
Никель	1,3	95	74,1	222,3	444,6
Кобальт	0,2	85	10,2	30,6	61,2
Марганец	28,4	90	1533,6	4600,8	9201,6

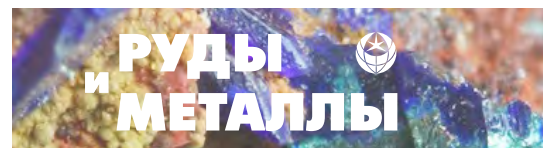
института (США), согласно которой наиболее целесообразно при переработке ЖМК использовать аммиачное выщелачивание [23], а также потенциальный уровень производства указанных металлов при ведении добычи разным количеством контракторов [24].

Как видно из табл. 2, глубоководная добыча может оказаться весьма значительной, что вызывает озабоченность в странах-производителях (прежде всего, в развивающихся странах) и делает принципиально важным вопрос: «Будет ли способен мировой рынок поглотить дополнительные количества металлов, извлекаемых из конкреций, без негативных последствий для традиционных производителей?». Сам факт его появления и активного обсуждения обусловлен одним из ключевых положений Конвенции ООН по морскому праву [1]: «Деятельность в Районе¹ осуществляется... таким образом, чтобы способствовать здоровому развитию мировой экономики и сбалансированному росту международной торговли и содействовать международному сотрудничеству для всестороннего развития всех стран, особенно развивающихся государств, и с целью обеспечения [...] содействия справедливым и устойчивым, выгодным для производителей и справедливым для потребителей ценам на

¹ «Район» – дно морей и океанов и его недра за пределами национальной юрисдикции [1].

полезные ископаемые, добываемые как в Районе, так и из других источников, и содействия долгосрочному равновесию между спросом и предложением, [...] защиты развивающихся государств от отрицательных последствий для их экономики или для их экспортных поступлений, возникающих в результате снижения цены на соответствующий вид полезных ископаемых или уменьшения объёма экспорта такого вида полезных ископаемых в той мере, в какой такое снижение или уменьшение вызвано деятельностью в Районе».

Для ответа на этот вопрос была выполнена оценка потенциального соотношения между спросом и предложением меди, никеля, кобальта и марганца, которое сложится к началу морской добычи и будет сохраняться в последующие годы; горизонтом прогнозирования выбран 2035 г. [24]. При этом необходимо иметь в виду, что при оценках потенциальных потребления и производства на средне- или долгосрочную перспективу могут быть учтены только некие установившиеся и достаточно чётко проявленные тенденции или реализуемые долгосрочные планы или программы (как международные, так и национальные) в отношении производящих или потребляющих отраслей. Но многие факторы в силу их непредвиденности учтены быть не могут. Они могут быть как глобального характера (например, в целом неожиданно развернувшееся



острое торговое противостояние между США и Китаем или пандемия коронавирусной инфекции COVID-19), так и регионального или даже локального (например, природные или техногенные катастрофы).

Методика исследования. В качестве источников информации о потенциальном спросе на рассматриваемые металлы выступили прогнозы потребления, подготовленные и опубликованные исследовательскими группами, международными организациями и некоторыми заинтересованными компаниями. В силу многовариантности имеющихся прогнозов был использован сценарный подход: из всего их многообразия выбирались минимальный, максимальный и средний (базовый).

Потенциальное предложение оценивалось исходя из возможного наземного горного производства рассматриваемых металлов в период до 2035 г. Оно включает две составляющие: производство на действующих рудниках и производство, которое могут обеспечить реализуемые проекты освоения новых месторождений. В ходе выполнения анализа были обобщены данные о ресурсах и производстве (фактическом и потенциальном) по более чем 300 действующим и проектируемым рудникам меди, более чем 150 рудникам никеля, более чем 90 рудникам кобальта и почти 90 рудникам и их группам марганца.

В качестве ожидаемого производства на действующих рудниках взято фактическое производство в 2018 г. с учётом проектов расширения их мощностей (если таковые имеются). При этом учитывалась обеспеченность предприятий ресурсами. Таким образом были выявлены рудники, которые в рассматриваемый период могут прекратить функционирование из-за полного исчерпания ресурсной базы (перспективы её расширения за счёт ГРП и, соответственно, возможное продление срока их жизни не учитывались). Основными источниками информации для этого послужили отчёты горнодобывающих компаний и/или проекты, представляемые этими компаниями.

Поскольку для большинства стран отсутствуют открытые данные по всем действующим

там рудникам, для получения максимально полной картины недостающие объёмы производства учитывались на основании данных официальной государственной и/или отраслевой статистики. Это касалось прежде всего Китая, а также ряда других стран, таких как Демократическая Республика Конго и страны Латинской Америки. Статистические данные также привлекались для мелких стран-производителей. При учёте этой части добычи также делалось допущение, что она сохранится на уровне 2018 г.

При оценке производства на месторождениях, на базе которых реализуются проекты освоения, учитывались проектное производство и ожидаемые сроки ввода в эксплуатацию. Если официальные данные о сроках начала производства отсутствовали, они оценивались исходя из стадии реализации проектов. Здесь также учитывался возможный срок жизни предприятий, определяемый по соотношению их проектной мощности и ресурсной базы.

Все рассмотренные проекты по перспективам начала производства разделены на две категории: «ожидаемые» (находящиеся на стадии строительства или имеющие окончательное технико-экономическое обоснование) и «возможные» (имеющие предварительное технико-экономическое обоснование). Кроме того, принимались во внимание разного рода сложности, возникающие при реализации проектов (для меди это обусловило необходимость выделения категории «приостановленные проекты»).

При оценке потенциального предложения также учитывались возможные объёмы производства вторичных металлов, получаемых в результате переработки лома.

Сопоставление сценариев роста потребления рассматриваемых металлов с перспективами наземной добычи позволили оценить возможное соотношение спроса и предложения в период до 2035 г.

Влияние пандемии коронавирусной инфекции COVID-19 на будущее рассматриваемых металлов не учитывалось.

Результаты и обсуждение. *Медь.* На сегодняшний день имеется значительное количе-

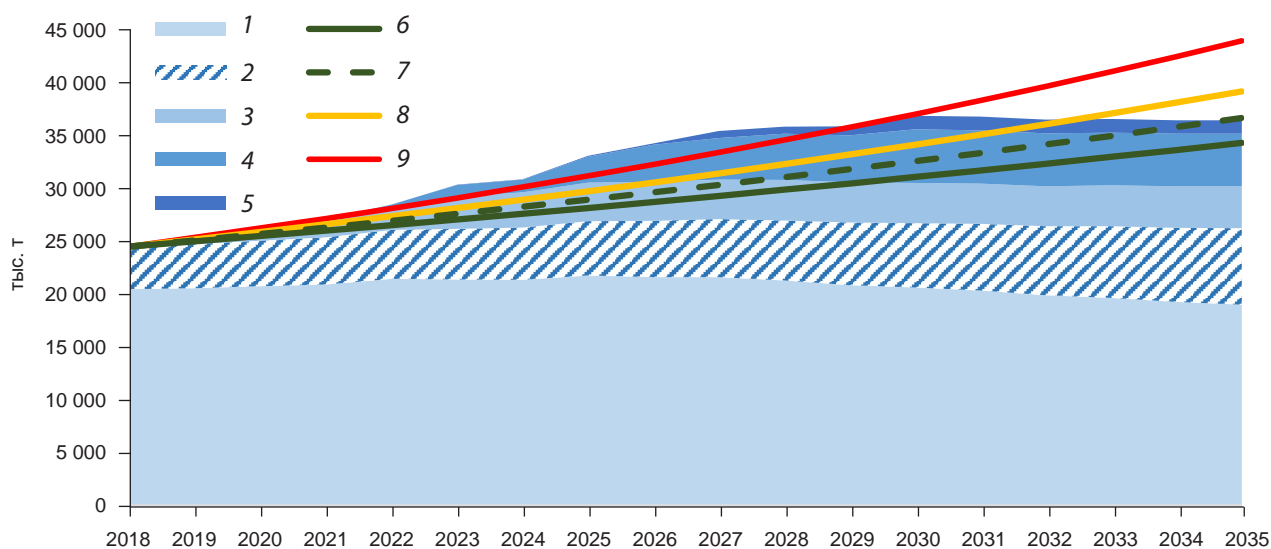


Рис. 1. Возможные сценарии роста производства и потребления меди до 2035 г., тыс. т:

1 – действующие рудники; 2 – производство вторичной меди; 3 – «ожидаемые» проекты; 4 – «возможные» проекты; 5 – «приостановленные» проекты; сценарии потребления меди: 6 – рост на 2 % в год, 7 – рост на 2,4 % в год, 8 – рост на 2,8 % в год, 9 – рост на 3,5 % в год

Fig. 1. Potential scenarios of copper production and consumption growth until 2035, kt:

1 – operating mines; 2 – secondary copper production; 3 – “expected” projects; 4 – “possible” projects; 5 – “suspended” projects; copper consumption scenarios: 6 – 2%/year growth, 7 – 2.4%/year growth, 8 – 2.8%/year growth, 9 – 3.5%/year growth

ство прогнозов потребления меди. В их основе лежат ожидаемые темпы роста мирового ВВП и численности населения, развитие «зелёных технологий», переход на возобновляемые источники энергии, выполнение условий Парижского соглашения о регулировании мер по снижению содержания углекислого газа в атмосфере, принятого в 2015 г. (одной из его основных целей является ограничение роста средней температуры на планете на 2 °C по отношению к показателям доиндустриальной эпохи, а по возможности снижение её до 1,5 °C), и прочие факторы. Однако при всём многообразии этих прогнозов ожидаемые темпы роста потребления меди варьируют в сравнительно узких пределах – от 1,8 до 4 % в год. На основании анализа имеющихся вариантов и с учётом скорости роста спроса на медь в последние 10 лет нами были выбраны три сценария (рис. 1):

1. Подразумевает рост мирового потребления на 2 % в год. Соответствует прогнозам консалтинговых агентств Roskill [10], McKinsey Global Institute [5] и др. [12, 31];

2. Соответствует среднегодовому показателю за 2007–2018 гг., составившему 2,8 %. Аналогичный или близкий годовой рост подразумевают прогнозы DBS Group, Fitch Solutions и исследовательских групп из США и Нидерландов [9, 12, 31];

3. Предполагает рост потребления меди на 3,5 % в год, что соответствует сценариям исследовательских групп из США и Нидерландов, а также темпам роста потребления меди в 2010–2018 гг.

Согласно проведённому анализу, к 2035 г. производство меди ныне действующими рудниками может сократиться на 7 % относительно уровня 2018 г. из-за полного исчерпания ресурсной базы некоторых из них. В то же вре-



мя ожидаемый рост производства вторичной меди может полностью компенсировать выбывающие мощности. Ввод в строй основной части «ожидаемых» и «возможных» проектов освоения месторождений меди ожидается с 2025 г., а в 2035 г. они могут обеспечить выпуск 4 и 5 млн т меди в год соответственно. «Приостановленные» проекты (если работы на них возобновятся) могут добавить ещё около 1,3 млн т меди в год. Результатом ввода в эксплуатацию всех реализуемых и приостановленных проектов станет увеличение выпуска рудничной меди примерно на 50 % относительно уровня 2018 г. – примерно до 30 млн т; этот показатель прироста может быть достигнут в 2027 г. и будет сохраняться до конца всего рассматриваемого интервала времени. Выявленные ресурсы (identified resources) меди, локализованные на суше, по оценкам Геологической службы США составляют 2,1 млрд т [28], что с учётом технологических потерь при добыче и переработке руд достаточно для обеспечения такого производства в течение примерно 60 лет. Так называемые невыявленные ресурсы (undiscovered resources) суши, оцениваемые в 3,5 млрд т, увеличивают этот срок ещё примерно на 100 лет. Таким образом, наземная сырьевая база меди (с учётом имеющегося потенциала её прироста) в состоянии не только поддерживать в течение длительного периода времени уровень производства, который может быть достигнут в 2030-е годы, но и обеспечить его дальнейшее наращивание.

При годовом росте мирового потребления меди на 2 % и реализации всех «ожидаемых» и «возможных» проектов предпосылки для возникновения дефицита отсутствуют (при таком развитии проектов бездефицитность будет сохраняться при росте потребления не более чем на 2,4 % в год), при этом высока вероятность перенасыщения рынка металлом, особенно в период между 2025 и 2033 г. (см. рис. 1). Это может привести к падению цен на медь и обострению конкуренции между её производителями, что повлечёт за собой сокращение производства (прежде всего за счёт закрытия наименее эффективных предприятий) и при-

остановку или перенос сроков реализации проектов освоения новых месторождений. Однако если часть «возможных» проектов не будет введена в строй в ожидаемые сроки, то с 2030 г. могут возникнуть трудности с обеспечением спроса на медь даже при умеренном росте мирового потребления.

Если среднегодовые темпы роста потребления составят около 2,8 %, угроза дефицита может возникнуть даже в случае запуска всех проектов, но после 2032 г. Причём в зависимости от успешности реализации проектов в 2035 г. дефицит металла на рынке может составить от 3 (если в эксплуатацию будут введены все проекты, включая «приостановленные») до 13 млн т (если будут введены только «ожидаемые» проекты).

При темпах роста потребления меди в 3,5 % в год рынок может стать дефицитным после 2030 г., а если ввод в части «возможных» проектов будет задерживаться, а «приостановленные» проекты останутся неактивными – уже в 2024–2025 гг. В 2035 г. рыночный дефицит может составить 7,5–18 млн т меди. В то же время ожидания столь значительного дефицита, безусловно, вызовут волнения на рынке и рост цен на металл, что станет мощным стимулом для инвестиций в освоение новых месторождений меди, а также в геологоразведочные работы на неё. В связи с этим мы считаем маловероятной задержку ныне реализуемых проектов и полагаем, что «приостановленные» проекты будут активизированы. Кроме того, на фоне развивающегося дефицита ещё больше возрастёт интерес ко вторичным ресурсам. В результате дефицит может сформироваться на рынке позже и принципиально меньшим, чем сейчас можно ожидать. Также нельзя исключить такие темпы развития сырьевой базы меди, которые предупредят дефицит.

Итак, говорить об угрозе возникновения дефицита, который не смогут покрыть действующие и проектируемые медные рудники, можно только при условии среднегодового роста потребления меди более чем на 2,4 % в год. При этом опыт предыдущих лет показывает, что среднегодовые темпы роста потребления на уровне 3,5 % не являются аномальными и

вполне могут быть обеспечены адекватным производством на базе традиционных источников.

Ожидаемое производство меди из ЖМК не будет значительным: даже при его максимальном уровне (см. табл. 2) оно будет соответствовать менее чем 2 % текущего рудничного производства. А если учесть ввод в эксплуатацию существующих наземных проектов, эта доля будет ещё меньше. Формально для мирового рынка такой прирост будет мало заметен, однако реальный эффект от него будет определяться реальным соотношением спроса и предложения, который сложится на рынке к этому моменту. При его сбалансированности даже малая порция дополнительного металла может повлечь за собой негативные последствия, такие как падение цен и обострение конкуренции среди горных предприятий. При дефицитности поставок влияние этого дополнительного металла будет зависеть от масштаба дефицита: если он будет соответствовать цифрам, вытекающим из наших оценок, «глубоководная» медь покроет лишь малую его часть.

Никель. Основные перспективы роста потребления никеля связывают с наращиванием электрификации автотранспорта и производством аккумуляторных батарей повышенной ёмкости. Оценки роста спроса никеля в производстве аккумуляторов сильно разнятся, варьируя от 4- до 14-кратного увеличения к 2030 г., что обусловлено невозможностью определить наиболее вероятное развитие ситуации по ряду ключевых направлений. К основным факторам, влияние которых экспертами оценивается по-разному, прежде всего относятся вопросы, связанные с перспективами использования конкретных типов аккумуляторных батарей и преобладающего типа электромобилей, от которых зависит доля использования того или иного металла.

Что касается будущего спроса со стороны производителей нержавеющей стали, являющихся традиционными потребителями никеля, то, согласно единому мнению всех экспертов, он сохранит устойчивый рост. При этом оценки темпов его роста также сильно разнятся: Roskill предполагает его увеличение к

2030 г. на 40 %, а Wood Mackenzie – только на 20 % [16, 19].

На основании анализа имеющихся прогнозов роста потребления нами были выбраны сценарии роста потребления никеля (рис. 2):

1. Соответствует прогнозу Wood Mackenzie и предполагает ежегодный рост мирового спроса на 2,6 %; это самые низкие темпы роста из рассмотренных нами прогнозов;

2. Соответствует прогнозу агентства Roskill и предполагает рост мирового спроса в среднем на 4 % в год; он в целом соответствует среднему значению прогнозируемых большинством аналитических агентств темпов роста потребления;

3. Соответствует прогнозу BloombergNEF [6] и предполагает наиболее быстрые темпы роста спроса, составляющие 5 % в год.

Заметим, что в 2010–2018 гг. среднегодовой прирост потребления никеля находился на уровне 7,2 %. Практически единственной причиной столь быстрого роста стало бурное развитие никелепотребляющих отраслей промышленности Китая.

Согласно проведённому анализу к 2035 г. производство никеля на действующих предприятиях в связи с истощением их ресурсной базы может сократиться на 2 % относительно уровня 2018 г. из-за полного исчерпания месторождений, на базе которых они функционируют.

Добыча на «ожидаемых» проектах могла начаться уже в 2020 г., а к 2035 г. их совокупное производство может достичь почти 350 тыс. т никеля в год. «Возможные» проекты могут вводиться в эксплуатацию с 2024 г. К концу рассматриваемого периода совокупная добыча на них может составить ещё около 400 тыс. т металла в год. Результатом ввода в эксплуатацию всех известных проектов будет не только компенсация выбывающего производства на действующих рудниках, но и его значительный прирост: в 2028–2031 гг. производство никеля может превысить уровень 2018 г. примерно на 45 % (составит около 3,2 млн т), а в 2035 г. (с учётом выбывания некоторых предприятий) – почти на треть (составит 2,9 млн т). Ресурсы никеля, выявленные на суше, оцени-

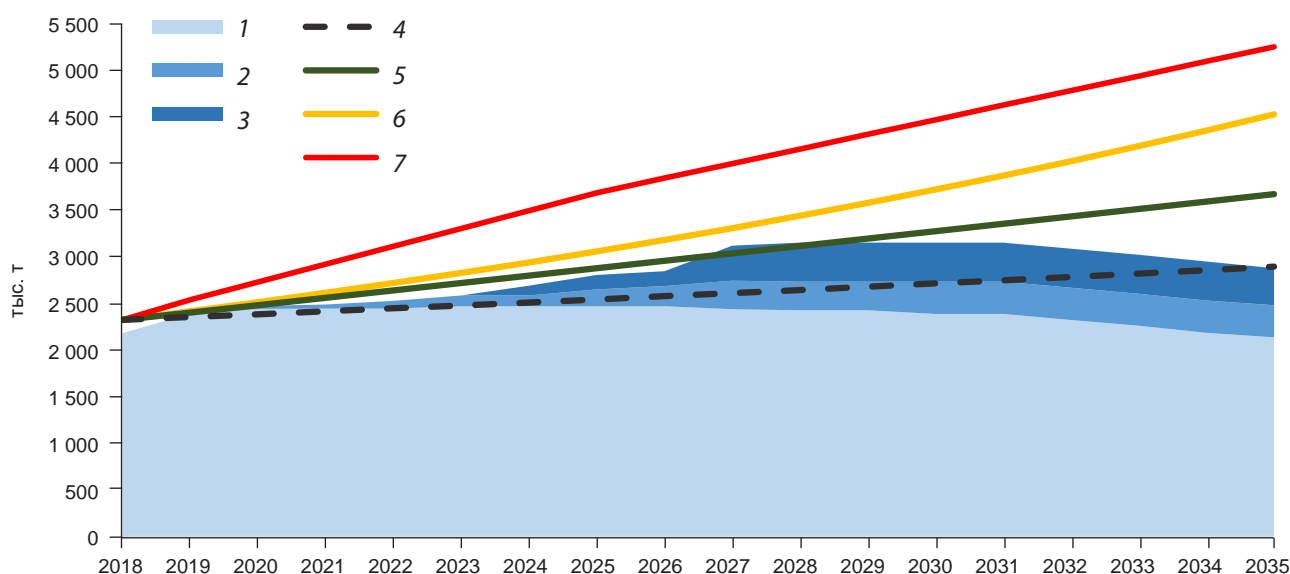


Рис. 2. Возможные сценарии роста производства и потребления никеля до 2035 г., тыс. т:

1 – действующие рудники; 2 – «ожидаемые» проекты; 3 – «возможные» проекты; сценарии потребления никеля: 4 – рост на 1,3 % в год, 5 – рост на 2,6 % в год, 6 – рост на 4 % в год, 7 – рост на 5 % в год

Fig. 2. Potential scenarios of nickel production and consumption growth until 2035, kt:

1 – operating mines; 2 – “expected” projects; 3 – “possible” projects; nickel consumption scenarios: 4 – 1.3%/year growth, 5 – 2.6%/year growth, 6 – 4%/year growth, 7 – 5%/year growth

ваются примерно в 300 млн т [29] (причём авторы этой оценки подчёркивают, что они продолжают устойчиво расти), что с учётом технологических потерь при добыче и переработке руд достаточно для поддержания максимального ожидаемого уровня производства на протяжении примерно 85–88 лет.

При росте потребления на 2,6 % в год рынок будет близок к сбалансированному состоянию до 2029 г., а в дальнейшем может сформироваться дефицит первичного металла. При этом возможная нехватка металла лишь после 2032 г. превысит текущий дефицит (стабильно бездефицитным рынок будет при росте потребления на среднегодовом уровне в 1,3 %, однако при таком развитии ситуации ввод в эксплуатацию большинства «возможных» проектов, скорее всего, будет перенесён на более поздние сроки). Необходимо отметить, что нами не учитываются складские запасы бирж и частных компаний, а также вторичный ме-

талл, для производства которого имеются перспективы роста (в первую очередь за счёт отработанных аккумуляторных батарей). Поэтому в реальности дефицит на рынке никеля может проявиться позже и/или оказаться существенно ниже.

При реализации двух других сценариев роста потребления никеля, несмотря на значительное увеличение его производства, рынок может испытывать дефицит металла на протяжении всего рассматриваемого интервала времени. Причём даже при успешной реализации всех текущих проектов этот дефицит может в 2035 г. составить около 2,4 млн т, что превышает текущее производство. Ожидание этого может привести к значительному росту цен на металл, что создаст условия для активизации работ по подготовке к эксплуатации известных, но пока неактивных месторождений, как это уже было в первой половине 2000-х гг. В этом отношении весьма перспек-

тивны месторождения латеритных руд, освоение которых не требует больших затрат времени и сравнительно дёшево. Кроме того, в последние годы наблюдается значительный рост расходов на проведение ГРП на никель. По данным S&P Global, только за 2019 г. затраты на них выросли по сравнению с предыдущим годом почти на 54 млн долл. – до 351,6 млн долл. [30]. Можно ожидать, что за выявлением новых объектов (особенно с качественным оруденением) последует их экстренное освоение, что быстро скажется на реальном рыночном балансе.

Итак, только при росте потребления никеля на уровне, не превышающем 1,3 % в год на протяжении всего рассматриваемого периода, рынок может сохранять стабильную бездефицитность. При более высоких темпах роста потребления, если не появятся новые проекты освоения никелевых месторождений, дефицит неизбежен. Отличие сценариев будет заключаться только в сроках его наступления и объёмах. При этом опыт предыдущих лет показывает, что среднегодовые темпы роста потребления, превышающие 5 % в год, не являются аномальными и могут быть обеспечены адекватным производством на базе традиционных источников (как это произошло в период после 2009 г.).

Производство никеля из ЖМК может оказаться заметным для рынка: при его минимальном ожидаемом уровне оно будет соответствовать примерно 3–3,5 % текущего рудничного производства, а при максимальном – 20 % (см. табл. 2). Последствия выхода на рынок «глубоководного» металла будут зависеть от наличия дефицита и его размеров. Как показано выше, есть вероятность того, что дефицит будет значительным и даже может превысить всё текущее производство. Тогда никель из ЖМК окажет позитивное влияние на ситуацию. Но также не исключено, что выход этого металла на рынок повлечёт за собой негативные последствия для наземных производителей – сокращение дефицита или ослабление угрозы его формирования могут повлечь за собой снижение цен на металл, а это, безусловно, скажется на экономическом положе-

нии добывающих предприятий и инвестиционной привлекательности проектов освоения никелевых месторождений и ГРП на никель.

Кобальт. Перспективы потребления кобальта связывают исключительно с сектором литий-ионных батарей, прежде всего для электротранспорта, а также стационарных батарей и батарей для электронных устройств. При этом целый ряд факторов риска (среди которых волатильность цен и опасения недостаточности поставок) обусловили изменения в химическом составе таких батарей, суть которых в снижении содержания кобальта вплоть до полного отказа от него. Так, применяемые в электронике литий-кобальтовые аккумуляторы (LCO), содержащие 60 % кобальта, постепенно заменяются на никель-марганец-кобальтовые (NMC) с содержанием кобальта 10–30 %, литий-никель-кобальт-алюминий-оксидные (NCA) с 14 % кобальта – на литий-феррофосфатные (LFP), в которых кобальт не содержится. Отказ от кобальта наблюдается и в батареях для электротранспорта, хотя он обеспечивает их оптимальную производительность. Считается, что после 2020 г. будут более востребованы батареи с меньшими содержаниями кобальта и более высокими – никеля и алюминия [4].

Таким образом, все прогнозы в отношении мирового потребления кобальта в будущем основаны на темпах развития электротранспорта. Множественность целевых уровней роста парка электромобилей определила разнообразие прогнозов, согласно которым потребление кобальта уже в 2030 г. может составить 320–535 [4, 13] против 125 тыс. т в 2018 г.

Для проведения анализа в качестве минимального и максимального нами были выбраны два сценария, разработанных International Energy Agency (IEA) [4]:

1. Подразумевает рост мирового потребления на 5,6 % в год (IEA считает его наиболее оптимальным). Согласно допущениям, сделанным в этом сценарии, в 2030 г. парк электромобилей составит 56 млн единиц, а мировой спрос на кобальт не превысит 241,5 тыс. т;

2. Подразумевает рост мирового потребления на 8,8 % в год, что примерно соответству-



ет темпам роста в 2010–2018 гг. (составляли 8,7 % в год). Данный сценарий предусматривает показатели, необходимые для достижения целей Парижского соглашения, принятого в 2015 г., а именно расширение глобального парка электромобилей до 20 % от общего парка автотранспорта, используемого к 2030 г. Это означает, что в 2030 г. должно использоваться 110 млн электромобилей и 400 млн электрических двухколёсных транспортных средств, что обусловит достижение мировым потреблением кобальта в указанном году уровня в 344 тыс. т.

В качестве третьего сценария нами взято среднее (между указанными) значение прироста потребления, составляющее 7,2 % в год. При этом отметим, что среди прогнозов IEA есть более экстремальные, предполагающие рост потребления на 11 и 12,9 % в год.

Важнейшая особенность кобальта, отличающая его от всех прочих рассматриваемых металлов и оказывающая принципиальное влияние на перспективы производства, состоит в том, что его добыча в основном ведётся попутно с медью (из стратиформных месторождений Центральной Африки) и никелем (из сульфидных кобальт-медно-никелевых руд и кобальт-никелевых латеритов). По оценкам аналитической компании CRU Group, в 2016 г. около 61 % произведённого кобальта было получено при добыче меди, 37 % – при добыче никеля [3] (с тех пор ситуация не изменилась). Единственный в мире собственно кобальтовый рудник, действующий на базе месторождения Бу-Азер в Марокко, обеспечивает всего около 2 % мирового производства. В результате динамика производства кобальта коррелируется с динамикой добычи меди и никеля из месторождений определённых типов, а не с динамикой спроса на металл.

Согласно проведённому анализу, производство кобальта на действующих рудниках к 2035 г. может сократиться на 23 % из-за исчерпания ресурсной базы некоторых из них. В то же время возможный рост производства вторичного кобальта (примерно в 2 раза к 2035 г.) может сделать это сокращение не таким резким (рис. 3). Ввод в эксплуатацию «ожидае-

мых» и «возможных» проектов может начаться с 2021 г., и к 2035 г. они могут обеспечить производство 58 и 17 тыс. т кобальта в год соответственно. В результате в 2025–2032 гг. мировой показатель может превысить уровень 2018 г. на 47–52 % (более 200 тыс. т металла в год против 137 тыс. т.), а в 2035 г. (с учётом выбывания некоторых предприятий) – почти на треть (составив более 181 тыс. т). Ресурсы кобальта, выявленные на суше, оцениваются примерно в 25 млн т [28], что достаточно для поддержания максимального ожидаемого уровня производства на протяжении не менее 100 лет.

Как показывает рис. 3, ожидаемый прирост производства кобальта не сможет обеспечить прогнозируемый уровень потребления на протяжении всего рассматриваемого периода времени. При годовом росте потребления на 5,6 % и реализации всех «ожидаемых» и «возможных» проектов дефицит металла может возникнуть после 2028 г. Но если часть проектов не будет своевременно введена в эксплуатацию (например, из-за неблагоприятного уровня цен на основные компоненты осваиваемых месторождений – медь и никель), тогда трудности с обеспечением промышленности кобальтом могут возникнуть раньше. При среднегодовых темпах роста потребления кобальта в 7,2 % даже при запуске всех «ожидаемых» и «возможных» проектов дефицит может возникнуть после 2027 г., а при темпах роста в 8,8 % – в 2026 г. В зависимости от сценария роста потребления дефицит металла в 2035 г. может составить от 110 до 320 тыс. т (т. е. он может почти в два раза превысить производство первичного кобальта в указанный год).

Как уже подчёркивалось, развитие кобальтового производства осложняется редкостью собственно кобальтовых месторождений. При этом есть основания полагать, что угроза дефицита может оказаться столь значительной, что освоение новых кобальтсодержащих месторождений будет осуществляться именно ради кобальта, а не меди или никеля. Среди таких месторождений могут быть как уже известные, так и те, которые будут выявлены в ближайшие годы. Ожидания в отношении новых открытий основаны на быстром росте за-

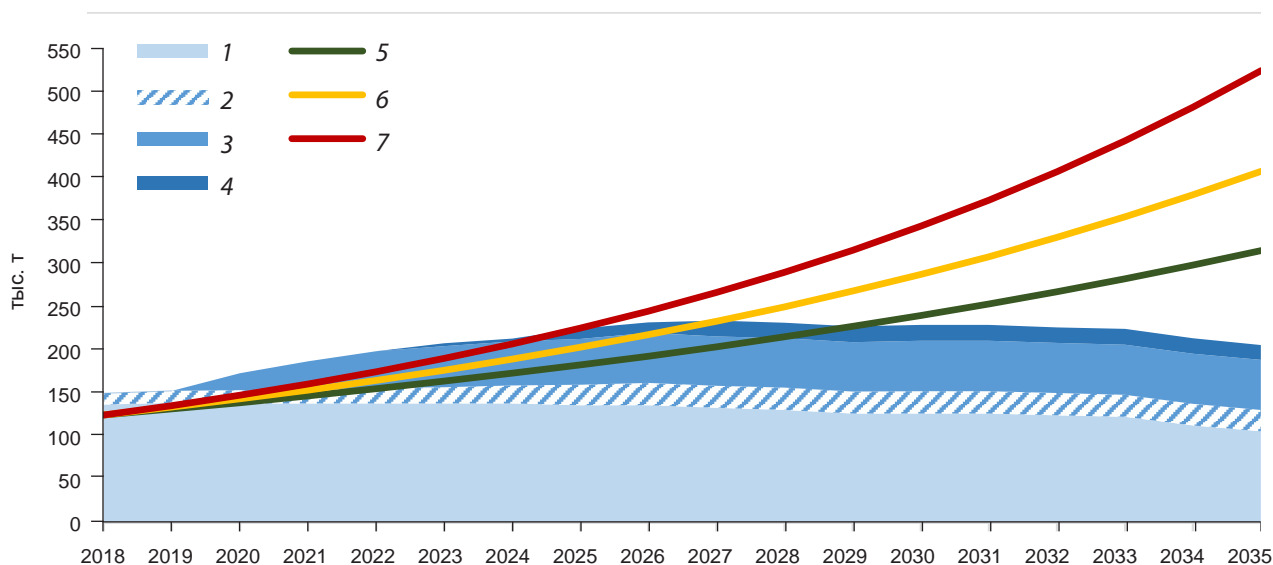


Рис. 3. Возможные сценарии роста производства и потребления кобальта до 2035 г., тыс. т:

1 – действующие рудники; 2 – производство вторичного кобальта; 3 – «ожидаемые» проекты; 4 – «возможные» проекты; сценарии потребления кобальта: 5 – рост на 5,6 % в год, 6 – рост на 7,2 % в год, 7 – рост на 8,8 % в год

Fig. 3. Potential scenarios of cobalt production and consumption growth until 2035, kt:

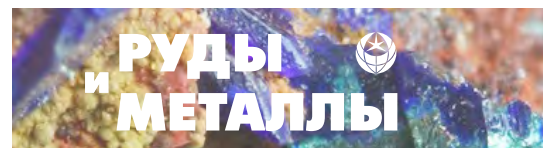
1 – operating mines; 2 – secondary cobalt production; 3 – “expected” projects; 4 – “possible” projects; cobalt consumption scenarios: 5 – 5.6%/year growth, 6 – 7.2%/year growth, 7 – 8.8%/year growth

трат на ГРП на кобальт: так, по данным S&P Global [36], в 2018 г. работы на него вели 95 компаний, инвестировавшие в разведку около 111 млн долл., а годом ранее – 52 компании, затраты которых составили около 36 млн долл. Следует также иметь в виду, что в настоящее время из-за недостаточной распространённости технологий извлекается только часть металла, заключённого в латеритных рудах; снижение потерь может обеспечить дополнительный прирост производства кобальта.

Итак, при прогнозируемых темпах роста потребления кобальта действующие и проектируемые рудники даже с поддержкой со стороны вторичного производства не смогут удовлетворить потенциальный спрос на металл. При этом опыт предыдущих лет показывает, что среднегодовые темпы роста потребления даже на уровне 8,8 % не являются аномальными и вполне могут быть обеспечены адек-

ватным производством на базе традиционных источников.

Ожидаемое производство кобальта из ЖМК по сравнению с текущим рудничным производством может оказаться значительным: при минимальном уровне оно будет соответствовать примерно 7,5 % показателя, при максимальном – примерно 45 %; в зависимости от сценария, по которому может развиваться потребление, оно также может соответствовать 19–55 % возможного в 2035 г. дефицита (см. табл. 2). Последствия выхода на рынок такого количества «глубоководного» металла будут зависеть от реальной ситуации на рынке. Как показано выше, не исключено, что размеры дефицита почти вдвое превысят объёмы возможного наземного производства. Тогда без кобальта из ЖМК решить проблему недостаточности металла будет невозможно. Однако это не означает, что наземные продуценты не



испытают негативных для себя последствий, о чём мы уже говорили применительно к ситуации с никелем.

Марганец. Главным фактором, определяющим уровень мирового потребления марганца как в настоящем, так и в будущем является состояние и динамика развития чёрной металлургии, которые, в свою очередь, контролируются ситуацией в таких отраслях экономики, как жилищное строительство, строительство инфраструктурных сооружений, автомобилестроение и целого ряда других. В то же время в течение следующего десятилетия ожидается быстрый рост спроса на марганец со стороны производителей аккумуляторных батарей, в том числе некоторых литий-ионных. Однако мнения о масштабах этого направления спроса расходятся. Если агентство Bloomberg [11] полагает, что к 2030 г. он достигнет примерно 0,2 млн т металла (такие объёмы значительного влияния на мировой рынок марганца не окажут в силу относительной незначительности), то у компаний Cairn ERA и CPM более оптимистичные ожидания, согласно которым потребление марганца в батареях в 2030 г. достигнет 500 тыс. т, а в 2040 г. – 1 млн т [26] (это уже достаточно большие объёмы для влияния на рыночный баланс).

Долгосрочные или среднесрочные прогнозы в отношении потребления марганца в открытом доступе практически отсутствуют, поэтому мы были вынуждены опираться на оценки перспектив потребления стали. Многие из них предполагают рост этого показателя на 1–3 % в год [7, 21, 25, 34, 37]. В то же время ряд экспертов ожидает его снижение, которое может начаться после 2030 г. или даже в более ранние сроки [25, 33, 35]; в качестве причин такой динамики называются реализация программ по снижению выбросов парниковых газов и ресурсосбережению, снижение спроса со стороны промышленности Китая (прежде всего, строительной индустрии) и даже цикличность развития мировой экономики.

В рамках своего исследования мы рассматривали только сценарии, предусматривающие положительную динамику мирового потребления марганца (рис. 4):

1. Подразумевает рост на 1 % в год. Условием его реализации прежде всего выступает стабилизация спроса на сталь и её производства в Китае [21]. Дополнительным фактором, влияющим на сокращение потребностей в марганцевых рудах, станет расширение в Китае выплавки электростали, сырьём для которой является стальной лом, уже содержащий марганец. Если учесть, что Китай с начала 2000-х годов вошёл в число крупных производителей и потребителей стали, а срок службы стальной продукции составляет 25–40 лет, то в ближайшие 10 лет в стране появятся значительные количества собственного лома, что, с одной стороны, обеспечит электропечи большим (и нарастающим со временем) количеством сырья на длительную перспективу, а с другой – снизит объём потребления марганца при том, что уровень выплавки стали может оставаться стабильным или даже расти [15, 17]. Следует отметить, что этот фактор – универсальный и будет действовать при любом сценарии развития потребления марганца;

2. Подразумевает рост потребления на 2 % в год, что примерно соответствует среднегодовому приросту потребления марганцевых руд в мире в 2011–2018 гг.;

3. Подразумевает рост потребления на 3 % в год, что соответствует среднегодовым темпам роста выплавки стали в мире в 2011–2018 гг.

Согласно проведённому нами анализу, производство марганцевых руд на действующих рудниках за счёт расширения их мощностей к середине 2020-х годов может увеличиться примерно на 20 %. В дальнейшем на протяжении всего рассматриваемого нами периода оно будет практически неизменным (см. рис. 4). Первые из рассматриваемых «ожидаемых» и «возможных» проектов могут войти в эксплуатацию в самое ближайшее время, а к 2035 г. их совокупная производительность может составить примерно 2,3 и 5 млн т руды в год соответственно. В результате в 2035 г. при успешной реализации всех проектов по расширению действующих производств и по созданию новых годовая производительность по добыче марганцевых руд может достичь 82 млн т в год, что на треть превысит текущий

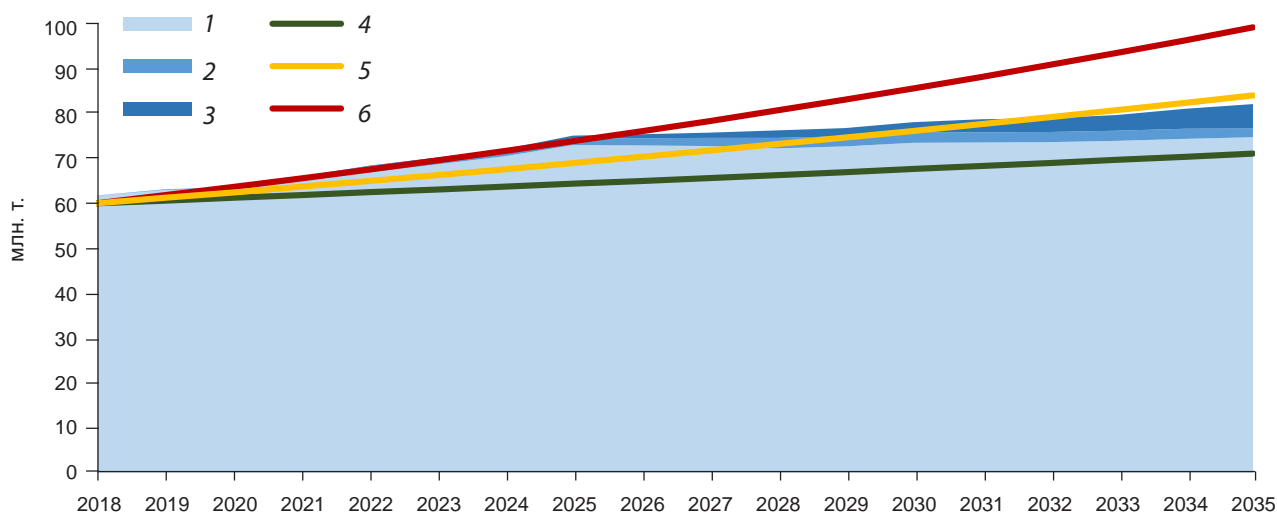


Рис. 4. Возможные сценарии роста производства и потребления марганцевых руд до 2035 г., млн т:

1 – действующие рудники; 2 – «ожидаемые» проекты; 3 – «возможные» проекты; сценарии потребления марганца: 4 – рост на 1 % в год, 5 – рост на 2 % в год, 6 – рост на 3 % в год

Fig. 4. Potential scenarios of manganese ore production and consumption growth until 2035, Mt:

1 – operating mines; 2 – “expected” projects; 3 – “possible” projects; manganese consumption scenarios: 4 – 1%/year growth, 5 – 2%/year growth, 6 – 3%/year growth

уровень. При этом следует отметить, что интенсивные ГРР на марганец ведёт Китай: только за 2016–2017 гг. его запасы и ресурсы марганцевых руд выросли на 454 млн т [8], а в последующие годы было открыто ещё несколько объектов, обеспечивших прирост запасов на 660 млн т [32]. Можно ожидать, что хотя бы некоторые из открытых объектов будут введены в эксплуатацию в рассматриваемый период, что существенно увеличит ожидаемое производство марганцевых руд.

Если среднегодовые темпы роста потребления марганца будут находиться на уровне 1 %, спрос на него будет полностью удовлетворён действующими предприятиями. Причём объёмы производства марганцевых руд могут значительно превысить уровень потребления (особенно это касается периода между 2023 и 2031 г.), что, с одной стороны, неминуемо снизит цены, а с другой, – приведёт к увеличению складских запасов руды, как уже было в прошлом. Рыночный профицит и низкие цены вы-

нудят производителей марганцевых руд сокращать их выпуск, а мелкие рудники, наиболее чувствительные к рыночным колебаниям, приостановят работу. Также будет заморожено большинство проектов освоения и свёрнуто проведение ГРР, особенно на площадях с минерализацией низкого качества.

Если среднегодовые темпы роста потребления марганца составят 2 %, то действующие рудники смогут обеспечить их вплоть до 2027–2028 гг. В последующие годы может возникнуть нехватка сырья, однако до 2031–2032 гг. её могут компенсировать «ожидаемые» и «возможные» проекты. Недостаток руды, который может возникнуть в дальнейшем, могут компенсировать складские запасы, накопленные в годы профицита; по ожиданиям, он будет сохраняться до 2030–2031 гг., а в 2023–2027 гг. составит от 4 до 6 млн т руды в год. В целом можно говорить о том, что при росте спроса на марганцевые руды на уровне 2 % в год рынок также не будет испытывать дефицита.



Если среднегодовые темпы роста потребления марганцевых руд будут находиться на уровне 3 %, то уже с 2020 г. возможна существенная нехватка продукции, поступающей с ныне действующих рудников, но её могут компенсировать реализуемые проекты. Однако с 2026 г. формирование дефицита возможно даже при условии реализации всех планов; в 2035 г. он может составить 17 млн т руды или около 5,5 млн т металла². Это станет стимулом для роста цен и активизации процесса вовлечения в освоение новых месторождений, а также расширения ГРР, нацеленных, прежде всего, на выявление новых месторождений марганцевых руд высокого качества. В настоящее время уже увеличились объёмы проведения ГРР на высокосортные руды в Индонезии и Бразилии, на низкосортные – в Китае и Австралии. Начало эксплуатации новых объектов в рассматриваемый период может ликвидировать потенциальную нехватку сырья.

Итак, только при росте потребления марганцевых руд на уровне до 2 % в год на протяжении всего рассматриваемого периода рынок может сохранять бездефицитность, чему будет содействовать накопление складских запасов в годы профицита. При более высоких темпах роста потребления, если не появятся новые проекты освоения месторождений марганцевых руд, дефицит неизбежен.

Производство марганца из ЖМК может оказаться значительным или даже весьма значительным: при минимальном ожидаемом уровне оно будет соответствовать примерно 7,5 % текущего показателя в пересчёте на металл, а при максимальном – примерно 46 %. Только при росте потребления марганцевых руд более чем на 2 % в год на рынке может появиться ниша, которую может занять «глубоководный» металл. Причём если исходить из роста потребления по максимальному сценарию (+3 % в год), то без критических для рынка последствий глубоководная добыча может вестись с интенсивностью, не превышающей

18 млн т ЖМК в год (см. табл. 2). В противном случае она спровоцирует перепроизводство (при максимальном ожидаемом объёме она превысит дефицит в 1,7 раза) и падение цен на марганец, которое может оказаться столь значительным, что многие традиционные производители прекратят свое функционирование, а проекты ГРР и освоения новых месторождений будут приостановлены. Аналогичный эффект от падения цен на марганец проявится и в отношении ЖМК, добыча которых также может стать нерентабельной и прекратиться по причине, ею же спровоцированной. Учитывая технические сложности глубоководной добычи, можно ожидать, что её себестоимость окажется выше сложившегося уровня цен раньше, чем это произойдёт с наземными производителями.

Однако такие рассуждения требуют важного уточнения. Формально ЖМК представляют собой аналог марганцевых руд низкого качества с содержанием Mn < 30 % (кроме того, они отличаются высоким содержанием фосфора, являющегося для марганцевого сырья вредной примесью). По данным International Manganese Institute (IMnI), в 2014–2018 гг. на долю бедных руд приходилось 14–20 % мирового производства в пересчёте на металл [18], основная часть которого (~ 80 %) приходилась на долю Китая, где из-за специфики сырьевой базы руды со средним содержанием Mn, не превышающим 20 %, являются по сути единственным получаемым видом марганцеворудной продукции [2]. В сравнительно небольших количествах низкокачественные руды также получают в Гане, Индии и некоторых других странах, но, в отличие от Китая, в этих странах добываются руды разных качественных категорий. В глобальном плане объёмы их производства во многом определяются уровнем цен на марганцевую продукцию (ферросплавы и металлический марганец): чем выше цены на неё, тем больше перспектив, что бедные руды будут востребованы потребителями, поскольку экономические показатели их деятельности в значительной степени зависят от качества перерабатываемого сырья. Следует также отметить, что марганцевые руды

² При оценке использовано текущее среднемировое содержание Mn в производимых марганцевых рудах, составляющее около 32–33 % [2].

низкого качества как таковые имеют ограниченное применение: основная их часть используется для получения металлического марганца гидрометаллургическим или электролитическим способами и, в небольшом количестве, силикомарганца [27]. Таким образом, интерес к ЖМК как к марганцевому сырью ограничен и возможен только при уровне цен, превосходящем себестоимость их добычи и переработки, включающей дефосфориацию. В противном случае у них не будет потребителя и их нельзя будет отождествлять с марганцевым сырьём. Соответственно, тогда добыча ЖМК не будет оказывать влияния на рынок марганцевых руд.

Возникающая неопределённость в отношении использования ЖМК в качестве источника марганца может оказаться критической и в отношении заключённых в них меди, никеля и кобальта. Исходя из примерных оценок потенциальной стоимости всех четырёх компонентов, на долю марганца приходится примерно треть [24]; отказ от его извлечения может привести к тому, что добыча и переработка ЖМК становятся в принципе нерентабельными.

Выводы. Итак, у четырёх металлов, источником которых могут выступать ЖМК, разные перспективы потребления и традиционного производства. Причём если для меди, никеля и кобальта есть согласованное мнение экспертов о росте потребления (расхождении только в оценках его темпов), то для марганца, при наличии прогнозов снижения выплавки стали, такой однозначный вывод сделать нельзя.

Как свидетельствуют ретроспективные данные, потребление рассматриваемых метал-

лов будет характеризоваться разными темпами роста: в предыдущие 10 лет для меди они составляли 3,5 % в год, для никеля – более 7 %, для кобальта – 8,7 %, для марганца – 2 %. Как показано выше, для цветных металлов эти показатели соответствуют рассмотренным нами максимальным сценариям, а для марганца – базовому. При сохранении установившихся тенденций на долгосрочную перспективу высока вероятность того, что к 2035 г. на рынках меди, никеля и кобальта сформируется значительный дефицит, но для конкретных металлов его наступление будет происходить в разные сроки. Для марганца при традиционном росте потребления возможность возникновения дефицита в рассматриваемый период сомнительна.

Дисгармоничность формирования рыночного дефицита приведёт к тому, что если начало добычи ЖМК будет совпадать с наиболее ранними его проявлениями (а это может произойти на рынке никеля), то остальные рынки испытают перенасыщение и на них произойдёт снижение цен. Это снижение не только повлечёт за собой негативные последствия для наземных производителей, но и может уменьшить рентабельность самой глубоководной добычи до такого уровня, что она станет экономически нецелесообразной.

Таким образом, если ориентироваться на ведение глубоководной добычи с соблюдением принципов, установленных Конвенцией ООН по морскому праву, её следует начинать только при формировании дефицита на рынках всех компонентов, извлекаемых из ЖМК. А это, согласно нашим оценкам, может произойти не ранее 2030 г.

Список литературы

1. Конвенция ООН по морскому праву / Организация объединённых наций. – URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/pdf/lawsea.pdf (дата обращения: 31.01.2021).
2. Advance Data Release of the 2016 Annual Tables. Manganese // U.S. Geological Survey. 2020. – URL: [https://prd-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/as-](https://prd-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/myb1-2016-manga-adv.xlsx)
3. Al Barazi S. Rohstoffrisikobewertung – Kobalt // DERA Rohstoffinformationen. – Berlin, 2018. – URL: [sets/palladium/production/atoms/files/myb1-2016-manga-adv.xlsx](https://www.deutscherohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen36) (дата обращения: 11.01.2021).



- pdf;jsessionid=5E27543065DB072D00053BC464611B02.2_cid331?__blob=publicationFile&v=2 (дата обращения: 17.01.2021).
4. *Alves D. P., Blagoeva D., Pavel C., Arvanitidis N.* Cobalt: demand-supply balances in the transition to electric mobility // European Commission. Technical Report by the Joint Research Centre. – 2018. – URL: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC112285/jrc112285_cobalt.pdf (дата обращения: 17.01.2021).
 5. *Beyond the Supercycle: How Technology Is Reshaping Resources* / McKinsey Global Institute. – 2017. – URL: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/how-technology-is-reshaping-supply-and-demand-for-natural-resources#> (дата обращения: 11.01.2021).
 6. *Bloomberg News.* There's One Metal Worrying Tesla and EV Battery Suppliers. – 2019. – URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-08-05/there-s-one-metal-worrying-tesla-and-the-ev-battery-supply-chain> (дата обращения: 16.01.2021).
 7. *Chalabyan A., Mori L., Vercammen S.* The current capacity shake-up in steel and how the industry is adapting / McKinsey Global Institute. – 2018. – URL: <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Metals%20and%20Mining/Our%20Insights/The%20current%20capacity%20shake%20up%20in%20steel%20and%20how%20the%20industry%20is%20adapting/The-current-capacity-shake-up-in-steel-and-how-the-industry-is-adapting.ashx> (дата обращения: 17.01.2021).
 8. *China Mineral Resources* / Ministry of Natural Resources PRC. – 2018. – URL: <https://www.gov.cn/xinwen/2018-10/22/5333589/files/01d0517b9d6c430bbb927ea5e48641b4.pdf> (дата обращения: 17.01.2021).
 9. *Copper and Its Electrifying Future* // DBS Group Research. – 2018. – URL: https://www.dbs.com/aics/templatedata/article/generic/data/en/GR/1020-18/181004_insights_copper_and_its_electrifying_future.xml (дата обращения: 02.08.2020).
 10. *Copper. Demand to 2035, 1st Edition.* Copper – The Electric Metal. – Roskill Information Services Ltd, 2019. – URL: www.roskill.com (дата обращения: 05.09.2020).
 11. *Djukanovic G.* Manganese, copper and aluminium: The role of these metals in global battery demand // Battery Materials Europe. – 2019. – URL: <https://www.metalbulletin.com/events/download.ashx/document/speaker/E001854/a011t00000I5R1m-EAF/Presentation> (дата обращения: 17.01.2021).
 12. *Elshkaki A., Graedel T. E., Ciacci L., Reck B. K.* Copper demand, supply, and associated energy use to 2050 // *Global Environmental Change*. – 2016. – V. 39. – P. 305–315. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378016300802> (дата обращения: 23.01.2021).
 13. *Fu X., Beatty D. N., Gaustad G. G. [et al.]* Perspectives on Cobalt Supply through 2030 in the Face of Changing Demand // *Environmental Science and Technology*. – 2020. – V. 54 (5). – P. 2985–2993.
 14. *Heffernan O.* Seabed mining is coming – bringing mineral riches and fears of epic extinctions. – 2019. – URL: <https://www.nature.com/articles/d41586-019-02242-y> (дата обращения: 10.01.2021).
 15. *Hites B. E.* The growth of EAF steelmaking // *Recycling Today*. – 2020. – URL: <https://www.recyclingtoday.com/article/the-growth-of-eaf-steelmaking> (дата обращения: 05.02.2021).
 16. *Horizonte Minerals Plc.* Investor Presentation Q4 2019 Nickel market. – URL: https://horizonteminerals.com/news/en_20191024-investor-presentation.pdf (дата обращения: 16.01.2021).
 17. *Hu T.* Steel sector is key to reducing China's carbon emissions. – S&P Global, 2020. – URL: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/steel-sector-is-key-to-reducing-china-s-carbon-emissions-61634240> (дата обращения: 05.02.2021).
 18. *IMnI Statistics 2019* // International Manganese Institute. – Paris-France, 2020. – URL: https://www.manganese.org/wp-content/uploads/2019/05/IMnI_statistics_2019.pdf (дата обращения: 17.01.2021).
 19. *Independence Group NL.* Austmine 2019. – URL: https://www.igo.com.au/site/PDF/2741_2/Austmine2019Presentation (дата обращения: 16.01.2021).
 20. *Kelly T. D., Matos G. R.* Historical statistics for mineral and material commodities in the United States (2016 version): U.S. Geological Survey Data Series 140. – URL: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/historical-statistics-mineral-and-material-commodities-united-states> (дата обращения: 10.01.2021).
 21. *Kinch D., Rubin R.* Long-term global steel demand growth to be 1 %; China has peaked: worldsteel's Basson // S&P Global. – 2019. – URL: <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/metals/041819-long-term-global-steel-demand-growth-to-be-1-china-has-peaked-worldsteels-basson> (дата обращения: 17.01.2021).

22. Kirchain R., Field F. R., Roth R. Financial Regimes for Polymetallic Nodule Mining: A Comparison of Four Economic Models // International Seabed Authority. – 2019. – URL: <https://ran-s3.s3.amazonaws.com/isa.org.jm/s3fs-public/files/documents/mit.pdf> (дата обращения: 10.01.2021).
23. Kirchain R., Roth R., Field F. R., Muñoz-Royo C., Peacock T. Development of an Economic Model and System of Payments for the Exploitation of Polymetallic Nodules in the Area. Report to the International Seabed Authority // International Seabed Authority. – 2019. – URL: <https://ran-s3.s3.amazonaws.com/isa.org.jm/s3fs-public/files/documents/paysysmodel-3jun.pdf> (дата обращения: 10.01.2021).
24. Lapteva A., Chernova A., Khodina M., Mustafa T., Mustafina F., Smolnikova A. Study of the Potential Impact of Polymetallic Nodules Production from the Area on the Economies of Developing Land-based Producers of those Metals which are Likely to be Most Seriously Affected. Report to the International Seabed Authority // International Seabed Authority. – 2020. – URL: <https://www.isa.org.jm/files/documents/impactstudy.pdf> (дата обращения: 10.01.2021).
25. Lichtenstein J. Steeling for disruption: Global steel producers must reinvent themselves as demand growth disappears // Accenture. – 2017. – URL: https://www.accenture.com/_acnmedia/PDF-40/Accenture-WEF-Steeling-For-Disruption. (дата обращения: 17.01.2021).
26. Manganese // Euro Manganese Inc. – 2019. – URL: <https://www.mn25.ca/manganese> (дата обращения: 17.01.2021).
27. Manganese: Outlook to 2029, 15th edition. – Roskill Information Services Ltd, 2019. – URL: www.roskill.com (дата обращения: 05.02.2021).
28. Mineral Commodity Summaries 2020 // U.S. Geological Survey. – Reston, Virginia, 2020. – URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf> (дата обращения: 11.01.2021).
29. Mudd G. M., Jowitt S. M. A Detailed Assessment of Global Nickel Resource Trends and Endowments // Economic Geology. – 2014. – V. 109. – P. 1813–1841.
30. PR Newswire. 2019 exploration budget recovery falters due to difficult market conditions and high-profile M&A activity. 15.10.2019. – URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/2019-exploration-budget-recovery-falters-due-to-difficult-market-conditions-and-high-profile-ma-activity-300938552.html> (дата обращения: 17.01.2021).
31. Schipper B. W., Lin H.-C., Meloni M. A., Wansleben K., Heijungs R., van der Voet E. Estimating global copper demand until 2100 with regression and stock dynamics // Resources, Conservation & Recycling. – 2018. – V. 132. – P. 28–36. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344918300041> (дата обращения: 23.01.2021).
32. SMM News. China's 1st large manganese-rich mine uncovered in Guizhou, 19.06.2019. – URL: <https://news.metal.com/newscontent/100939677/Report:-China%27s-1st-large-manganese-rich-mine-uncovered-in-Guizhou/> (дата обращения: 23.01.2021).
33. Steel and iron ore outlook // Wood Mackenzie. – 2019. – URL: http://portaldamineracao.com.br/wp-content/uploads/2019/04/steel-and-io-outlook_wmc_april-2019.pdf (дата обращения: 17.01.2021).
34. Steel Demand Beyond 2030. Forecast Scenarios // OECD. – 2017. – URL: https://www.oecd.org/industry/ind/Item_4b_Accenture_Timothy_van_Audenaerde.pdf (дата обращения: 17.01.2021).
35. The Inevitable Policy Response: Forecast Policy Scenario // The Inevitable Policy Response. – 2019. – URL: <https://www.unpri.org/download?ac=9835> (дата обращения: 17.01.2021).
36. World Exploration Trends 2018 // S&P Global PDAC Special Edition. – 2019. – URL: http://www.egcsouthafrica.com/wp-content/uploads/2018/07/20190425_2018-World-Exploration-Trends.pdf (дата обращения: 17.01.2021).
37. World steel associated. Contribution to MJunction. – 2019. – URL: http://www.indiansteelmarkets.com/presentations/Session1/4.0%20Edwin%20Basson_WSA.pptx (дата обращения: 17.01.2021).

References

1. Konventsiya OON po morskomu pravu [UN Convention on the Law of the Sea], Organization of the United Nations], available at: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/pdf/lawsea.pdf (Accessed: 31.01.2021).
2. Advance Data Release of the 2016 Annual Tables. Manganese, U.S. Geological Survey, 2020, available at: <https://prd-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/myb1-2016-manga-adv.xlsx> (Accessed: 11.01.2021).



3. Al Barazi S. Rohstoffrisikobewertung – Kobalt, DERA Rohstoffinformationen, Berlin, 2018, available at: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-36.pdf;jsessionid=5E27543065DB072D00053BC464611B02.2_cid331?__blob=publicationFile&v=2 (Accessed: 17.01.2021).
4. Alves D. P., Blagoeva D., Pavel C., Arvanitidis N. Cobalt: demand-supply balances in the transition to electric mobility, European Commission. Technical Report by the Joint Research Centre, 2018, available at: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC112285/jrc112285_cobalt.pdf (Accessed: 17.01.2021).
5. Beyond the Supercycle: How Technology Is Reshaping Resources, McKinsey Global Institute, 2017, available at: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/how-technology-is-reshaping-supply-and-demand-for-natural-resources#> (Accessed: 11.01.2021).
6. Bloomberg. News. There's One Metal Worrying Tesla and EV Battery Suppliers. 05.08.2019, available at: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-08-05/there-s-one-metal-worrying-tesla-and-the-ev-battery-supply-chain> (Accessed: 16.01.2021).
7. Chalabyan A., Mori L., Vercammen S. The current capacity shake-up in steel and how the industry is adapting, McKensley&Company, 2018, available at: <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Metals%20and%20Mining/Our%20Insights/The%20current%20capacity%20shake%20up%20in%20steel%20and%20how%20the%20industry%20is%20adapting/The-current-capacity-shake-up-in-steel-and-how-the-industry-is-adapting.ashx> (Accessed: 17.01.2021).
8. China Mineral Resources 2018, Ministry of Natural Resources PRC, 2018, available at: <https://www.gov.cn/xinwen/2018-10/22/5333589/files/01d0517b9d6c430bbb927ea5e48641b4.pdf> (Accessed: 17.01.2021).
9. Copper and Its Electrifying Future, DBS Group Research, 2018, available at: https://www.dbs.com/aics/templatedata/article/generic/data/en/GR/102018/181004_insights_copper_and_its_electrifying_future.xml (Accessed: 02.08.2020).
10. Copper. Demand to 2035, 1st Edition. Copper – The Electric Metal, Roskill Information Services Ltd, 2019, available at: www.roskill.com (Accessed: 05.09.2020).
11. Djukanovic G. Manganese, copper and aluminium: The role of these metals in global battery demand, Battery Materials Europe, 2019, available at: <https://www.metalbulletin.com/events/download.ashx/document/speaker/E001854/a011t00000-15R1mEAF/Presentation> (Accessed: 17.01.2021).
12. Elshkaki A., Graedel T. E., Ciacci L., Reck B. K. Copper demand, supply, and associated energy use to 2050, Global Environmental Change, 2016, V. 39, pp. 305–315, available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378016300802> (Accessed: 23.01.2021).
13. Fu X., Beatty D. N., Gaustad G. G. [et al.] Perspectives on Cobalt Supply through 2030 in the Face of Changing Demand, Environmental Science and Technology, 2020, V. 54 (5), pp. 2985–2993.
14. Heffernan O. Seabed mining is coming – bringing mineral riches and fears of epic extinctions, 2019, available at: <https://www.nature.com/articles/d41586-019-02242-y> (Accessed: 10.01.2021).
15. Hites B. E. The growth of EAF steelmaking, Recycling Today, 2020, available at: <https://www.recyclingtoday.com/article/the-growth-of-eaf-steelmaking> (Accessed: 05.02.2021).
16. Horizonte Minerals Plc. Investor Presentation Q4 2019 Nickel market, available at: https://horizonteminerals.com/news/en_20191024-investor-presentation.pdf (Accessed: 16.01.2021).
17. Hu T. Steel sector is key to reducing China's carbon emissions, S&P Global, 2020, available at: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/steel-sector-is-key-to-reducing-china-s-carbon-emissions-61634240> (Accessed: 05.02.2021).
18. IMnI Statistics 2019, International Manganese Institute, Paris, France, 2020, available at: https://www.manganese.org/wp-content/uploads/2019/05/IMnI_statistics_2019.pdf (Accessed: 17.01.2021).
19. Independence Group NL, Austmine 2019, available at: https://www.igo.com.au/site/PDF/2741_2/Austmine2019Presentation (Accessed: 16.01.2021).
20. Kelly T. D., Matos G. R., 2014, Historical statistics for mineral and material commodities in the United States (2016 version): U.S. Geological Survey Data Series 140, available at: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/historical-statistics-mineral-and-material-commodities-united-states> (Accessed: 10.01.2021).
21. Kinch D., Rubin R. Long-term global steel demand growth to be 1 %; China has peaked: worldsteel's Basson, S&P Global, 2019, available at: <https://www.>

- spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/metals/041819-long-term-global-steel-demand-growth-to-be-1-china-has-peaked-worldsteels-basson (Accessed: 17.01.2021).
22. Kirchain R., Field F. R., Roth R. Financial Regimes for Polymetallic Nodule Mining: A Comparison of Four Economic Models, International Seabed Authority, 2019, available at: <https://ran-s3.s3.amazonaws.com/isa.org/jm/s3fs-public/files/documents/mit.pdf> (Accessed: 10.01.2021).
 23. Kirchain R., Roth R., Field F. R., Muñoz-Royo C., Peacock T. Development of an Economic Model and System of Payments for the Exploitation of Polymetallic Nodules in the Area. Report to the International Seabed Authority, International Seabed Authority, 2019, available at: <https://ran-s3.s3.amazonaws.com/isa.org/jm/s3fs-public/files/documents/paysysmodel-3jun.pdf> (Accessed: 10.01.2021).
 24. Lapteva A., Chernova A., Khodina M., Mustafa T., Mustafina F., Smolnikova A. Study of the Potential Impact of Polymetallic Nodules Production from the Area on the Economies of Developing Land-based Producers of those Metals which are Likely to be Most Seriously Affected. Report to the International Seabed Authority, International Seabed Authority, 2020, available at: <https://www.isa.org/jm/files/documents/impactstudy.pdf> (Accessed: 10.01.2021).
 25. Lichtenstein J. Steeling for disruption: Global steel producers must reinvent themselves as demand growth disappears, Acenture, 2017, available at: https://www.accenture.com/_acnmedia/PDF-40/Acenture-WEF-Steeling-For-Disruption. (Accessed: 17.01.2021).
 26. Manganese, Euro Manganese Inc., 2019, available at: <https://www.mn25.ca/manganese> (Accessed: 17.01.2021).
 27. Manganese: Outlook to 2029, 15th edition, Roskill Information Services Ltd., 2019, available at: www.roskill.com (Accessed: 05.02.2021).
 28. Mineral Commodity Summaries 2020, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2020, available at: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs-2020.pdf> (Accessed: 11.01.2021).
 29. Mudd G. M., Jowitt S. M. A Detailed Assessment of Global Nickel Resource Trends and Endowments, Economic Geology, 2014, V. 109, pp. 1813–1841.
 30. PR Newswire. 2019 exploration budget recovery falters due to difficult market conditions and high-profile M&A activity. 15.10.2019, available at: <https://www.prnewswire.com/news-releases/2019-exploration-budget-recovery-falters-due-to-difficult-market-conditions-and-high-profile-ma-activity-300938552.html> (Accessed: 17.01.2021).
 31. Schipper B. W., Lin H.-C., Meloni M. A., Wansleben K., Heijungs R., van der Voet E. Estimating global copper demand until 2100 with regression and stock dynamics, Resources, Conservation & Recycling, 2018, V. 132, pp. 28–36, available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344918300041> (Accessed: 23.01.2021).
 32. SMM News. China's 1st large manganese-rich mine uncovered in Guizhou, 19.06.2019, available at: <https://news.metal.com/newscontent/100939677/Report:-China%27s-1st-large-manganese-rich-mine-uncovered-in-Guizhou/> (Accessed: 23.01.2021).
 33. Steel and iron ore outlook, Wood Mackenzie, 2019, available at: http://portaldaminerao.com.br/wp-content/uploads/2019/04/steel-and-io-outlook_wmc_april-2019.pdf (Accessed: 17.01.2021).
 34. Steel Demand Beyond 2030. Forecast Scenarios, OECD, 2017, available at: https://www.oecd.org/industry/ind/Item_4b_Accenture_Timothy_van_Audenaerde.pdf (Accessed: 17.01.2021).
 35. The Inevitable Policy Response: Forecast Policy Scenario, The Inevitable Policy Response, 2019, available at: <https://www.unpri.org/download?ac=9835> (Accessed: 17.01.2021).
 36. World Exploration Trends 2018, S&P Global PDAC Special Edition, 2019, available at: http://www.egcsouthafrica.com/wp-content/uploads/2018/07/20190425_2018-World-Exploration-Trends.pdf (Accessed: 17.01.2021).
 37. World steel associated. Contribution to MJunction, 2019, available at: http://www.indiansteelmarts.com/presentations/Session1/4.0%20Edwin%20Basson_WSA.pptx (Accessed: 17.01.2021).



Авторы

Лаптева Анна Михайловна

кандидат геолого-минералогических наук
доцент, заведующий сектором металлических ПИ
отдела анализа минерально-сырьевого комплекса
lapteva@vims-geo.ru

Мустафа Татьяна Сергеевна

ведущий специалист сектора металлических ПИ
отдела анализа минерально-сырьевого комплекса
mustafa@vims-geo.ru

Смольникова Анастасия Владимировна

главный специалист сектора металлических ПИ
отдела анализа минерально-сырьевого комплекса
anastasiyaakimova@ya.ru

Чернова Александра Дмитриевна

заведующий отделом анализа
минерально-сырьевого комплекса
chernova@vims-geo.ru

ФГБУ Всероссийский научно-исследовательский институт
минерального сырья им. Н. М. Федоровского, г. Москва

Authors

Lapteva Anna Mikhailovna

PhD, Associate professor
Head of metallic minerals sector
of mineral complex analysis department
lapteva@vims-geo.ru

Mustafa Tatiana Sergeevna

leading specialist of metallic minerals sector
of mineral complex analysis department
mustafa@vims-geo.ru

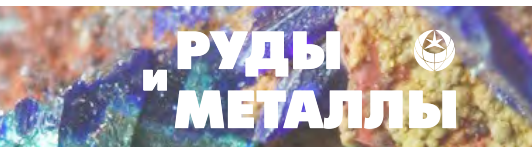
Smolnikova Anastasia Vladimirovna

chief specialist of metallic minerals sector
of mineral complex analysis department
anastasiyaakimova@ya.ru

Chernova Aleksandra Dmitrievna

Head of mineral complex
analysis department
chernova@vims-geo.ru

FSBI Russian Research Institute
of Mineral Materials, Moscow, Russia



Опыт разработки и применения интеллектуально-графических компьютерных систем

Experience in developing and using intelligent graphical computer systems

Кузнецов В. В., Чижова И. А.

Kuznetsov V. V., Chizhova I. A.

В статье рассматриваются концептуальные, методологические и практические аспекты построения информационно-аналитических систем, в том числе систем прогноза и оценки, основывающихся на искусственном интеллекте и использовании баз знаний, а также реализация этих принципов в исследовательском варианте разработанной интеллектуально-графической системы на основе параметрических моделей месторождений и рудных полей Рудноалтайской минерагенической зоны, использованной для оценки перспективности рудных полей Змеиногорского рудного района.

Ключевые слова: интеллектуальная система, база знаний, банк данных, прогнозно-поисковые модели.

The article discusses the conceptual, methodological and practical aspects of building information and analytical systems, including forecasting and evaluation systems based on artificial intelligence and the use of knowledge bases, as well as the implementation of these principles in the research version of the developed intellectual and graphical system based on parametric models of deposits and ore fields of the Rudno-Altai mineragenic zone, used to assess the prospects of ore fields of the Zmeinogorsky ore district.

Keywords: intelligent system, knowledge base, data bank, predictive search models.

Для цитирования: Кузнецов В. В., Чижова И. А. Опыт разработки и применения интеллектуально-графических компьютерных систем. Руды и металлы 2021. № 1. С. 26–41. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10002.

For citation: Kuznetsov V. V., Chizhova I. A. Experience in developing and using intelligent graphical computer systems. Ores and metals, 2021, № 1, pp. 26–41. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10002.



История создания интеллектуальных систем берёт свое начало с 60-х годов прошлого столетия. Тогда Эдвард Фейгенбаум, исследователь в области искусственного интеллекта, как и многие учёные его времени, задумывался над тем, может ли машина думать и рассуждать подобно человеку и как много знаний в неё возможно вложить [5]. Собравшаяся команда единомышленников (Эдвард Фейгенбаум, Джошуа Ледерберг и примкнувший к ним Брюс Бученен) в стенах Стенфордского университета в 1965 г. начала работы по созданию первой экспертной системы. Бученен предложил хороший инструмент для создания экспертных систем, отделив механизм логического вывода от базы знаний. Он позволил разработать ряд прикладных экспертных систем. Первой системой в области геологии была система PROSPECTOR, которая разрабатывалась Центром искусственного интеллекта SRI International для Геологической службы США с 1974 по 1983 г. PROSPECTOR предназначена для поиска месторождений полезных ископаемых. В 1984 г. система точно предсказала существование месторождения молибдена, оценённого в многомиллионную сумму [2].

В дальнейшем при создании экспертных систем были учтены особенности и недостатки систем, разработанных ранее. В искусственном интеллекте обозначилось такое направление, как инженерия знаний, отвечающая за поиски передовых методов в сборе, представлении, хранении и преумножении информации.

Современные информационно-аналитические системы, в том числе системы прогноза и оценки, основывающиеся на искусственном интеллекте, базируются на совокупности постулатов, которую принято называть базой знаний интеллектуальной системы. База знаний черпает информацию из банка данных. Отсюда становится совершенно ясно, что основой технологии функционирования и успешного применения прогнозных комплексов компьютерных интеллектуальных систем является достоверная, определённым образом структурированная геоинформация из различных отраслей геологических знаний (собственно геологических, минералого-геохимических, геофизических и др.).

Интеллектуальная система – это программная система, имитирующая на компьютере мышление человека. Интеллектуально-графическая система (ИГС) – это система для решения прогнозных, поисковых и других задач с использованием техники рассуждений эксперта при анализе текстовой, числовой и графической информации об объекте исследования. Согласно современной типизации искусственного интеллекта по степени развития она относится к расширенному типу, поскольку направлена на поддержку человеческого мышления в процессе решения прогнозных и поисковых задач [1].

Методы искусственного интеллекта предполагают простой структурный подход к разработке сложных программных систем принятия решений. Кроме того, они предполагают высокую степень независимости отдельных частей программы, каждая из которых реализует определённый шаг решения одной или нескольких задач. При проектировании системы искусственного интеллекта прежде всего нужно определить цели, для достижения которых она предназначена. В первую очередь следует установить, к какому классу относится решаемая задача, и уметь описать её в нужных терминах.

Программная среда должна иметь все элементы, составляющие процесс принятия решения человеком: цели, факты, правила, механизмы вывода и упрощения.

Под технологией разработки ИГС понимается комплекс инструментальных средств и методик, обеспечивающих разработку надёжных систем для решения практических задач. Хотя ИГС и является программным продуктом, технология её разработки в силу специфики решаемых с её помощью задач (как правило, плохо формализованных) имеет свои особенности. Главное расхождение состоит в том, что обычные программы в начале технологического цикла разработки имеют чёткий жёсткий алгоритм получения конечного результата работы программы, который мало меняется на протяжении всего жизненного цикла системы.

Интеллектуальные системы, основанные на знаниях, напротив, такого алгоритма не имеют ни в начале, ни в конце жизненного цикла; при выбранной системе рассуждений резуль-

тат работы может и должен меняться на протяжении всего периода её существования.

Знания – это новый вид информации, который используют интеллектуальные системы, в отличие от традиционных. База знаний – организованная совокупность знаний, представленная в форме, которая допускает автоматическое или автоматизированное использование этих знаний с помощью ЭВМ. Выбирая нужную информацию, человеческий мозг подключает только относящиеся к делу факты, не перебирая все доступные ему знания. В системах искусственного интеллекта обязательно присутствует механизм упрощения для отбора знаний, необходимых в конкретной системе.

Часть интеллекта, которая помогает извлекать новые факты, называется механизмом вывода. Именно механизм вывода позволяет человеку учиться на опыте, так как он даёт возможность генерировать новые факты из уже существующих, применяя имеющиеся знания к новым ситуациям.

Знания предметной области – это совокупность специфических для данной системы фактов, целей и правил, необходимых системе знаний для решения поставленных задач. Знания включают в себя также понятия, свойства и отношения, составляющие эти факты, цели и правила.

Поскольку представление знаний является средством описания знаний человека, то желательно, чтобы его описательные возможности были как можно выше; с другой стороны, если форма представления знаний становится излишне сложной, то усложняются и механизмы упрощения выводов, при этом не только затрудняется проектирование интеллектуальной системы, но и возникает опасность потери достоверности выполнения её действий. В конечном итоге проектирование представления знаний предусматривает выработку всех этих условий, а затем и выбора решения на основе компромисса между ними.

Опыт разработки экспертных систем показал, что наилучшим образом поставленным целям отвечают модели решающих правил. Они могут быть построены как на основе знаний экспертов, так и в результате математической об-

работки имеющейся базы данных по эталонным объектам (эвристические и расчётно-логические правила).

Технологии проектирования различаются по типу инструментальных средств, которые в них используются, а именно: типы представления знаний, формирования решений, технических средств, средств обучения, редактирования (базы знаний и базы данных), представления результатов и т. д.

Исследовательский вариант интеллектуальной системы может содержать большое количество различных интересных для пользователя средств, которые увеличивают стоимость системы; допускается неполный перечень средств, необходимых для целой технологии и системы.

Для описания выбранной технологии следует перечислить все компоненты системы и описать способы их построения и взаимосвязи. При построении интеллектуальных систем необходимо иметь структурную схему системы, чёткую процедуру формирования базы знаний, механизм принятия решений, обеспечивающий получение результата за приемлемое для пользователя время, удобный режим пользования системой, результат, представленный в привычной для пользователя форме.

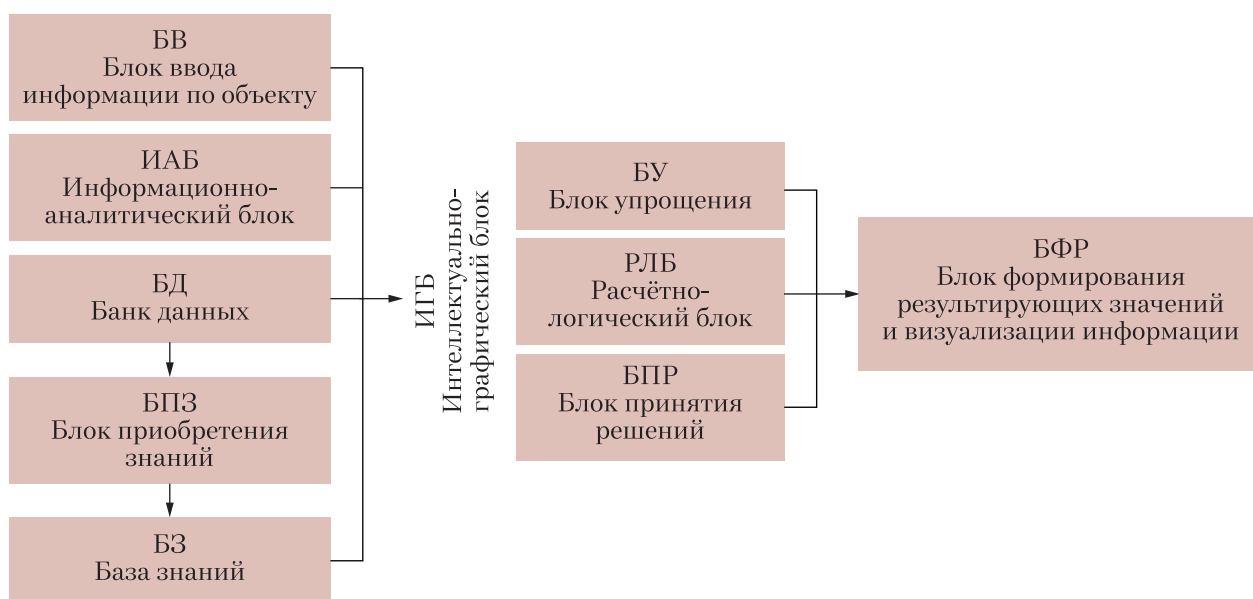
Структурная схема разработанной интеллектуально-графической системы представлена на рисунке. Система состоит из трёх основных взаимосвязанных блоков:

Блок 1 – информационно-аналитический (ИАБ) – на основе ГИС-технологии (в графической форме) обеспечивает визуализацию исходной информации по целевым параметрам из базы данных;

Блок 2 – интеллектуально-графический (ИГБ) – на основе технологии искусственного интеллекта обеспечивает построение базы знаний и работу системы принятия решений;

Блок 3 – является блоком формирования результатов (БФР) и оценки их достоверности и обеспечивает на основе ГИС-технологии визуализацию полученных заключений.

Сердцем всей системы является база знаний (БЗ), разработанная на картографической и фактографической информации по эталонным объектам различных металлогенических ран-



Структурная схема интеллектуально-графической системы

Structural scheme of intelligent graphical system (IGS)

гов (в зависимости от поставленной перед системой задачи). Основная компонента базы знаний – банк данных (БД), сформированный по данным параметрических моделей месторождений. База знаний строится не только на основе знаний экспертов, но и включает закономерности, получаемые на основе математического анализа имеющегося банка данных. Для этого имеется блок приобретения знаний (БПЗ), который содержит программные модули по статистической и логико-информационной обработке информации и классификации объектов.

Интеллектуально-графический блок включает в себя три подблока: блок упрощения (БУ) – для отбора тех знаний из БЗ, которые необходимы для решения поставленной задачи; расчётно-логический блок (РЛБ) – содержит программные модули для расчёта весовых функций объектов и вспомогательных параметров; блок принятия решений (БПР) – содержит программные модули многовариантного обсчёта по заложенным правилам многокритериального выбора.

Работа системы начинается с представления пользователю информации по распределению

прогнозных ресурсов, запасов, добычи и т. д. в изучаемом районе в пределах рудных районов, полей, месторождений, рудопроявлений и т. п., что позволяет наметить оптимальные площади для прогноза, поисков и оценки.

После их выбора пользователь и система вступают в диалог, причём этот режим предусматривает анализ и оценку как графического, так и фактографического материала. Важнейшими здесь являются интеллектуальные возможности системы, заключающиеся в ведении гибкого диалога, то есть система выбирает следующий вопрос на основании анализа предыдущих ответов; в случае достаточности информации по объекту для принятия решения опрос прекращается.

Характер и форма диалога интеллектуальной системы с пользователем определяется той базой знаний, которая была в неё заложена при проектировании. После каждого ответа проводится анализ полученных данных, и интеллектуальный блок формирует образ объекта. Каждый последующий вопрос следует только после ответа на предыдущий. Предусмотрена возможность возврата к ранее данным ответам с

их корректировкой, при этом машина выносит окончательные решения только после полного окончания сеанса.

Работа системы ориентирована на три типа заключений:

1. Заключение об ожидаемом формационном (минеральном) типе оруденения;
2. Опознание элементов рудного или околорудного пространства, к которому следует отнести объект оценки;
3. Заключение о масштабе прогнозируемого оруденения с приведением конкретных цифр прогнозных ресурсов.

Исследовательский вариант ИГС построен на основе параметрических моделей месторождений и рудных полей Рудноалтайской минералогической зоны. В серии различных видов моделей рудных месторождений (геолого-поисковых, морфометрических, градиентно-векторных и др.), нацеленных главным образом на решение прикладных задач, геолого-поисковые модели занимают определённое место: они формируются в целях оптимизации поисковых и поисково-оценочных работ, в том числе на ранних стадиях их проведения, когда опосредованное геологическое пространство вскрывается, изучается и оценивается по единичным пересечениям. Кроме того, параметрические модели могут быть использованы при формировании геолого-генетических количественных моделей месторождений.

Параметрические модели представляют собой геолого-поисковые модели, в которых геологическое пространство, заключающее месторождение, охарактеризовано системой соподчинённых элементов, признаков и критериев, получивших применительно к различным частям пространства количественные (параметрические) оценки.

При построении параметрических моделей принято деление околорудного и рудного пространств на следующие части или зоны: собственно рудоносную (РМ), рудоносную фланговую (РФ), собственно надрудную (НРМ), надрудную фланговую (НРФ), надрудную периферийную (НРП), собственно подрудную (ПРМ), подрудную фланговую (ПРФ) и подрудную периферийную (ПРП). В целях формирования ба-

зы знаний интеллектуальной системы данная схема была несколько упрощена. Надрудные и подрудные пространства рассматривались как единое целое без расчленения на собственно над- и подрудную и фланговые части.

Зоны геологического пространства описаны системой факторов и признаков, в число которых, как следует из генетических построений и опыта прогноза и поисков месторождений колчеданного семейства, включены стратиграфо-литолого-фациальные, магматические, структурные (в первую очередь, конседиментационные и синвулканические), а также показатели, характеризующие состав, морфологию, зональность и интенсивность гидротермально-метасоматических изменений; морфологию, состав и положение рудных тел в структурах месторождений и разрезах рудовмещающих толщ; геохимические и геофизические аномалии, сопровождающие месторождения.

Каждая из зон пространства получила количественные оценки следующих признаков и критериев или отдельных элементов, составляющих их: мощности рудоносных, подрудных и надрудных частей рудовмещающего разреза, отдельных слагающих их горизонтов и разновидностей пород; соотношения литологических разностей пород; размеры рудоносных структур, выраженные через отношения их длин по простиранию (L), вкrest простирания (H) и по вертикали (M), через мощности выполняющих структуры пород; на некоторых месторождениях – углы падения бортов структур, полученные при расчёте углов выклинивания рудных залежей и рудоносных горизонтов вкrest простирания (a) и по простиранию (b); параметры зон развития гидротермально-метасоматических пород и рудных тел, выраженные через величины отношений $L : H : M$; интенсивность проявления рудной минерализации через процентное содержание сульфидов к общему объёму вмещающих пород и величины соотношения главных рудообразующих компонентов; интенсивность первичных и вторичных геохимических ореолов и их количественные значения зональности ореолов.

Геофизические параметры моделей базируются на данных физических свойств горных по-



род и руд, а также на показателях, характеризующих локальные аномалии различных геофизических методов.

В качестве эталонных объектов отображены преимущественно детально разведанные месторождения, что обеспечило получение достаточно полного объёма информации, необходимой для определения границ различных зон околорудного пространства и достоверности расчёта количественных признаков этих частей.

Модель каждого типового месторождения включает блоки специализированных чертежей, отражающих геологические, минералогические, геохимические и геофизические признаки, таблицы их характеристик и параметрических показателей и геометризованную геолого-поисковую модель месторождения, выполненную, как правило, на основе реконструированных палеофациальных продольных или поперечных профилей. Модели представляют собой информационную основу для разработки новых технологий прогнозирования, поисков и оценки месторождений, параметрического содержания легенд к нагрузкам прогнозных карт различного масштаба, а также определения плотности поисковых и поисково-оценочных сетей.

Из разработанных моделей [3] следуют основные выводы:

Районы рудноалтайского типа эквивалентны структурно-формационным блокам в пределах металлогенических зон и представляют собой крупные вулканотектонические депрессии, выполненные вулканогенно-осадочными отложениями одной (или двух) рудоносных формаций. Палеоструктурный анализ рудных районов Алтая показал, что в их пределах выделяются краевые и внутренние депрессии. В пределах рудных районов выделяются рудные поля. Палеоструктуры рудных полей, как правило, представлены прогибами (или депрессиями второго порядка). В сложнопостроенных вулканотектонических депрессиях, контролируемых рудные районы, они занимают различное положение по отношению к поднятиям, имеющим вид вулканических построек, сложенных кремнекислыми вулканикатами. Выделяются три типа прогибов: межвулканические, надвулканические и склоновые, отличающиеся друг от дру-

га морфологией, размерами и составом выполняющих их отложений.

Внутренняя их структура осложнена небольшими экстрезивными и лавовыми куполами, потоками и сопряжёнными с ними мелкими некомпенсированными впадинами. Кроме того, рудные поля часто приурочены к бортам вулканотектонических депрессий первого порядка, в пределах которых развиты экстрезивные купола и сопряжённые с ними впадины.

Колчеданно-полиметаллические месторождения Рудного Алтая по комплексу характеристик относятся к колчеданным месторождениям в вулканогенных комплексах (VMS) (В. В. Кузнецов, 2016) и ассоциируют с двумя рудоносными формациями (под термином «рудоносная формация» понимается геологическая формация, которая является и рудовмещающей, и рудогенерирующей [4]) – нижней (эмс – эйфель – ранний живет), последовательно дифференцированной базальтсодержащей андезит-дацит риолитовой известково-кремнисто-терригенной, и верхней (поздний живет – ранний фран), контрастной базальт-риолитовой кремнисто-терригенной. Эти формации обладают рядом характерных черт: принадлежностью вулканитов к калий-натриевой серии, существенным преобладанием кислых пород над основными, антидромным характером вулканизма и присутствием значительного количества осадочных и вулканогенно-осадочных пород (карбонатно-кремнисто-терригенных, углеродистоглинисто-кремнисто-терригенных, кремнистых туффигов и рифогенных известняков).

Средние соотношения Pb : Zn : Cu в рудах месторождений составляют 1 : 3 : 1 при широкой вариации этих соотношений. Главные минералы – пирит, галенит, сфалерит и халькопирит. Основные элементы-примеси представлены Ag, Au, Cd, Se, Te.

На рудноалтайских месторождениях ярко выражена взаимозависимость состава руд с составом и петрохимическими особенностями рудовмещающих толщ. С рудоносными геологическими формациями ассоциируют соответствующие рудные субформации:

- Свинцово-цинковая колчедансодержащая рудная субформация соответствует геоло-

гической последовательно дифференцированной базальтсодержащей андезит-дацит-риолитовой известково-кремнисто-терригенной формации, в составе которой кислые вулканиты преобладают над основными, а осадочная составляющая – над вулканогенной. Для месторождений характерно примерно равное соотношение свинца и меди в рудах (при некотором преобладании свинца), а также присутствие повышенных содержаний цинка. Соотношение $Pb : Zn : Cu$ составляет $(1-2) : (6-0,2) : 1$. Коэффициент колчеданности $S : (Pb + Zn + Cu)$ варьирует от 0,5 до 1,5;

• Медно-свинцово-цинковая колчеданная рудная субформация соответствует геологической контрастной базальт-риолитовой кремнисто-терригенной формации, в которой отмечаются примерно равные соотношения кислых и основных вулканитов, а также осадочной и вулканогенной составляющих. Для месторождений этой рудной субформации характерна незначительная роль свинца при близких значениях цинка и меди и высокой сернистости руд. Соотношение металлов $Pb : Zn : Cu$ составляет $(1-4) : (6-2) : 3$; коэффициент колчеданности – более 1,5.

Банк данных, созданный на основе параметрических моделей месторождений рудноалтайского типа является информационной основой её базы знаний. Структура, информационное наполнение БД и БЗ идентичны.

Банк данных и база знаний состоят из ряда разделов, включающих комплекс геологических, минералого-геохимических и геофизических сведений, имеющихся об эталонных месторождениях, что позволяет сформировать БЗ системы, которая даже при ограниченном количестве данных об объекте оценки (степень изученности которого всегда значительно ниже, чем у эталонных месторождений) принимает итоговое заключение о перспективности участка.

В структуру входят данные по следующим направлениям:

1. Породы, слагающие рудные поля и месторождения, и их формационная принадлежность;
2. Рудоконтролирующие и рудовмещающие структуры;

3. Метаморфические и гидротермально-метасоматические изменения;

4. Морфология и условия залегания рудных тел;

5. Минеральные типы руд (для рудовмещающей части разреза);

6. Зоны проявления сульфидной минерализации (для надрудной, фланговой и подрудной частей разреза);

7. Главные элементы геохимических ореолов;

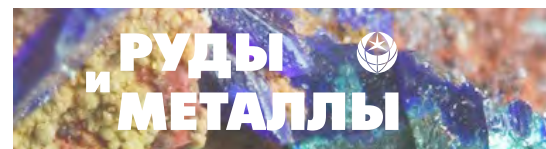
8. Геофизические поля.

Для каждого раздела приводятся качественные признаки, например, для первого раздела (типы осадочных горных пород и их количественное выражение) – процентное содержание породы в разрезе, её мощность, соотношение мощностей и т. д.).

В большинстве случаев при количественном описании того или иного признака используется не фиксированная жёсткая цифра содержания или длины и т. д., а диапазон значений. Это связано, с одной стороны, в специфике обработки и использования информации современными ПЭВМ, а с другой, – в точности самой информации, получаемой при геологических исследованиях.

В современной практике для нахождения границ диапазонов значений количественных характеристик признаков применяются два метода – чисто машинный, оперирующий приёмами математической статистики, и экспертный. Наиболее хороший результат получается при комбинированном использовании обоих – это метод выявления на основе методов математической статистики наиболее характерных, статистически выдержанных диапазонов с последующей экспертной их оценкой и корректировкой. Данная комбинированная методика была использована при формировании БЗ настоящей системы.

Банк данных содержит набор показателей каждой группы признаков, один или несколько из которых характерны для каждого из эталонных месторождений. Совокупность признаков, описывающих каждое месторождение, даёт общий список показателей БД. Типы полей БД сводятся к трём наиболее распространённым случаям:



1. Логические поля – на месторождении-эталоне или объекте оценки может быть строено только один из входящих в группу признаков, например, рудоносная формация, возраст отложений, их мощность, процентное количество пород в разрезе и т. д.

2. Комбинированные поля – из группы признаков значимыми могут являться от 1 до n (где n стремится к количеству признаков в группе). К этому типу относятся литолого-фациальные типы пород разреза, интрузивные образования, формы рудных тел, типы руд и т. п.

3. Цифровые поля – вводятся в БД только в случаях, когда нельзя по каким-либо причинам использовать диапазоны содержаний с логическим вводом данных.

Количество полей БД (БЗ) в целом не фиксировано и может быть как угодно велико. В то же время следует учитывать ряд обстоятельств.

С одной стороны, как уже отмечалось выше, необходима максимальная полнота описания, а с другой, в значительных по размерам структурах признаков пространств с наличием большого количества косвенных признаков на стадии выработки решающих правил и определения информационных весов возникают информационные шумы, которые затрудняют процедуру принятия решений, а в ряде случаев приводят к ложным заключениям. Начиная с первой в области геологии экспертной системы PROSPECTOR, проблема выбора оптимального размера признаков пространства стоит перед исследователями, занимающимися данным разделом информатики, и до настоящего момента нет единой точки зрения или каких-то строгих рекомендаций. При применении подобных систем исходя из опыта максимальную информационную нагрузку несут от 15–20 до 40–45 признаков, на которые обычно приходится до 90 % суммы информационных весов. Практика показывает, что 5–10-кратное превышение в исходном признаковом пространстве количества информативных признаков не приводит к каким-либо существенным информационным шумам и искажениям.

Специфика БД и БЗ системы, построенной на основе параметрических моделей месторождений, заключается в том, что для каждого из

объектов имеется не одно, а несколько описаний, совокупность которых характеризует эталон в целом. Так как параметрические модели строятся на основе расчленения объёма, занимаемого конкретным месторождением, на ряд пространств – рудоносное, фланговое, над- и подрудное, то и БД системы формируется по аналогии с моделями для рудоносного, флангового, над- и подрудного пространств. Совмещение шкалы признаков с матрицей пространств на каждом из объектов-эталонов даёт полную матрицу его описания. Все вместе эталонные месторождения формируют полный (исходный) БД системы.

База знаний использует всю совокупность признаков БД, но одновременно с этим может получать и дополнительные признаки путём их возможных (необходимых) сочетаний; необходимость формирования дополнительных исходных данных БЗ определяется экспертом, формирующим её, и закрепляется в виде правила, которое является обязательным для системы. Для исследовательского варианта на базе рудноалтайских месторождений наряду с конкретными породами, слагающими то или иное пространство разреза эталонного месторождения, сформированы их сочетания, характеризующие группы по масштабам и минеральному типу эталонных объектов. В обычном варианте при работе с системой эти дополнительные признаки БЗ формируются автоматически из ответов оператора при диалоге и широко используются для принятия окончательного решения. В других вариантах систем, использующих данную технологию, могут быть заданы, сформированы и оценены с точки зрения информативности любые сочетания из исходных признаков БД (конечно, они должны нести существенную геологическую нагрузку). Формирование дополнительных признаков БЗ – задача высококвалифицированного специалиста-геолога.

При формировании БД использованы средние значения каждой параметрической составляющей, её максимальные и минимальные значения, а также коэффициенты их вариации.

Кроме фактографического БД сформирован графический банк и, соответственно, графическая БЗ. Его целевое назначение – использова-

ние в диалоговом режиме изображений (геологических разрезов и карт). Представление об объекте у специалиста-геолога строится на образе, представляющем собой совокупность ряда геологических признаков, воплощённых в геологические карты и разрезы, в связи с чем часто происходят затруднения и непонимание принципов работы с системами, основывающимися лишь на фактографической информации. Формирование банков данных изображений пока ещё малоиспользуемый путь при работе экспертных или интеллектуальных систем в виду значительных технологических затруднений ввода и анализа геологической графики. В то же время, это направление наиболее эффективно для совершенствования информационных систем. В настоящей работе сделан лишь первый шаг в этом направлении, позволяющий эксперту на основе растровых изображений геологических объектов (различных геологических карт, характеризующих рудные и нерудные обстановки) дать заключение о мере сходства объекта оценки с предложенным изображением. Это заключение наряду с фактографическими данными используется для принятия окончательного решения.

Выбор месторождений-эталонов БД и БЗ определяется той целевой задачей, которую должна решать интеллектуальная система, и типами объектов-эталонов (минеральными, формационными и т. д.), закономерности размещения и условия локализации которых существенно отличаются друг от друга. Цель выбора эталонных месторождений – сформировать по возможности устойчивые однородные группы при обучении системы, признаковые пространства которых имеют максимально возможное сходство. Количество эталонов в каждой группе должно быть таким, чтобы обеспечить нахождение устойчивых сочетаний информативных признаков. Исходя из опыта минимальное количество эталонов в группе – не менее трёх. При подборе эталонов по масштабам желательно, чтобы в каждой из групп (крупные, средние, мелкие) соблюдался непрерывный ряд изменения запасов. В настоящей работе использованы объекты-эталоны рудноалтайского типа месторождений.

Интеллектуальная система позволяет на основе использования разнообразных методов и методик решать ряд различных по виду задач в процессе реализации общей технологической схемы. В формализованном виде эти задачи можно свести к следующим типам:

1. Задачи распознавания образов. Сюда относятся все виды распознавания объектов от разделения их по минеральным типам до выявления части околорудного пространства и масштаба объектов.

Для создания системы в первую очередь необходимо сформировать систему критериев для выделения объекта, определения его формационного типа и оценки масштабности. Для повышения надёжности получаемых критериев используются математические методы. Необходимым условием применимости методов является наличие однородных (по некоторому критерию) групп эталонных объектов, в результате сравнения которых представляется возможность формирования систем критериев с оценкой их значимости. При этом эталонная выборка объектов описывается в системе признаков, которые, по мнению эксперта, могут быть выбраны в качестве критериев.

Качество получаемой системы критериев (признаков) относительно решаемой задачи определяется на основе анализа эталонной и контрольной выборок объектов. При идентификации этих объектов на основе полученных критериев допускается не более 20 % ошибок.

Изучаемые признаки могут быть различной природы: качественные, балльные, количественные.

В формализованном виде в данном типе задачи можно выделить основные подтипы:

- Задача обучения распознаванию образов (распознавание по эталонной выборке объектов). Цель – отнесение объекта к одному из выделенных классов.
- Задача сокращения (минимизации) описания с оценкой значимости признаков для разделения объектов на классы. Цель – выделение системы информативных признаков.
- Задача таксономии (самообучение, классификации). Цель – формирование однородных групп объектов (признаков).



- Задача выделения типичных представителей классов объектов. Цель – формирование модели типичного представителя исследуемых классов объектов.

Для исследователя важно не только получение правильного результата идентификации объектов, но и выявление признаков, за счёт которых достигается искомый результат, выявление объектов, являющихся типичными представителями априорно или автоматически выделенных классов.

Существует ряд подходов к решению *задач распознавания*. Среди наиболее значимых могут быть выделены три подхода, основанные на идеях метрического, теоретико-вероятностного и комбинаторно-логического характеров соответственно. В зависимости от свойств объекта распознавания используется тот или иной подход.

Если в первом метрическом подходе предполагается, например, что объект изучения расположен в некотором метрическом пространстве и обладает некоторыми свойствами типа компактности, то во втором случае (теоретико-вероятностный подход), как правило, необходимо подчинение свойств объекта некоторым априорным вероятностным закономерностям. Оба эти подхода предполагают наличие большой обучающей выборки. Существенной чертой третьего подхода, называемого комбинаторно-логическим или логико-информационным, является отказ от предположений относительно свойств объекта (метрируемости, подчинённости вероятностным законам и др.), а также возможность вести распознавание при наличии довольно малой обучающей выборки. Наиболее общее свойство алгоритмов комбинаторно-логического типа состоит в том, что наряду с учётом информации по отдельным признакам производится целенаправленный поиск и использование сочетаний признаков, содержащих полную информацию о разделении классов эталонных объектов.

Задача обучения распознаванию образов формируется в следующем виде. Имеется некоторое множество наблюдений, которые относятся к M -классам. Требуется, используя информацию об этих наблюдениях и их принадлеж-

ности к классам, найти такое правило, с помощью которого можно было бы с минимальным числом ошибок классифицировать вновь появляющиеся наблюдения. Процесс поиска такого решающего правила обычно базируется либо на принципе перечисления объектов, либо на принципе общности свойств объектов. Если в первом случае требуется запоминание всей совокупности эталонных объектов для процесса распознавания, то во втором случае таблица эталонов требуется лишь на стадии обучения. Именно поэтому большинство авторов высказываются в пользу принципа общности свойств, который основан на предположении, что объекты, образующие один класс, обладают свойством подобия, отражённого в их характеристиках.

Основой решения всех задач распознавания являются обнаружение и использование некоторых закономерностей, содержащихся в массиве исходных данных. В зависимости от характера исходных данных выбираются соответствующие алгоритмы распознавания, большинство из которых работает с непересекающимися классами (например, тестовые алгоритмы). Но на практике встречаются задачи, в которых исследуются «размытые» (пересекающиеся) классы. Это направление заслуживает особого внимания. Теория размытых множеств [6] достигла определённого успеха при решении подобных задач.

В качестве решающих правил обычно выбираются наиболее простые, поддающиеся логическому объяснению (интерпретации), позволяющие реализовывать простые оптимизационные процедуры его поиска. Именно поэтому наиболее широкое применение получили линейные решающие правила (дискриминантный анализ, вычисление сумм информационных весов объектов), голосование за отнесение объекта к классам. Используются два типа правил. При решении задач распознавания объектов по классам, выделенным по монотонно-изменяющемуся целевому свойству (например, масштабности), используется правило I: объект относится к тому классу, в чьи пределы изменения попадает вес объекта, вычисленный на основе информативности признаков. В случае,

когда классы выделены без учёта изменения целевого свойства, используется правило 2: объект относится к тому классу, для которого вес объекта (функция принадлежности), вычисленный на основе информативности признаков, характерных для классов, принимает максимальное значение.

С проблемой распознавания тесно связаны задачи выделения существенных (информативных) признаков и минимизации признакового пространства.

Важность правильного выбора наиболее информативной системы признаков из некоторой исходной системы определяется также тем, что:

- указание наиболее информативных признаков оказывается достаточно интересным специалисту, изучающему внутренние связи сложных объектов исследования;
- сокращение числа признаков исходной системы, как правило, улучшает качество решения задачи распознавания.

Ясно, что отбирать существенные (информативные) признаки надо с учётом определённой цели, например, для выделения деющих свойств. Если признак характерен как для объектов класса A_i , так и для объектов класса A_j , то он будет малоинформативен при решении задачи распознавания объектов классов A_i и A_j . Существуют различные подходы к решению задачи минимизации системы признаков:

- без преобразования исходной системы признаков (выбор NM первых по информативности признаков, выброс наименее полезного признака, подсоединение наиболее полезного признака из оставшихся и т. д.);
- с переходом в новое признаковое пространство (факторный анализ, метод главных компонент).

В качестве меры важности признаков для разделения объектов на классы использовались веса, вычисленные на основе методов логико-информационного анализа.

Перейдём теперь к анализу возможных путей решения задачи таксономии. Напомним, что задачей таксономии (классификации) является получение разбиения объектов на группы на основании значений их признаков. При этом возможны два пути: разбиение проводит-

ся на фиксированное число классов (кластерный анализ); число получаемых классов заранее не фиксируется (алгоритм автоматической классификации). Построение классификации в подавляющем числе методов основывается на гипотезе компактности, которая предполагает выполнение двух условий: всегда возможен плавный переход от одного объекта к другому внутри класса так, что все промежуточные объекты будут восприниматься как объекты этого же класса, и нельзя плавно перейти к объектам другого класса; при небольших изменениях объекты не выходят за пределы данного класса.

Все методы основаны на некотором способе определения сходства объектов. Существует ряд способов количественного измерения меры сходства двух объектов: коэффициенты подобия; коэффициенты корреляции; показатели расстояния. Выбор способа вычисления меры сходства зависит от вида используемой информации, которая может носить как качественный, так и количественный характер. Коэффициенты корреляции и подобия указывают на наибольшее сходство в тех случаях, когда они имеют высокие положительные значения, в то время как показатели расстояния указывают на наибольшее сходство в тех случаях, когда они принимают наименьшие значения. Предпочтительней использовать те коэффициенты сходства, которые сохраняют своё значение при изменении масштабности измерения признаков (чем не обладает, к примеру, евклидово расстояние).

Основным требованием, предъявляемым к классификации, является следующее: результат классификации не зависит от порядка рассмотрения объектов.

После того, как получено некоторое разбиение множества объектов на непересекающиеся классы, встаёт интересная задача о выборе типичных представителей классов, характеризующих основные свойства сформированных классов. Такие центры выбираются, например, как точки сгущения либо как объекты, обладающие только признаками, имеющимися на всех объектах класса.

Таким образом, охарактеризованы возможные способы решения поставленных выше задач.



2. Задачи выявления связей параметрических характеристик между собой и с запасами металла. Решение такой группы задач осуществляется на основе применения методов математической статистики. Наиболее важными при этом являются методы общей статистики, анализа корреляционных связей и регрессионный анализ.

Общая статистика позволяет провести оценку главных элементов закономерностей изменчивости параметрических характеристик различных частей рудного и окolorудного пространств, используя общепринятые параметры, такие как коэффициент вариации, дисперсию, среднеквадратичное отклонение, моду, медиану и др. Корреляционный анализ позволяет через коэффициент корреляции оценить значимость связей пар параметров между собой. Здесь не имеет существенного значения, положительная или отрицательная корреляционная связь установлена. Главное требование – устойчивость и высокий уровень значимости коэффициента, так как по нему выбираются те параметры, для которых могут быть установлены и рассчитаны связи через уравнения регрессии. Регрессионный анализ позволяет численно и графически представить выявленные закономерные связи между параметрическими характеристиками. Уравнения регрессии могут носить линейный и нелинейный вид в зависимости от сложности формы установленных связей.

3. Задачи оценки удалённости решаются на основе элементов математической статистики совместно с распознаванием образов. На основе теории распознавания образов выявляются элементы окolorудного пространства, которые с помощью численных методов преобразуются в геометризованные модели (с использованием статистических оценок параметрических характеристик).

4. Задачи информационно-аналитические. Решаются с помощью ГИС-технологии (географической информационной системы). ГИС-технология обеспечивает выполнение работ по установке связи между огромными массивами числовых параметров объектов и их пространственным расположением. Главная цель – визуализация информации для более наглядно-

го представления изменчивости параметров в пространстве. Технические возможности современной вычислительной техники позволяют в виде карт и различных форм графиков и диаграмм отображать результаты на экране монитора и, в случае необходимости, на принтере. Применение ГИС-технологии является одним из принципиальных моментов в обеспечении достоверности информации.

Каждая из задач, на которые разделяется процесс распознавания объекта оценки, решается на основе выделения класса *информативных признаков*. Причём каждый информативный признак имеет свой информационный вес, определяющий значимость (важность) признака при решении данной конкретной задачи. Вес признака в данном случае рассматривается по абсолютной величине. Знак у величины признака обозначает, к какому из классов (по целевому свойству) он относится.

Принципиально все признаки базы знаний имеют некоторый информационный вес, но для большинства признаков он по абсолютной величине небольшой. В связи с этим они не рассматриваются. Как правило, наибольшие веса имеет ограниченное количество признаков, которые определяют результат решения целевой задачи.

Коротко рассмотрим информативные признаки каждой из задач.

1. Разделение объектов на минеральные типы – полиметаллический и колчеданно-полиметаллический – опирается на 12 наиболее информативных признаков, среди которых максимальное значение имеют типы геологических формаций и субформаций, магматических пород, рудоконтролирующие и рудовмещающие структурные элементы.

2. Выявление пространства, к которому относится объект наблюдений, – для колчеданно-полиметаллического и полиметаллического минеральных типов. Наибольшее значение имеют признаки, характеризующие литолого-фациальное строение разреза, состав и характер проявления окolorудных метасоматитов, состав и морфологию рудной минерализации.

3. Оценка масштаба объекта – для колчеданно-полиметаллического типа; для всех про-

странств наиболее значимы формационные, литолого-фациальные и структурные признаки, для полиметаллических объектов кроме перечисленных выше информативными являются и геохимические признаки.

При работе в диалоге используется вся совокупность признаков БЗ, связанных с решением поставленной задачи, но при принятии решений основная роль отводится наиболее информативным признакам. Полный анализ последних показывает, что они отражают те основные представления об условиях локализации алтайских объектов различного типа и масштаба, которые развиваются большим кругом исследователей последние два десятилетия.

На основе систем признаков и их сочетаний решаются задачи распознавания эталонных месторождений, а в дальнейшем и объектов оценки.

1. Разделение эталонных объектов по минеральным типам. Целевое свойство – минеральный тип месторождений: колчеданно-полиметаллический (1-й класс) и полиметаллический (2-й класс).

Для 1-го класса использовались 36 объектов, из которых правильно распознаны 31 (доля распознавания 86,1 %), а для 2-го – 44 объекта, правильно из которых распознаны 37 (доля распознавания 84,1 %).

2. Распознавание частей околорудного пространства на эталонных объектах полиметаллического минерального типа. Использовались 11 эталонных месторождений различного масштаба. Правильно распознано от 72,7 до 81,8 % объектов. Максимальные значения качества распознавания характеризуют рудоносное пространство, а минимальные – над- и подрудное.

3. Распознавание частей околорудного пространства на эталонных объектах колчеданно-полиметаллического минерального типа. Использовались девять эталонных месторождений. Правильно распознано от 77,8 до 88,9 %. Так же, как и в предыдущем случае, максимальные значения характеризуют рудоносные и фланговые части пространства, а минимальные – над- и подрудные.

4. Распознавание объектов по масштабам проводилось отдельно по каждой из частей око-

лорудного пространства. В каждом случае на основании перебора нескольких вариантов информативных признаков достигалось максимально возможное различие эталонных групп (мелкие, средние, крупные объекты). Граница классов определялась через полусумму максимального и минимального значений информационного веса эталона в соседних классах. В трёх случаях эта граница не зафиксирована ввиду перекрытия информационных весов соседних классов для подрудного и надрудного пространств.

В качестве примера приведём информационные веса объектов при распознавании масштаба оруденения (табл. 1).

В целом при решении любой из приведённых выше задач доля принятия ошибочного решения не превышает 28 %, что следует признать удовлетворительным. Анализ неправильно распознанных геологических ситуаций показывает, что наибольший процент ошибок связан с над- и подрудными пространствами, где геоинформационная база наименее достоверна, или с объектами, имеющими переходные черты между минеральными типами или запасы, близкие к границам классов.

На основе созданной системы была оценена перспективность рудных полей Змеиногорского рудного района Рудного Алтая (табл. 2). Так как в ИГС в обучающем блоке использовались запасы хорошо разведанных и эксплуатируемых месторождений, то и результат оценки может быть приравнен к потенциальным запасам без разбивки на категории. Сравнительный анализ с известными балансовыми запасами месторождений и апробированными прогнозными ресурсами площадей в пределах рудных полей позволяет сделать следующие выводы.

Корбалихинское рудное поле. Ресурсы принадлежат выявленным в результате проведения поисковых работ Каменскому и Давыдовскому проявлениям. Увеличение их при переводе в запасы является маловероятным. В то же время рудные тела западного участка крупного Корбалихинского месторождения на глубинах 700–900 м не оконтурены по падению, в связи с чем прирост запасов на глубоких горизонтах вполне возможен. Выделение новых



1. Информационные веса эталонных объектов при распознавании масштаба оруденения

1. Information weights of standard deposits in mineralization scale recognition

Класс объектов по крупности (запасы, тыс. т металла)	Эталонное месторождение	Части рудоносного пространства			
		рудоносная	рудоносная фланговая	надрудная	подрудная
<i>Колчеданно-полиметаллический минеральный тип</i>					
Мелкие (<500)	Берёзовогорское	0,8	0,612	0,832	0,474
	Лазурское	0,154	0,238	0,309	0,654
	Ново-Золотушинское	0,656	0,293	0,424	0,647
Граничные значения		1,08	0,93	1,03	0,96
Средние (500–1000)	Белусовское	1,354	1,254	1,315	1,260
	Иртышское	1,395	1,394	1,236	2,069
Граничные значения		1,74	1,53	1,75	?
Крупные (>1000)	Корбалихинское	2,688	2,534	2,532	2,985
	Орловское	2,091	1,662	2,179	2,013
	Малеевское	2,688	2,392	2,532	2,059
<i>Полиметаллический минеральный тип</i>					
Мелкие (<500)	Семёновское	0,9	0,892	0,875	0,886
	Змеиногорское	0,694	0,688	1,222	1,014
	Зареченское	0,594	1,016	1,115	0,577
	Захаровское	0,496	0,482	0,227	0,516
Граничные значения		1,01	1,06	?	?
Средние (500–1000)	Рубцовское	1,473	1,545	1,348	1,501
	Таловское	1,125	1,536	1,338	1,361
	Юбилейное	1,329	1,103	1,023	1,173
	Среднее	1,650	1,428	1,195	0,946
Граничные значения		1,86	1,62	1,58	1,55
Крупные (>1000)	Греховское	2,553	2,539	2,308	2,214
	Чекмарь	2,076	1,697	1,813	1,605
	Зыряновское	2,522	2,294	2,438	2,368

2. Сравнительная характеристика результатов оценки с использованием ИГС рудных полей Змеиногорского рудного района с известными в их пределах запасами и ресурсами

2. Comparative characterization of assessment results using Zmeinogorsky ore district fields IGS versus their known reserves and resources

Рудные поля	Оценка на основе ИГС Zn + Pb + Cu, тыс. т	Известные запасы и ресурсы Zn + Pb + Cu, тыс. т		
		ABC ₁ C ₂	P ₁	P ₂
Корбалихинское	4500	3261,1	311	316
Лазурское	1110	214,8	-	310
Берёзовогорское	1560	222	177	247
Змеиногорское	3800	958	899	1793
Комиссаровское	280	-	176,4	81,2
Зайцевское	1300	-	-	708
Черепановское	870	-	815	300
Кандидатское	1300	-	-	1555
Белоглинское	750	-	-	370

участков для постановки поисковых работ в пределах рудного поля маловероятно.

Лазурское рудное поле. Известное Лазурское месторождение разведано и хорошо изучено. Проведённые в пределах рудного поля поисковые работы позволяют оценить Мосляно-Пихтовский участок по категории прогнозных ресурсов $P_1 + P_2$ примерно в 540 тыс. т суммы металлов. Исходя из проведённой нами оценки на основе ИГС в пределах рудного поля можно ожидать выявление ещё одного объекта с ресурсами 500–600 тыс. т, скорее всего, в пределах северо-западной части Лазурской вулканно-тектонической депрессии.

Змеиногорское рудное поле. Полученный результат оценки показывает высокую степень сходимости с имеющимися запасами и ресурсами Зареченского, Среднего месторождений и вновь выявленного Петровского проявления.

Зайцевское, Белоглинское, Кандидатское рудные поля характеризуются ресурсами категории P_2 . Проведённая оценка на основе применения ИГС позволяет рассчитывать на зна-

чительный прирост ресурсов в результате проведения поисковых работ, а в дальнейшем – на выявление в каждом из рудных полей средних по масштабам месторождений.

Комиссаровское и Черепановское рудные поля. Проведённая оценка показала низкий потенциал указанных рудных полей, полностью исчерпываемый имеющимися в их пределах рудопроявлениями, не имеющими промышленного значения.

Таким образом, использование ИГС показывает свою высокую эффективность при прогнозе и поисках колчеданно-полиметаллических месторождений, её применение позволило заново переоценить известные рудные поля и выявить приоритетные направления для постановки поисковых работ в рудном районе.

В заключение отметим, что повышение эффективности интеллектуальных систем заключается в совершенствовании их геоинформационной базы – базы знаний – и в возрастании интеллектуальных возможностей собственно компьютерной технологии.

Список литературы

1. *Виды искусственного интеллекта.* – URL: https://spravochnick.ru/informatika/ponyatie_iskusstvennogo_intellekta/vidy_iskusstvennogo_intellekta_1/ (дата обращения: 12.04.2021).
2. *Красильников Виталий.* Эволюция экспертных систем. – URL: <https://www.kv.by/archive/index-2005401103.htm> (дата обращения: 12.04.2021).
3. *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. – 205 с.
4. *Металлогенический кодекс России.* – М. : Геокарт-ГЕОС, 2012. – 126 с.
5. *Rheingold H.* Expert systems. Computers as sages. – URL: www.atariarchives.org/deli/expert_systems.php (дата обращения: 12.04.2021).
6. *Zadey L. A. Lotfi A. Zadeh, King-Sun Fu, Kokichi Tanaka.* Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes. Proceedings of the U.S. – Japan Seminar on Fuzzy Sets and Their Applications, Held at the University of California, Berkeley, California, July 1–4, 1974. – USA : Academic press, 1975. – 506 p.

References

1. *Vidy iskusstvennogo intellekta* [Types of artificial intelligence], available at: https://spravochnick.ru/informatika/ponyatie_iskusstvennogo_intellekta/vidy_iskusstvennogo_intellekta_1/ (Accessed: 12.04.2021).
2. *Krasil'nikov Vitalii.* Evolyutsiya ekspertnykh system [Evolution of expert systems], available at: <https://www.kv.by/archive/index2005401103.htm> (Accessed: 12.04.2021).



3. 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 kolchedannopolimetallicheskih mestorozhdenii Rudnogo Altaya [Fundamentals of forecasting and prospecting for pyrit-polymetallic deposits in the Rudny Altai], Moscow, TsNIGRI Publ., 2019, 205 p.
4. Metallogenicheskii kodeks Rossii [Metallogenic Code of Russia], Moscow, Geokart-GEOS Publ., 2012, 126 p.
5. Rheingold H. Expert systems. Computers as sages, available at: www.atariarchives.org/deli/expert_systems.php (Accessed: 12.04.2021).
6. Zadey L. A. Lotfi A. Zadeh, King-Sun Fu, Kokichi Tanaka. Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes. Proceedings of the U.S. – Japan Seminar on Fuzzy Sets and Their Applications, Held at the University of California, Berkeley, California, July 1–4, 1974, USA, Academic press, 1975, 506 p.

Авторы

Кузнецов Владимир Вениаминович

кандидат геолого-минералогических наук
заведующий отделом цветных металлов¹
okt@tsnigri.ru

Чижова Ирина Александровна

доктор геолого-минералогических наук
ведущий научный сотрудник²
I.Chizhova@yandex.ru

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

² ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва

Authors

Kuznetsov Vladimir Veniaminovich

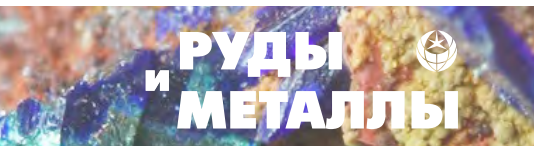
PhD
Head of base metals department¹
okt@tsnigri.ru

Chizhova Irina Alexandrovna

PhD
leading researcher²
I.Chizhova@yandex.ru

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

² FSBIS Institute of Ore Deposit Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Moscow, Russia



Оценка инвестиционной привлекательности платиноносных и медно-никелевых объектов Мончегорского рудного района в современных условиях

Investment appeal assessment of Pt-rich and Cu-Ni deposits of Monchegorsky ore district in current conditions

Рогизный В. Ф., Куликов Д. А., Карпухина М. В., Черемисин А. А., Хромов В. М.

Rogizny V. F., Kulikov D. A., Karpukhina M. V., Cheremisin A. A., Khromov V. M.

Рассмотрена возможность освоения и инвестиционная привлекательность платинометалльных объектов Мончегорского рудного района. Для этих объектов по результатам оценки рассмотрения ТЭО в ГКЗ, а также апробации в ЦНИГРИ к концу 2020 г. запасы утверждены. При сложившейся конъюнктуре минерального сырья (в том числе высокой стоимости Pd) наибольший интерес для освоения представляют месторождение Вуручуайвенч в составе четырёх участков (Пласт «З30», Вуручуайвенч, Южносопчинский, Арваренч), рудопоявление Ниттис-Кумужья-Травяная, а также участок Лойпишнюн. Потенциальные объекты разработки по запасам и качеству руды, близости к пунктам её переработки удешевляют технические решения при их совместном освоении. В статье приведены решения по вскрытию, подготовке и отработке платинометалльных объектов с использованием современного горного оборудования на открытых (ОГР) и подземных (ПГР) горных работах, конвейерного транспорта руды, а также утилизации хвостов обогатительной фабрики (ОФ) для закладки подземных выработок. Выполненные экономические расчёты показывают целесообразность освоения перечисленных объектов Мончегорского рудного района.

Ключевые слова: платинометалльные объекты, инвестиционная привлекательность, вскрытие и отработка участков ОГР и ПГР, использование хвостов ОФ в закладку.

Development potential and investment attractiveness of PGM deposits (Monchegorsky ore district) are discussed. By the late 2020, the reserves of these deposits were approved based on results of a feasibility study review assessment in the State Reserve Commission and TsNIGRI approval. In current mineral market conditions (including high Pd price), the most attractive development projects are Vuruchuaivench deposit comprising 4 areas (Plast 300, Vuruchuaivench, Yuzhnosopchinsky and Arvarench), Nittis-Kumuzhya-Travyanaya occurrence and Loipishnyun area. In terms of reserves, ore grades and proximity to processing plants, these potential mining projects are less expensive if developed concurrently. The paper presents recommendations for PGM deposit opening, development and mining using advanced mining equipment in open-pit and underground mining operations, ore conveying and processing plant tailings disposal to infill underground workings. Economic estimates were made supporting development viability of the above deposits within Monchegorsky ore district.

Keywords: PGM deposits, investment attractiveness, area opening and mining, processing plant tailings use as infill material.

Для цитирования: Рогизный В. Ф., Куликов Д. А., Карпухина М. В., Черемисин А. А., Хромов В. М. Оценка инвестиционной привлекательности платиноносных и медно-никелевых объектов Мончегорского рудного района в современных условиях. Руды и металлы. 2021. № 1. С. 42–56. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10003.

For citation: Rogizny V. F., Kulikov D. A., Karpukhina M. V., Cheremisin A. A., Khromov V. M. Investment appeal assessment of Pt-rich and Cu-Ni deposits of Monchegorsky ore district in current conditions. Ores and metals, 2021, № 1, pp. 42–56. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10003.



Общие сведения. Мончегорский медно-никелевый район – один из старейших рудных районов России. В течение длительного времени здесь отрабатывалось месторождение жильных руд Ниттис-Кумужья-Травяная (НКТ), которое являлось сырьевой базой комбината «Североникель» в г. Мончегорске. Запасы верхних горизонтов богатых крутопадающих тонких жил на глубину до 200–400 м разрабатывались в период с 1936 по 1975 г., обеспечивая потребности комбината в сырье. В настоящее время ОАО «Комбинат Североникель» перешло на переработку фаянштейна из Печенги и Норильска, а также лома цветных металлов.

В 2008 г. ОАО «Кольская ГМК» были завершены поисково-оценочные работы на участке Вуручуайвенч, а запасы платинометалльных руд категорий $C_1 + C_2 \Sigma[Pt + Pd]$ в количестве 40 т поставлены на баланс в ГКЗ (протокол от 25.04.2008 № 1628-оп). В ТЭО участок Вуручуайвенч был намечен к отработке комбинированным способом – приповерхностная часть двумя карьерами с последующей доработкой запасов глубоких горизонтов подземным способом (ПГР). В 2013 г. завершены оценочные работы на трёх других рудных участках: Пласте «330» (подземные работы), Южносопчинском и Арваренч (карьеры). Эти участки в ТЭО вместе с участком Вуручуайвенч объединены в рудное поле месторождения Вуручуайвенч (Карпенко И. А., Петраш Н. Г., Рогизный В. Ф. и др., 2012). Их запасы категорий $C_1 + C_2 \Sigma[Pt + Pd]$ в количестве 105 т утверждены в ГКЗ (протокол от 06.12.2013 № 3377).

Поисковые работы на малосульфидные руды в Мончегорском рудном районе 2015–2017 гг. были проведены АО «Росгеология»; в результате были оценены два крупных рудопроявления платинометалльных руд – НКТ (до горизонта -500 м) и Нюд-Морошковое. Прогнозные ресурсы категорий $P_1 + P_2 \Sigma[Pt + Pd]$ в количестве 163 т, подтверждающие значительные перспективы объектов района, апробированы в ФГБУ «ЦНИГРИ» (Куликов Д. А., Черемисин А. А., Карпухина М. В., Рогизный В. Ф. и др., 2017).

В оценке ФГБУ «ЦНИГРИ» при освоении этих объектов строительство ГОКа и общей обогатительной фабрики (ОФ) намечается у север-

ного склона г. Сопчуайвенч, где перекрещиваются пути выдачи руды двух крупных рудных объектов с подземными горными работами – Пласта «330» ($\approx 45,7$ млн т) и НКТ ($\approx 60,5$ млн т). Перечисленные объекты, связанные с расслоенными интрузивами ультрабазитов по запасам и качеству руды, доступности и близости к пунктам переработки, рассматриваются в статье как объекты-лидеры МПГ Мончегорского района [4].

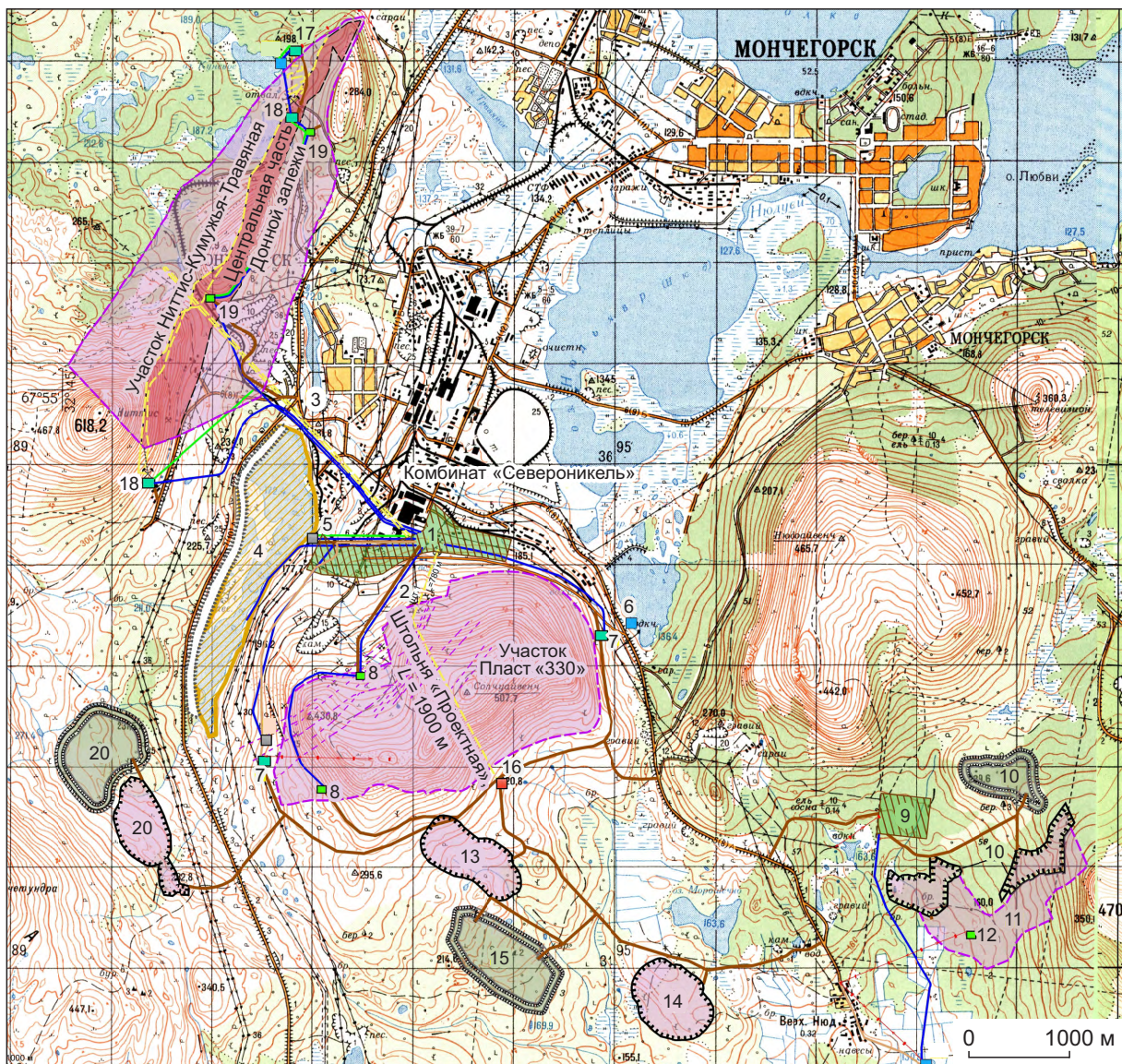
Следует также отметить, что в конце 2020 г. в результате выполненных АО «Росгеология» работ по рудопроявлению Поаз (этот участок расположен восточнее анализируемого в статье района) ЦНИГРИ были апробированы ресурсы МПГ категорий $P_1 + P_2$ в количестве свыше 300 т Pd. Наличие этих ресурсов выявляет ещё одного рудного лидера, что увеличивает инвестиционную привлекательность Мончегорского рудного района.

Основные параметры рудных лидеров МПГ (за исключением рудопроявления Поаз) представлены в табл. 1, схема расположения объектов потенциального ГОКа – на рис. 1.

Расчёт производственной мощности ГОКа и ОФ для запасов и апробированных ресурсов никеля и МПГ выполнен по формуле Тэйлора, скорректированной Лонгом в 2009 г., и представлен (при 360 рабочих днях в году) в табл. 2.

Отличительными особенностями рассматриваемых месторождений и участков Мончегорского рудного района являются благоприятные климатические условия, развитая инфраструктура и близость намечаемых к освоению объектов к ОФ и последующему переделу. Их краткая характеристика приводится ниже в порядке намеченного освоения.

Участок Пласт «330». Был обнаружен в 1932–1935 гг. в 1 км южнее промплощадки комбината «Североникель» в массиве г. Сопчуайвенч. Согласно ТЭО-2012 на участке преобладает вкрапленное платино-медно-никелевое оруденение, которое представлено одним крупным пластом средней мощностью 3,31 м, протяжённостью по длинной оси 3,5, по короткой – 1,8 км (Карпенко И. А., Петраш Н. Г., Рогизный В. Ф. и др., 2012). Пласт залегает в виде пологой мульды среди пироксенитов-бронзититов с углами



падения крыльев 5–15°. Он состоит из тонких переслаивающихся оливинсодержащих пород с ореолом бедной сульфидной вкрапленности. Практически на всём протяжении выходит на дневную поверхность, повторяя формы рельефа.

В довоенное время (с 1935 г.) было пройдено ≈ 70 тыс. м³ выработок, частично сохранившихся до настоящего времени: Капитальная штольня № 1 (горизонт 180 м; $L = 780$ м; $S = 7 \times 6$ м²), другие выработки меньших сечений.

Большим меридиональным и Аномальным сбросами шахтное поле делится на три участ-

ка, которые залегают на разной глубине и характеризуются следующими параметрами: Западный ($S = 1515,2$ тыс. м²; $m_{cp} = 4,31$ м); Клин ($S = 371,9$ тыс. м²; $m_{cp} = 4,46$ м); Восточный ($S = 1968$ тыс. м²; $m_{cp} = 3,53$ м, ранее был представлен ресурсами Р₁). Наибольшей глубиной залегания характеризуется Восточный участок – 415,39 м. Большой меридиональный сброс прослежен с поверхности на 2,5 км; простирается близко к меридиональному с падением на восток (80–60°), амплитуда 80–140 м. Аномальный сброс выражен на поверхности зоной смя-



Рис. 1. Карта месторождений и рудопроявлений Мончегорского рудного района:

экспликация объектов ГОКа: 1 – промплощадка ОФ с порталами вскрывающих выработок подземных рудников, 2 – штольня № 1 рудника Пласт «330», 3 – трасса АТУ и КУ рудника НКТ, 4 – хвостохранилище ОФ, 5 – насосная станция оборотного водоснабжения ОФ, 6 – насосные станции технического водоснабжения объектов ГОКа, 7 – промплощадки Запад и Восток участка Пласт «330», 8 – закладочные комплексы участка Пласт «330», 9 – промплощадка участка Вуручуайвенч, 10 – карьеры и отвал участка Вуручуайвенч, 11 – подземный рудник на участке Вуручуайвенч, 12 – закладочный комплекс участка Вуручуайвенч, 13 – карьер участка Южносопчинский, 14 – карьер участка Арваренч, 15 – отвал карьеров Южносопчинский и Арваренч, 16 – дробильно-перегрузочный узел для руды участков Вуручуайвенч, Южносопчинский и Арваренч, 17 – промплощадка Северного наклонного съезда НКТ, 18 – стволы шахт № 5(бис) и № 6 НКТ, 19 – закладочные комплексы НКТ, 20 – карьер и отвал участка Лойпишнюн

Fig. 1. Map of deposits and occurrences within Monchegorsky ore district

mine/plant complex facilities explication: 1 – processing plant site with underground mine working portals, 2 – adit 1 of Plant 330 mine, 3 – NKT mine, 4 – processing plant's tailings pond; 5 – processing plant pump station of reverse water supply, 6 – pump stations of technical water supply as part of mine/plant facilities, 7 – West and East sites within Plast 330 area, 8 – Plast 330 infill complexes, 9 – Vuruchuaivench area industrial site, 10 – Vuruchuaivench pits and stockpile, 11 – underground mine at Vuruchuaivench, 12 – Vuruchuaivench complex, 13 – Yuzhnosopchinsky pit, 14 – Arvarench pit, 15 – Yuzhnosopchinsky and Arvarench stockpiles, 16 – ore crushing and haulage facilities (Vuruchuaivench, Yuzhnosopchinsky and Arvarench areas), 17 – site of Severny ramp (NKT), 18 – shafts 5 and 6 (NKT), 19 – infill complexes (NKT), 20 – Loipishnyun pit and stockpile

тия, видимая мощность 15 м. На глубине подземными горными выработками не встречен. Амплитуда сброса – 80 м относительно западной части массива.

Вскрытие участка Пласт «330» проектируется Главной конвейерной выработкой (ГКВ), включающей Капитальную штольню № 1, конвейерный уклон «Север» к ОФ, подземный к дробильному комплексу (ДК), а также грузовые и порожняковые штреки (в последующем добавляется конвейерный бремсберг «Юг»). Конвейерные выработки оснащаются ленточным конвейером ($B = 1200$ мм) для транспорта руды к ОФ. Схема вскрытия показана на рис. 2.

Намечается последовательная отработка тектонически обособленных участков Пласта «330» с закладкой. В первую очередь отрабатывается Западный участок, запасы которого лучше разведаны, отличаются повышенной продуктивностью и имеют подходы выработки. Часть запасов у выходов пласта на поверхность, у сбросов, оставляются в предохранительных и охранных целиках в качестве временно неактивных (отрабатываются по локальным про-

ектам на завершающей стадии отработки). Во вторую очередь отрабатываются запасы Восточного участка (после доразведки P_1) и участка Клин.

С учётом горнотехнических условий участка Пласт «330» применяются два подварианта систем разработки с выемкой руды камерами по восстанию с комбинированной (пастовая + породная) закладкой: для участков шахтного поля с углами падения $\alpha \leq 0-15^\circ$ и с углами падения $\alpha > 15^\circ$ [2, 3]. Транспортные выработки (штреки), ориентированные по длинной стороне эллипса (профиль А–В), разделяют поле Западного участка на две примерно равные части – северо-западную и юго-восточную. По короткой стороне шахтное поле делится на панели шириной по 100 м, которые, в свою очередь, делятся на блоки, отрабатываемые в отступающем порядке. Аналогичное деление шахтного поля на панели и порядок отработки предусматриваются для участков Восточный и Клин.

Базовая система разработки с выемкой руды камерами по восстанию с комбинированной закладкой описана в [4]. Применение за-

1. Основные параметры объектов МПГ Мончегорского рудного района

1. The main parameters of PGM deposits, Monchegorsky ore district

Объект	Тип минерализации	Борт	Запасы руды, тыс. т.	Содержания				Запасы/ресурсы				Квалификация запасов/ресурсов	
				Ni, %	Cu, %	Pt, г/т	Pd, г/т	Ni, тыс. т	Cu, тыс. т	Pt, т	Pd, т		
Месторождение «Вуручайвенч»													
Участок ОГР + ППР Вуручайвенч	Рифовый горизонт вкрапленных малосульфидных руд	4 г/т Pd _{усл.} – баланс, 1 г/т – забаланс	10 420	0,20	0,271	0,39	2,897	21,18	28,28	4,04	30,19	34,23	C ₁ + C ₂
Участок ППР Пласт «330»	Пластовая и придонные залежи вкрапленных Ni-МПГ руд	0,3 % Ni _{усл.}	45 622	0,42	0,21	0,17	0,72	192,9	95,6	7,77	32,8	40,57	C ₁ + C ₂
Участок ОГР Южносопчинский	Малосульфидные платинометалльные руды	1,5 г/т Pd _{усл.}	10 005	0,12	0,11	0,31	1,1	11,9	11,0	3,12	11,0	14,12	C ₂
Участок ОГР Арваренч		1,75 г/т Pd _{усл.}	17 600	0,13	0,17	0,157	0,71	22,5	29,9	2,76	12,5	15,26	C ₂
Итого, месторождение Вуручайвенч			83 647	0,29	0,197	0,21	1,02	248,5	164,8	17,69	86,5	104,2	МПГ, Cu, Ni кат. C ₁ + C ₂
Рудопроявление НКТ	Жильные, вкрапленные, донные и штокерковые Ni руды	1 % Ni _{усл.}	60 486	0,45	0,38	0,28	0,79	273,0	229,0	16,89	47,5	64,37	P ₁ + P ₂
Участок Лойпишнюн	Малосульфидные платинометалльные руды	0,5/0,8 г/т Pd _{усл.}	12 530	0,08	0,08	0,69	1,02	10,5	10,6	8,61	12,7	21,31	C ₂
Всего			156 663	0,34	0,258	0,276	0,923	532	404,4	43,2	144,7		



2. Расчёт производственной мощности рудных объектов

2. Estimate of deposit production capacity

Месторождения, участки	Геологические запасы, Q, тыс. т	Степень	Коэффициент	Производительность	Производительность, т/год	
				т/сутки	расчётная	принятая
Пласт «330»	45 422	0,562	0,297	5972,3	2150,0	2500*
Вуручайвенч	10 420	0,562	0,297	2610,9	939,9	≈ 500 + 750
Южносопчинский	10 005	0,562	0,297	2552,0	918,7	500
Арваренч	17 600	0,562	0,297	3505,5	1261,9	1250
НКТ, условные запасы	60 486	0,562	0,297	6967,7	2508,4	≈ 2500
Лойпишнюн	12 530	0,562	0,297	2896,0	1042,6	≈ 1000
Итого	155 935	0,562	0,297	11 945,1	6581,2	6500

Примечание. * По участку Пласт «330» производительность увеличена с учётом упрощённой схемы вскрытия и благоприятных условий для ведения ПГР.

кладки на базе хвостов обогащения позволяет существенно уменьшить затраты на строительство хвостохранилищ при широком использовании подземных камер для размещения хвостов ОФ и/или сухом их складировании. Следует отметить как преимущество принятой схемы вскрытия Пласта «330» то, что главная конвейерная выработка может быть продлена до южного склона г. Сопчуайвенч и использована для конвейерного транспорта руды с карьеров Южносопчинский и Арваренч на ОФ, при этом существенно снижаются затраты на автотранспорт.

Участок Вуручайвенч. Участок располагается на восточном фланге Мончегорского plutона в краевой части г. Вуручайвенч. На дневной поверхности он прослежен на протяжении 2,1 км, площадь ~ 3 км², при этом по падению габбронориты прослежены на 3 км и не оконтурены. Рудные тела представляют собой пласты и мелкие линзы, согласно залегающие с вмещающими породами с падением на юго-восток от 5–10° до 20–30°, $m_{cp} \sim 3,5–4,5$ м. Рудное тело выдержано по мощности и содержанию условного металла – палладия. Плаггиоклазиты отчетливо выделяются макроскопически, представляя собой светлую породу крупнопятнистой текстуры. Серией поперечных тектонических нарушений, сбросов/взбросов с амплитудами от 15–20 до 150 м, участок Вуручайвенч раз-

бит на три блока: Западный, Центральный, Восточный, при этом в Западном блоке сосредоточено 47,1 % запасов (по руде), а в Центральном – 52,6 %.

По условиям залегания участок разрабатывается комбинированным способом, при этом приповерхностные запасы (~ 30 %) отрабатываются двумя карьерами, которые показаны на рис. 1.

Запасы глубоких горизонтов (ПГР) вскрываются двумя автотранспортными уклонами (АТУ) с площадок карьеров № 1 и № 2, а также вентиляционно-ходовыми восстающими (рис. 3). Для очистной выемки применяется камерно-столбовая система разработки с конфигурацией камер под обычное или низкопрофильное оборудование с последующей пастовой/твердеющей закладкой [4].

Анализ результатов подсчёта запасов указывает на перспективы расширения участка Вуручайвенч с увеличением глубины работ.

Участок Южносопчинский располагается в 0,7 км от проектируемого портала конвейерного бремсберга «Юг» (участок Пласт «330», южный склон г. Сопчуайвенч). Здесь намечено строительство дробильно-перегрузочного комплекса, обеспечивающего дробление руды с участков Южносопчинский и Арваренч для её передачи конвейерным транспортом на ОФ. Карьеры и отвалы показаны на рис. 1.

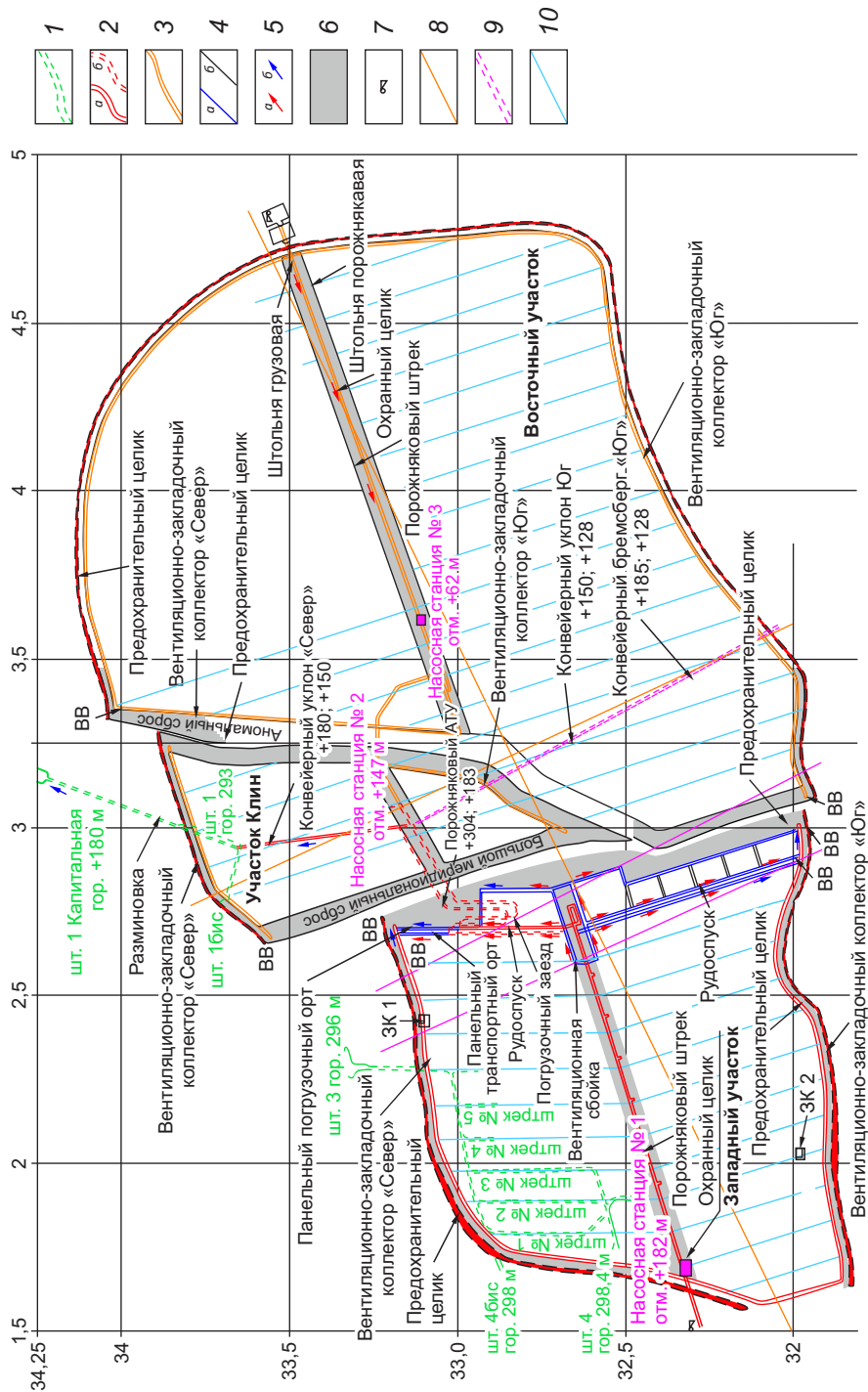


Рис. 2. Схема вскрытия участка Пласт «330»:

1 – существующие выработки; проектируемые выработки ГКР: 2 – I очереди (а – рудные, б – полевые), 3 – II очереди отработки; 4 – проектируемые выработки ГПР (а) и нарезные I очереди отработки (б); 5 – направление движения свежего (а), загрязнённого (б) воздуха; 6 – предохранительные и охранные целики; 7 – главные вентиляторные установки; 8 – линии профилей; 9 – транспортные выработки других частей месторождения; 10 – ширина очистных панелей

Fig. 2. Scheme of Plast 330 area opening

1 – existing workings; projected workings; 2 – stage I (a – ore, b – field), 3 – mining stage II; 4 – projected workings (a) and development workings of mining stage I (b); 5 – pathways of fresh (a), polluted (b) air; 6 – protective pillars; 7 – main ventilators; 8 – profile lines; 9 – transport workings of other deposit parts; 10 – width of stopping panels



Площадь Южносопчинского участка ~ 1,1 км², протяжённость на дневной поверхности – 1,4 км. Рудные тела характеризуются сложной морфологией с чередованием рудных и безрудных участков. Проведёнными буровыми работами рудоносный горизонт прослежен до глубины 350–400 м. Основная часть разреза представлена габброноритами мощностью до 250–300 м с подчинённым количеством маломощных (от первых метров до 10–20 м) горизонтов габбро-пегматитов и пироксенитов.

По геологическим особенностям, вещественному составу руд и условиям их залегания участок идентичен месторождению Вуручуайвенч, что стало основанием для подсчёта запасов по тем же кондициям (окоптурены 12 рудных тел, которые прослежены до глубины 300 м и не окоптурены по падению). Протяжённость отдельных рудных тел достигает 1300 м, по падению – 500–600 м, мощность колеблется от 1 до 27 м. Угол падения рудных тел 20–30°, реже 40–50°. Положение Южносопчинского карьера на момент окончания отработки и геологический разрез по профилю 27 представлены на рис. 4.

Участок Арваренч располагается в 2,2 км от Южносопчинского. На западе он ограничен Юго-Западным сбросом, на востоке – Меридиональным. На участке установлено малосульфидное оруденение, связанное со слабонаклонной к юго-востоку рудной залежью средней мощностью 82 м в габброноритах. Ограниченным объёмом бурения, выполненного для оценки на глубину, зоны сульфидной минерализации с платинометалльным оруденением в 2000 г. объединены в Главную рудную зону. Рудные тела выделяются по данным опробования, характеризуются сложной морфологией, чередованием рудных и безрудных участков.

В связи с недостаточной изученностью участка, сближенностью рудных тел окоптуривание проведено до глубины 250–300 м в обобщённом контуре с применением в подсчёте запасов коэффициента рудоносности. Рудная зона состоит из нескольких (от 4 до 6) сближенных субпараллельных рудных тел, мощность которых изменяется от 0,8 до 69,7 м. По простиранию рудные тела прослеживаются на 1100–

1900 м, по падению на 250–700 м. По падению рудная зона не окоптурена. Карьер Арваренч на момент завершения отработки подобен Южносопчинскому, поэтому в статье он не представлен.

Участок Лойпишнюн Мончетундровского месторождения располагается приблизительно в 4 км от дробильного комплекса на южном склоне г. Сопчуайвенч (см. рис. 1). Он представлен малосульфидным платинометалльным оруденением с мелкой сульфидной вкрапленностью, которая приурочена к тонкорасслоенной верхней части норитовой зоны. На участке условно выделены верхняя и нижняя залежи с весьма невыдержанным оруденением. Залегание рудных тел субсогласно общей расслоенности пород, с крутыми (~ 65–85°) углами падения на юго-запад и с азимутом по простиранию ~ 320°.

Внутреннее строение линзовидных рудных тел, залегающих субсогласно общей расслоенности, сложное – с раздувами и пережимами мощности, пустыми прослоями, качество невыдержанное. При средней мощности рудных тел в первые метры размеры по простиранию изменяются в интервале 30–400 м, по падению – 30–200 м, преобладают мелкие рудные тела.

Согласно ТЭО-2017 участок предполагается отработать открытым способом, при этом границы ОГР определены с применением компьютерного блочного моделирования и программного комплекса Micromine. Контур карьера в предельном положении заверены сопоставлением граничного и контурного коэффициентов вскрыши. Расчёт максимальной производственной мощности по добыче руды выполнен с использованием формулы Тейлора и составил 1000 тыс. т руды в год, потери определены в ~ 3,8 %, а разубоживание руды ~ 11,7 %.

Рудопроявление Ниттис-Кумужья-Травяная. Как отмечено выше, запасы крутопадающих тонких жил на верхних горизонтах НКТ разрабатывались в период с 1936 по 1975 г. До разведкой в 1996–2001 гг. были уточнены характеристики Донной залежи НКТ, с которой связаны условные запасы руды. Эту залежь намечается вскрывать спаренными наклонными выработками – конвейерным (КУ) и автотранспортным уклонами ($\alpha \sim 8^\circ$; $L = 2,6$ км), порта-

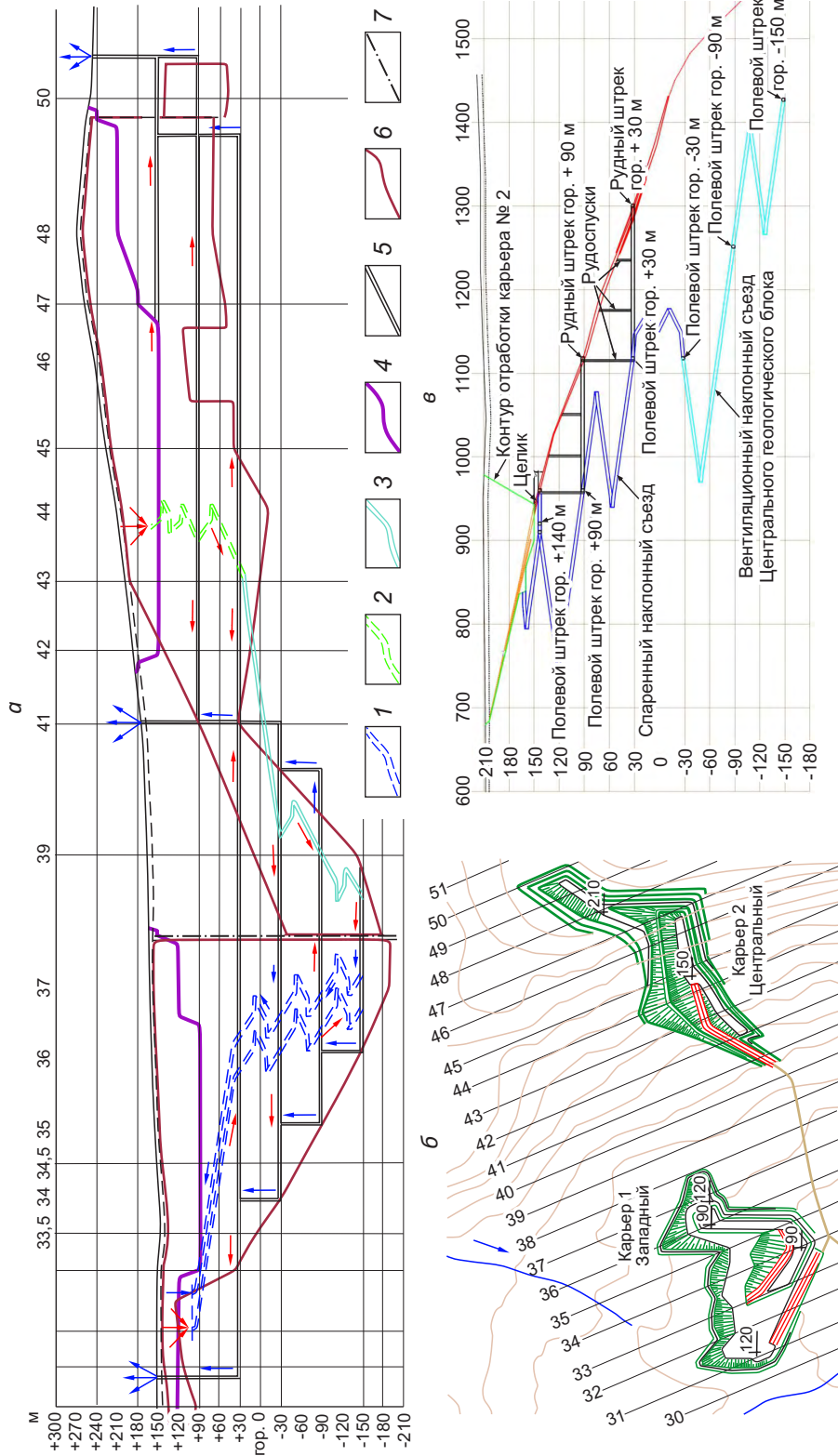


Рис. 3. Схема вскрытия запасов подземного рудника Вуручуайвенч (а – проекция на вертикальную плоскость, б – положение карьеров на участке на конец их отработки, в – схема вскрытия на характерном разрезе по р. п. 44, Центральный блок):

наклонные съезды: 1 – Западного участка, 2 – Центрального; 3 – вентиляционный съезд Центрального участка; 4 – контур отработанных карьеров № 1 и № 2; 5 – вентиляционно-ходовые восстающие (с механическим подъемом); 6 – контур рудного тела; 7 – геологические разломы

Fig. 3. Scheme of underground Vuruchuaivench mine reserves opening (a – vertical projection, b – position of pits within a mining site at the end of their mining, c – opening scheme at a typical section, Central block):

ramps: 1 – West area, 2 – Central; 3 – ventilation ramp of Central area; 4 – outline of mined pits 1 and 2; 5 – ventilation raises (mechanically hoisted); 6 – orebody contour; 7 – geological faults

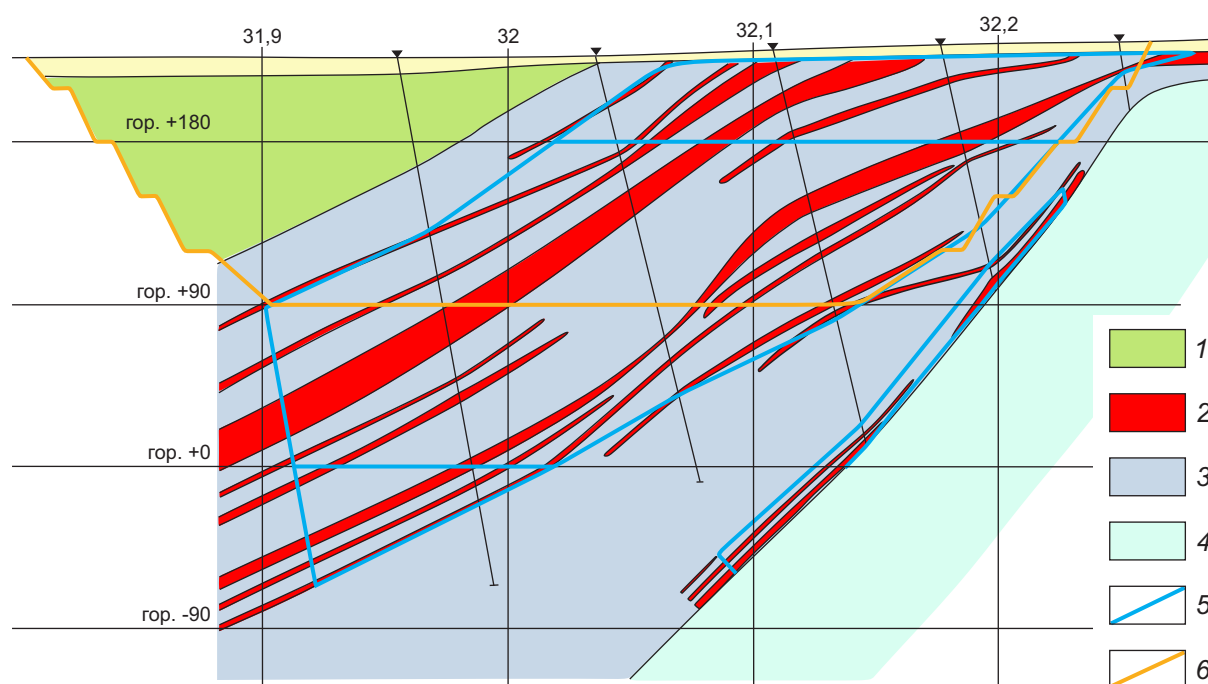


Рис. 4. Положение контура Южносопчинского карьера на момент окончания отработки по геологическому профилю 27:

1 – габбро; 2 – рудные тела; 3 – пироксены; 4 – габбронориты рассланцованные; 5 – подсчётные блоки; 6 – контур карьера

Fig. 4. Position of Yuzhnosopchinsky pit outline at the end of mining across geological profile 27:

1 – gabbro; 2 – ore bodies; 3 – pyroxen; 4 – gabbronorites laid; 5 – calculated blocks; 6 – career contour

лы которых размещаются у ОФ на склоне г. Сопчайвенч (см. рис. 1, объекты 1 и 3).

Залежь в сечении имеет серповидную форму с плоской Центральной частью и наклонными крыльями, Восточным и Западным. Ось залежи погружается с севера на юг на протяжении 3,5–4,0 км до глубины 500 м.

Сперва вовлекаются в отработку ресурсы – условные запасы вкрапленных руд Центральной части Донной залежи, при этом подготовка и очистная выемка проектируются камерной системой разработки с комбинированной закладкой (если над участками Центра расположены жильные зоны, выемка камер Донной залежи ведётся в две стадии).

Отработка крутопадающих жил намечается с использованием малогабаритных (узких, $B \sim 1$ м) машин: бурильные установки с гидро-

перфоратором, а погрузочно-доставочные машины с современным приводом хода (аккумуляторным, дизельным).

Затем приступают к отработке Восточного крыла вкрапленных руд. Наконец, после удлинения главных уклонов на запад, а также строительства Западного рудоспуска и перегрузочного узла отрабатывается Западное крыло [4].

Таким образом, в НКТ предложены системы разработки для двух типов оруденения, мало-мощного жильного крутопадающего и вкрапленного пологозалегающего: для жил – восходящими слоями с закладкой и/или поэтажно-камерная выемкой с закладкой; для вкрапленных руд – камерная и камерно-столбовая с пастовой/твердеющей закладкой.

Изложенные выше схемы вскрытия и намеченный порядок вовлечения объектов Монче-

3. Сводный календарный график отработки эксплуатационных запасов месторождений Лойпишнюн и рудопроявления

3. General schedule of mining reserves exploitation within Vuruchuaivench deposit (Plast 330, Vuruchuaivench,

Годовая производственная мощность по руде, тыс. т

1. Пласт «330», ПГР	160	500	1000	1500	2000	2500	2500	2500	2500	2500
2. Вуручуайвенч, ОГР		90	150	250	500	500	500	500	500	232
3. Вуручуайвенч, ПГР			0	130	250	500	750	750	750	750
4. Южносопчинский, ОГР						100	200	250	250	500
5. Арваренч, ОГР										
6. Ниттис-Кумужья-Травяная, ПГР	0	0	73	240	480	1000	2000	2500	2500	2500
7. Карьер Лойпишнюн, ОГР										18

Всего ОГР и ПГР

Показатели, единицы измерения	За срок отработки	Года отработки									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Руда, тыс. т	166 478	160	590	1223	2120	3230	4600	5950	6500	6500	6500
Ni, т	541 426	641	2186	4625	7817	11 618	16 489	21 443	23 669	23 669	23 417
Pt, кг	42 357	26	121	249	467	769	1114	1511	1664	1664	1631
Pd, кг	147 548	109	623	1207	2351	3995	5538	7109	7547	7547	6993
Средние содержания металлов											
Ni, %	0,325	0,399	0,371	0,378	0,369	0,360	0,358	0,360	0,364	0,364	0,360
Pt, г/т	0,254	0,161	0,205	0,203	0,220	0,238	0,242	0,254	0,256	0,256	0,251
Pd, г/т	0,886	0,680	1,056	0,987	1,109	1,237	1,204	1,195	1,161	1,161	1,076

горского рудного района в отработку учтены в календарном графике, при этом эксплуатационные запасы пересчитаны с учётом показателей потерь и разубоживания, которые утверждены в ТЭО и апробированы ЦНИГРИ.

В первую очередь намечено освоение участка Пласт «330» (≈ 60 млн т руды, 192,9 тыс. т Ni и 32,8 т Pd), начиная с Западного участка. При его вскрытии, подготовке и очистной выемке на южном склоне г. Сопчуайвенч строится портал конвейерного бремсберга «Юг», а также ДК для приёма руды с участков Вуручуайвенч, Южносопчинский и Арваренч, обеспечивающих эффективный транспорт руды к ОФ (см. рис. 1, объект 16).

Во вторую очередь вовлекается в отработку участок Вуручуайвенч с повышенным содержанием Pd ≈ 2,9 г/т: вначале карьеры № 1 и

№ 2, а позже – подземный рудник, с конвейерным транспортом руды к ОФ через ДК. Затем вводятся в эксплуатацию карьеры Южносопчинский и Арваренч с выдачей руды автосамосвалами к ДК и далее на ОФ.

В последующие годы отрабатываются запасы карьера Лойпишнюн.

В первые годы освоения объектов ГОКа параллельно намечена проходка вскрывающих выработок НКТ: КУ и АТУ, наклонного вентиляционного ствола на севере, а также выработка в Центре Донной залежи. Подземный рудник выходит на проектную производительность на 8-й год и завершает отработку запасов до глубины 500 м за 36 лет [4].

При отработке запасов подземных рудников применяются камерные и камерно-целиковые системы разработки с твердеющей/пас-



Вуручайвенч (участки Пласт «330», Вуручайвенч, Южносопчинский, Арваренч), Ниттис-Кумужья-Травяная

Yuzhnosopchinsky and Arvarench areas), Loipishnyun deposit and Nittis-Kumuzhya-Travyanaya occurrence

Годовая производственная мощность по руде, тыс. т										Отработаны за 20 лет	Отработаны после 20 лет
2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	42 660	14 554
116										3338	0
750	750	750	620	308						7058	0
500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	6300	3709
									0	0	18 145
2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	36 293	20 839
134	250	250	380	692	1000	1000	1000	1000	1000	6724	6857
Всего ОГР и ПГР											
Года отработки										За 20 лет	После 20 лет
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	1–21	21–44
6500	6500	6500	6500	6500	6500	6500	6500	6500	6500	102 373	64 105
23 251	23 085	23 085	22 910	22 493	22 080	22 080	22 080	22 080	22 080	360 797	180 629
1642	1652	1652	1677	1734	1792	1792	1792	1792	1792	26 533	15 824
6722	6450	6450	6192	5576	4966	4966	4966	4966	4966	99 240	48 308
Средние содержания металлов											
0,358	0,355	0,355	0,352	0,346	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,352	0,282
0,253	0,254	0,254	0,258	0,267	0,276	0,276	0,276	0,276	0,276	0,259	0,247
1,034	0,992	0,992	0,953	0,858	0,764	0,764	0,764	0,764	0,764	0,969	0,472

товой закладкой на основе хвостов обогащения, при этом большая часть хвостов размещается в отработанных выработках, снижая деформации поверхности, а также размер дефицитной площади под хвостохранилище. С учётом намеченной производительности ОФ намечается строительство пяти закладочных комплексов на площадях подземных рудников.

Сводный календарный график отработки объектов Мончегорского рудного района, привлечённых к настоящей оценке, предусматривает последовательное вовлечение в отработку запасов с учётом их доступности, а также качества руд для последующей переработки на ОФ по флотационной схеме. Общая производственная мощность ГОКа и ОФ с учётом очередности ввода объектов в эксплуатацию определена в 6500 тыс. т в год (табл. 3).

Экономические и финансовые показатели. В основу расчётов положены запасы по пяти объектам, утверждённые ГКЗ, по одному объекту – ресурсы, апробированные ЦНИГРИ в соответствии с календарным графиком ведения горных работ.

Переработку руды предусматривается производить на ОФ, расположенной на участке Пласт «330», с годовой производительностью по руде 6,5 млн т по флотационной схеме. В результате будет получен коллективный концентрат, содержащий платиноиды, кобальт, медь, никель и золото, который направляется на дальнейшую металлургическую переработку. В качестве товарной продукции рассматриваются палладий, платина, никель, медь, кобальт, золото. Суммарный вес стоимости палладия, платины, никеля в общей стоимости товарной про-

4. Результирующие финансовые показатели эксплуатации платинометаллических руд Мончегорского рудного района в современных условиях

4. Resulting economics of Monchegorsky ore district PGM ores mining in current conditions

Показатели	Ед. изм.	Всего по 6 объектам
Эксплуатационные запасы:		
руда	тыс. т	166 478
платина + палладий	т	190
никель	тыс. т	541
Годовая производительность по руде	тыс. т	6500
Выпуск металлов за весь срок эксплуатации:		
платина + палладий	т	138
никель	т	327
Срок обеспеченности предприятия запасами	лет	44
Инвестиционные расходы за 20-летний период отработки запасов	млн руб.	48 572
Инвестиционные расходы за весь период отработки запасов	млн руб.	59 739
Стоимость товарной продукции:		
- за 20-летний период эксплуатации, всего	млн руб.	564 862
в том числе:		
платина + палладий	млн руб.	270 729
никель	млн руб.	194 425
- за весь период эксплуатации, всего	млн руб.	854 252
в том числе:		
платина + палладий	млн руб.	406 135
никель	млн руб.	291 831
Извлекаемая ценность 1 т руды		
- средняя за 20 лет	руб.	5518
- за весь период эксплуатации	руб.	5131
Эксплуатационные расходы за 20-летний период отработки	млн руб.	320 958
Эксплуатационные расходы за весь срок отработки запасов	млн руб.	489 978
Затраты на 1 руб. товарной продукции	руб.	0,57
Доход предприятия за 20-летний период эксплуатации	млн руб.	183 625
Доход предприятия за весь период эксплуатации	млн руб.	294 335
Внутренняя норма доходности	%	38 %
Срок окупаемости первоначальных капитальных вложений (с начала строительства)		
чистой прибылью + амортизация (без учёта дисконтирования/ с учётом дисконтирования)	лет	7,07/7,4

дукции составляет 82 %, поэтому в табл. 4 для наглядности приведены данные только по этим металлам.

Цены на полезные компоненты приняты как средние сложившиеся на мировом рынке за 2019 г.: палладий – 3209 руб./г, платина – 1797 руб./г, никель – 892 тыс. руб./т, медь – 386 тыс. руб./т, кобальт – 2050 тыс. руб./т, золо-

то – 2902 руб./г [5, 6]. Инвестиционные и эксплуатационные расходы определены на основе выполненных ранее ТЭО кондиций с использованием соответствующих индексов-дефляторов.

Результирующие финансовые показатели эксплуатации объектов платинометаллических руд Мончегорского рудного района рассчитаны



по методике, рекомендованной ГКЗ [1]: денежный доход за 20-летний период эксплуатации – 183 625 млн руб., за весь период эксплуатации – 294 335 млн руб.; внутренняя норма доходности – 38 %; размер инвестиционных вложений – 59 739 млн руб., которые окупаются за семь лет (без учёта дисконтирования) (см. табл. 4).

Выводы и рекомендации:

- в результате выполненной укрупнённой геолого-экономической оценки платинометалльных объектов Мончегорского рудного района можно утверждать, что в современных условиях месторождение Вуручайвенч (с участками Пласт «330», Южносопчинский, Арваренч), а также рудопроявление НКТ и участок Лойпишнюн в общем ГОКе могут быть отработаны высокорентабельно и представляют коммерческий интерес;
- в составе объектов имеется участок Пласт «330» с упрощённым доступом к руде, а также

обогащённый металлами платиновой группы участок Вуручайвенч ($\Sigma[\text{Pt} + \text{Pd}] \approx 3,29$ г/т, в том числе $\text{Pd} \approx 2,9$ г/т), что позволяет ожидать быстрой окупаемости капитальных вложений;

- рекомендуется выполнить доразведку глубоких горизонтов месторождения Вуручайвенч с подсчётом запасов;
- оценить состояние разведочного ствола, который был пройден на массив жильной Сопчи ниже Пласта «330», а также возможности селективной отработки этого жильного массива с использованием современного проходческого и малогабаритного оборудования;
- выполнить отдельно ТЭО кондиций для рудопроявления Ниттис-Кумужья-Травяная;
- на основе дополнительных данных разведки перечисленных объектов с учётом новых сведений о рудопроявлении Поаз разработать ТЭС долгосрочного развития Мончегорского рудного района.

Список литературы:

1. *Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов* : утверждены Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ, Госстроем РФ от 21.06.1999, № ВК 477.
2. *Нормы технологического проектирования горнодобывающих предприятий с подземным способом разработки*. ВНТП 13-2-93 : утверждены Комитетом РФ по металлургии (протокол от 27.01.93, № 1) по согласованию с Госгортехнадзором РФ (протокол от 13.12.92, № 4). – СПб. : Институт «Гипроруда», 1993. – 203 с.
3. *Нормы технологического проектирования рудников цветной металлургии с подземным способом разработки*. ВНТП 37-86 : утверждены протоколом Минцветмета СССР от 12.02.1986, № 48. – Л. [СПб.] : Институт «Гипроруда», 1986. – 212 с.
4. *Рогизный В. Ф., Куликов Д. А., Мигачёв И. Ф., Донец А. И.* Вскрытие и отработка платино-палладиево-медно-никелевых руд участка Ниттис-Кумужья-Травяная // *Руды и металлы*. – 2020. – № 4. – С. 11–21.
5. *Цена Дайджест*. – М., Цена-информ, 2017–2019.
6. *Цены российского и мирового товарных рынков*. М. : ВНИКИ, 2017–2019.

References:

1. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh projektov* [Methodical recommendations for assessing the effectiveness of investment projects], Ministerstvo ekonomiki RF, Ministerstvo finansov RF, Gosstroj RF (ed.) 21.06.1999, № VK 477.
2. *Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya gornodobyvayushchikh predpriyatii s podzemnym sposobom razrabotki*. VNTP 13-2-93 [Technological design standards of mining enterprises with an underground method of development. VNTP 13-2-93], Komitet RF po metallurgii (protokol ot 27.01.93, № 1), Gosgortekhnadzor RF (protokol ot 13.12.92, № 4) (ed.), St. Petersburg, Institut “Giproruda” Publ., 1993, 203 p.
3. *Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya rudnikov tsvetnoi metallurgii s podzemnym sposobom razrabotki*. VNTP 37-86 [Norms of technological design

of non-ferrous metallurgy mines with underground development. VNTP 37-86], Mintsvetmet SSSR (ed.), 12.02.1986, № 48, St. Petersburg, Institut “Giproruda” Publ., 1986, 212 p.

4. Rogiznyi V. F., Kulikov D. A., Migachev I. F., Donets A. I. Vskrytie i otrabotka platino-palladiovo-medno-nikelevykh rud uchastka Nittis-Kumuzh'ya-Travya-

naya [Opening and mining of Pt-Pd-Cu-Ni ores, Nittis-Kumuzhiya-Travyanaya area], *Rudy i Metally* [Ores and Metals], 2020, No 4, pp.11–21. (In Russ.).

5. Tsena Daidzhest, Moscow, Tsena-inform Publ., 2017–2019.
6. Tseny rossiiskogo i mirovogo tovarnykh rynkov, Moscow, VNIKI Publ., 2017–2019.

Авторы

Рогизный Валерий Фёдорович

кандидат технических наук
ведущий научный сотрудник
rogizny@tsnigri.ru

Куликов Данила Алексеевич

кандидат геолого-минералогических наук
заведующий отделением минерально-сырьевой базы
kulikov@tsnigri.ru

Карпухина Мария Викторовна

ведущий научный сотрудник
karpukina@tsnigri.ru

Черемисин Алексей Аркадьевич

кандидат геолого-минералогических наук

Хромов Василий Михайлович

ведущий инженер
hromov@tsnigri.ru

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

Authors

Rogizny Valery Fedorovich

PhD
leading researcher
rogizny@tsnigri.ru

Kulikov Danila Alekseevich

PhD
Head of mineral base department
kulikov@tsnigri.ru

Karpukhina Maria Viktorovna

leading researcher
karpukina@tsnigri.ru

Cheremisin Alexey Arkadyevich

PhD

Khromov Vasily Mikhailovich

leading engineer
hromov@tsnigri.ru

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



СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.462'43'41 (571.52)

Геологическое строение, рудно-метасоматическая и минералого-геохимическая зональность золотосодержащего молибден-медно-порфирового месторождения Кызык-Чадр, Республика Тыва

Geological structure, ore-metasomatic and mineralogical geochemical zoning of Au-Mo-Cu porphyry Kyzyk-Chadr deposit, Tyva republic

Андреев А. В., Гирфанов М. М.,
Старостин И. А., Авилова О. В., Кряжев С. Г.,
Юрмазов Д. Н., Бабкин И. А., Семёнов М. И.

Andreev A. V., Girfanov M. M.,
Starostin I. A., Avilova O. V., Kryazhev S. G.,
Yurmazov D. N., Babkin I. A., Semenov M. I.

Рассмотрены основные черты геологического строения, вещественный состав руд и метасоматитов, рудно-метасоматическая и изотопно-геохимическая зональность золотосодержащего молибден-медно-порфирового месторождения Кызык-Чадр одноимённого рудного узла Ожинского рудного района Алтае-Саянской минерагенической провинции. Установлен комплекс геолого-поисковых признаков – элементов геолого-поисковой модели месторождения, который может быть использован для повышения эффективности проведения дальнейших геологоразведочных работ в пределах перспективных площадей Саяно-Алтайского региона.

Ключевые слова: золотосодержащее молибден-медно-порфировое оруденение, Алтае-Саянская провинция, Кызыкчадрский рудный узел, месторождение Кызык-Чадр, рудно-метасоматическая зональность, геолого-поисковые признаки.

Major geological structure features, ore and metasomatic composition, ore-metasomatic and isotope-geochemical zoning are considered for Kyzyk-Chadr deposit within the namesake ore cluster of Ozhinsky ore district, Altai-Sayany mineragenic province. A set of geological and prospecting evidence (elements of the deposit geological and prospecting model) was defined; it can be used to improve the efficiency of further exploration within Sayany-Altai region prospects.

Keywords: Au-rich Mo-Cu porphyry mineralization, Altai-Sayany province, Kyzyk-Chadr deposit, ore-metasomatic zoning, geological and prospecting evidence.

Для цитирования: Андреев А. В., Гирфанов М. М., Старостин И. А., Авилова О. В., Кряжев С. Г., Юрмазов Д. Н., Бабкин И. А., Семёнов М. И. Геологическое строение, рудно-метасоматическая и минералого-геохимическая зональность золотосодержащего молибден-медно-порфирового месторождения Кызык-Чадр, Республика Тыва. Руды и металлы. 2021. № 1. С. 57–76. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10004.

For citation: Andreev A. V., Girfanov M. M., Starostin I. A., Avilova O. V., Kryazhev S. G., Yurmazov D. N., Babkin I. A., Semenov M. I. Geological structure, ore-metasomatic and mineralogical geochemical zoning of Au-Mo-Cu porphyry Kyzyk-Chadr deposit, Tyva republic. Ores and metals, 2021, № 1, pp. 57–76. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10004.

Золотосодержащее молибден-медно-порфировое месторождение (потенциальное месторождение) Кызык-Чадр выявлено и оценено в пределах Кызыкчадрского рудного узла Ожинского рудного района Алтае-Саянской минерагенической провинции. Месторождение открыто в 1951 г., опосредованно и разведывалось до 1977 г. В разные годы изучалось Э. Л. Варандом (1955–1956), Р. Т. Уссаром (1976–1977), М. И. Семёновым (2009–2015) и другими геологами. Из-за недостаточно высокого качества руд и удалённости от промышленных центров объект к освоению не привлекался. Ситуация принципиально изменилась в связи с началом строительства железной дороги Курагино-Кызыл (рис. 1), проходящей в 50 км к западу от месторождения. В 2017–2019 гг. после длительного перерыва на объекте были проведены ревизионные поисковые и оценочные работы силами АО «Сибирское ПГО» (подразделение АО «Росгеология») при участии ФГБУ «ЦНИГРИ» и ряда других организаций. Работы выполнены за счёт средств федерального бюджета. В результате на месторождении Кызык-Чадр оценены и апробированы прогнозные ресурсы меди кат. P_1 – 580 тыс. т, кат. P_2 – 290 тыс. т со средними содержаниями (C_{cp}) 0,34 %; молибдена кат. P_1 – 25 тыс. т, кат. P_2 – 12,5 тыс. т, C_{cp} – 0,015 %; золота кат. P_1 – 26,6 т, кат. P_2 – 13,2 т, C_{cp} – 0,156 г/т; серебра кат. P_1 – 132 т, кат. P_2 – 66 т, C_{cp} – 0,77 г/т.

В составе выполненного широкого комплекса геологоразведочных работ проведены специализированные геолого-минералого-геохимические исследования, позволившие уточнить вещественный состав руд и метасоматитов, выявить закономерности зонального строения рудно-метасоматического ореола месторождения Кызык-Чадр, позиции в нём меднорудной зоны и промышленного рудного тела.

Кызыкчадрский рудный узел (рис. 2) расположен в пределах Ожинского рудного района Алтае-Саянской минерагенической провинции, в области сочленения структур трёх разновозрастных складчатых систем: Западно-Саянской каледонской, Восточно-Тувинской салаиро-каледонской и наложенного герцинского Центрально-Тувинского прогиба [11]. Ожинский рудный район отвечает магматогенному

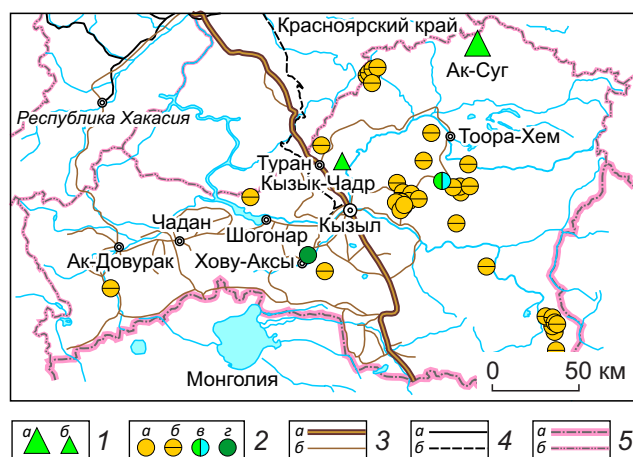


Рис. 1. Схема расположения месторождений цветных и благородных металлов на территории Республики Тыва:

1 – медно-порфировые месторождения: а – крупные, б – средние; 2 – прочие месторождения: а – золота коренного, б – золота россыпного, в – полиметаллов, г – кобальта; 3 – автомобильные дороги: а – федеральная Р257 «Енисей», б – прочие; 4 – железные дороги: а – действующие, б – проектируемые; 5 – административные границы: а – государственная, б – субъектов РФ

Fig. 1. Layout of base and precious metal deposits within Tyva Republic:

1 – porphyry copper deposits: а – major, б – medium-sized; 2 – other deposits: а – primary gold, б – placer gold, в – base metals, г – cobalt; 3 – highways: а – federal P257 “Yenisei”, б – projected; 4 – iron roads: а – active, б – projected; 5 – administrative borders: а – national, б – Russian subjects

палеоподнятию, сформированному одноимённым полиформационным плутоном неправильной овальной формы, который протягивается на 55 км в широтном направлении, достигая 16 км в поперечнике. Плутон сложен породами таннунского интрузивного комплекса габбро-плагиогранитовой формации среднего кембрия, вмещающими малые интрузии кызыкчадрского комплекса габбро-диорит-гранодиорит-гранитовой формации среднего–позднего кембрия (возраст комплексов по [4]), и прорывает вендраннекембрийские метаморфизованные вулканогенно-осадочные образования туматтайгинской толщи. Вулканогенных образований,

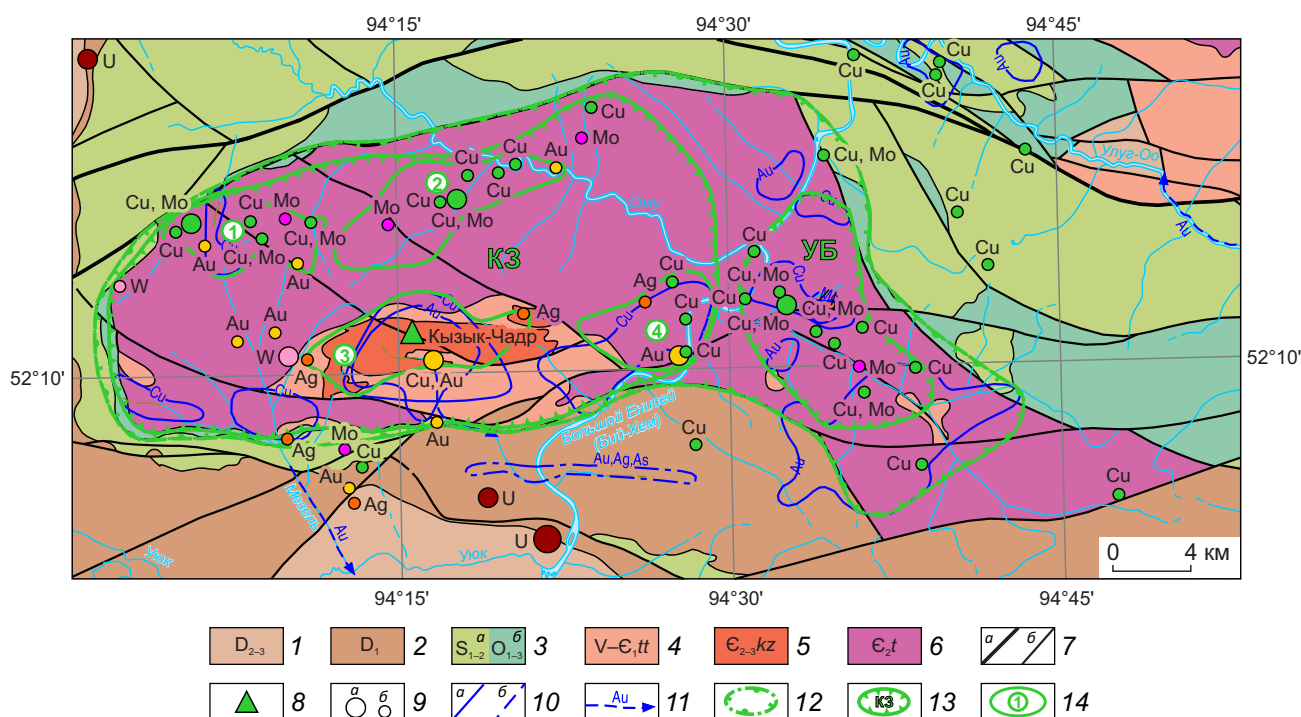


Рис. 2. Геологическая карта Ожинского рудного района, по материалам ГКК-200 (М. И. Семёнов и др., 2015 г.), [3]:

стратифицированные образования: 1 – терригенно-карбонатные озёрно-лагунные отложения Уюкской наложенной впадины (D_{2-3}), 2 – трахиандезибазальт-дацит-трахириолитовый кендейско-саглинский осадочно-вулканический комплекс Центрально-Тувинского прогиба (D_1), 3 – карбонатно-терригенные отложения Систигхемского прогиба (a – молассоидные (S_{1-2}), b – флишоидные (O_{1-3})), 4 – вулканогенно-терригенные метаморфизованные образования Ожинского выступа, туматтайгинская свита ($V-C_{1tt}$); интрузивные образования Ожинского выступа: 5 – габбро-диорит-гранитовый кызыкчадрский комплекс ($E_{2-3}kz$), продуктивный на золото-молибден-медно-порфировое оруденение, 6 – диорит-тоналит-плагиигранитовый таннуольский комплекс (E_2t); 7 – тектонические нарушения: a – главные, b – оперяющие; 8 – золотосодержащее молибден-медно-порфировое месторождение Кызык-Чадр; 9 – прочие рудные объекты: a – рудопроявления, b – пункты минерализации (состав оруденения показан цветом и условными знаками основных полезных компонентов); 10 – литохимические ореолы рассеяния: a – в коренных породах, b – в рыхлых отложениях; 11 – потоки рассеяния золота; контуры металлогенических таксонов: 12 – Ожинский золото-молибден-меднорудный район, 13 – рудные узлы (КЗ – Кызыкчадрский, УБ – Улубгусский (прогнозируемый)), 14 – рудные поля (1 – Тараскырское, 2 – Глухариное, 3 – Кызыкчадрское, 4 – Бийхемское)

Fig. 2. Geological map of Ozhinsky ore district, based on SGM-200 (M. I. Semenov et al., 2015), [3]:

stratified units: 1 – terrigenous-carbonate lacustrine-lagoonal deposits of Uyukskaya superimposed trench (D_{2-3}), 2 – trachyandesite-basalt-dacite-trachyrhyolite Kendeisky-Saglinsky volcanosedimentary complex of Central Tuva trough (D_1), 3 – carbonate-terrigenous sediments of Sistighemsky trough: (a – molassoid (S_{1-2}), b – flyshoid (O_{1-3})), 4 – volcanogenic-terrigenous metamorphosed units of Ozhinsky inlier, Tumattaiginskaya suite ($V-C_{1tt}$); intrusive units of Ozhinsky inlier: 5 – gabbro-diorite-granite Kyzyk-Chadr assemblage ($E_{2-3}kz$) productive for Au-Mo-Cu porphyry mineralization, 6 – diorite-tonalite-plagiogranite Tannuolsky complex (E_2t); 7 – tectonic deformations: a – major, b – feathering; 8 – Au-Mo-Cu porphyry Kyzyk-Chadr deposit; 9 – other ore deposits: a – occurrences, b – mineralization points (mineralization composition is shown in color and major metal symbols); 10 – lithochemical dispersion halos: a – in primary rocks, b – in loose sediments; 11 – gold dispersion flows; contours of metallogenic taxa: 12 – Ozhinsky Au-Mo-Cu ore district, 13 – ore clusters (K3 – Kyzyk-Chadr, UB – Ulubgussky (forecast)), 14 – ore fields (1 – Taraskyrskoye, 2 – Glukharinoye, 3 – Kyzyk-Chadr, 4 – Bikhemskoye)

образующих вулканоплутонические ассоциации (ВПА) с перечисленными выше плутонитами, на территории рудного узла не выявлено.

Известные в пределах Ожинского плутона проявления медно-порфирового оруденения, объединяемые в Кызыкчадрский рудный узел, пространственно связаны с телами кызыкчадрского интрузивного комплекса [3, 4, 10, 11]. Последние образуют вытянутый в субширотном направлении ареал общей площадью ~ 150 км². Интрузивные тела габбро-диорит-гранодиорит-гранитного комплекса сопровождаются зонально построенными полями гидротермальных изменений (серицитизация, окварцевание, альбитизация, хлоритизация, калишпатизация), вторичными и первичными геохимическими аномалиями Cu и её элементов-спутников – Mo, Pb, Zn, Au, Ag, Sb, As и др. В геофизических полях узел выделяется градиентными зонами магнитного и гравитационного полей, маркирующими интрузивные массивы и рудоконтролирующие тектонические нарушения.

В пределах полей метасоматитов располагаются известные рудопроявления и пункты штокверковой, жильно-прожилковой и вкрапленной минерализации меди и молибдена медно-молибден-порфировой формации и сопряжённые с ними участки кварцевой, карбонатно-кварцевой жильной и жильно-прожилковой золотоносной минерализации. Известны шлиховые пробы с единичными знаками золота.

В пределах Кызыкчадрского рудного узла по совокупности поисковых признаков выделено несколько потенциальных рудных полей, наиболее изученным из которых на настоящий момент является Кызыкчадрское рудное поле (см. рис. 2). Помимо основного объекта – месторождения Кызык-Чадр – оно включает ряд слабоизученных проявлений и пунктов штокверковой (молибден)-медной прожилково-вкрапленной и жильной (жильно-прожилковой) золотосульфидно-кварцевой минерализации, сопровождающихся крупными ореолами метасоматических изменений комплексного состава. В геохимических полях выделяемые рудные поля оконтуриваются как аномальные зоны, образованные сближенными контрастными концентрически зональными комплексными

первичными и вторичными ореолами рассеяния основных элементов-индикаторов медно-порфирового оруденения – Cu (0,01–0,6 %), Mo (0,001–0,02 %), Au (0,01–0,3 г/т), а также элементов-спутников – Ag, Pb, Zn, As, Sb, Bi, Co и др.

Кызыкчадрское рудное поле (рис. 3) локализовано в пределах одноимённого массива продуктивного кызыкчадрского интрузивного комплекса габбро-диорит-гранодиорит-гранитной формации южной краевой части Ожинского плутона, в участке пересечения разноориентированных оперяющих разрывных нарушений системы субширотного Хемчикско-Азасского глубинного разлома [3]. В плане Кызыкчадрский массив имеет линзовидную, выпуклую к северу форму, вытянут в субширотном направлении на 12,5 км при ширине около 3 км. Для массива характерен широкий диапазон дифференциации магматических образований как по составу, так и по текстурно-структурным особенностям. Отметим, что интенсивные тектоническая проработка и метасоматические изменения значительно затрудняют достоверную диагностику исходных петрографических разностей пород кызыкчадрского комплекса.

Главные фазы комплекса представлены среднезернистыми, часто неравномернозернистыми габбро, габбродиоритами, диоритами, кварцевыми диоритами, монцодиоритами, гранодиоритами, гранитами при преобладающей роли кислых дифференциатов.

В составе продуктивного интрузивного комплекса широко распространены порфировые породы, слагающие малые пластинообразные и дайкообразные тела, прорывающие гранитоиды главных фаз. Выделено несколько разновидностей порфировых пород: диоритовые порфириты, кварцевые диоритовые порфириты, монцодиорит-порфириты, гранодиорит-порфиры, а также «кварцевые порфиры» гранит-порфирового состава, которые могут рассматриваться совместно в составе единой «порфировой фазы» кызыкчадрского комплекса.

Стержневой структурой рудного поля является расположенный в центральной части массива сложно построенный порфировый интрузив, образованный сближенными в пространстве пластинообразными и дайкообразными

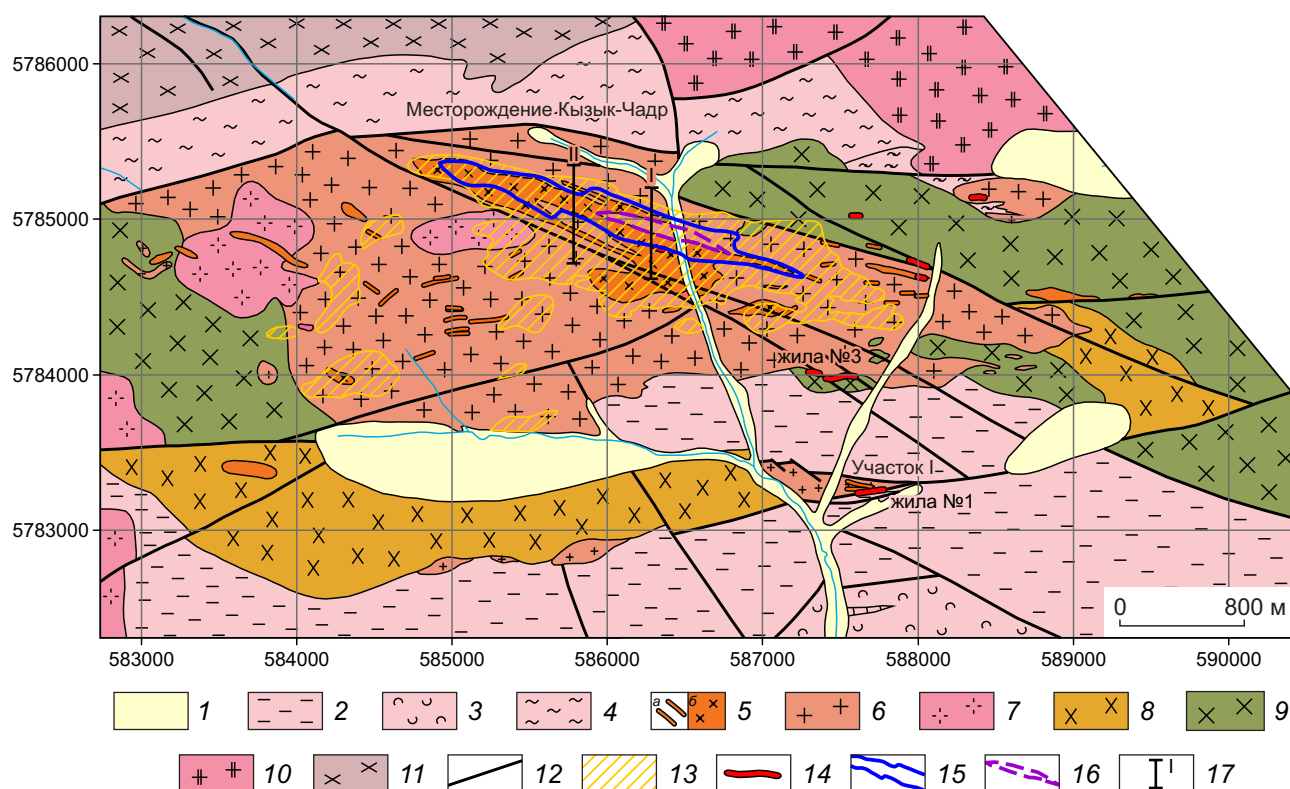


Рис. 3. Геологическая карта центральной части Кызыкчадрского рудного поля, по материалам предшествующих ГРП (Р. Т. Уссар, 1978 г.), с изменениями и дополнениями:

1 – аллювиальные и пролювиальные образования; туматтайгинская свита ($V-C_1t$): 2 – песчаники и алевролиты пестроцветные, 3 – туфы, туфобрекчии, туфоконгломераты с прослоями лав среднего состава, алевролитов, песчаников, 4 – мигматиты, гнейсы и сланцы; кызыкчадрский габбро-диорит-гранодиорит-гранитовый комплекс ($C_{2-3}kz$), продуктивный на медно-порфировое и золото кварцевое оруденение: 5 – кварцевые диорит-порфиры, гранодиорит-порфиры, кварцевые порфиры, нерасчленённые (рудноносные фазы) (а – отдельные дайки, б – порфировый интрузив, образованный сближенными в пространстве дайкообразными телами порфировых пород различного состава), 6 – граниты, 7 – гранодиориты, 8 – кварцевые монзодиориты, 9 – диориты, габбродиориты; таннуольский габбро-плагиогранитный комплекс (C_1t): 10 – плагиограниты, тоналиты, 11 – диориты, кварцевые диориты; 12 – разрывные нарушения; 13 – участки интенсивных метасоматических изменений и сульфидной минерализации; 14 – кварцевые жилы, в том числе золотоносные; 15 – контур меднорудного тела по бортовому содержанию Cu 0,2 %; 16 – контур наиболее богатой части рудного тела по бортовому содержанию Cu 0,4 %; 17 – линии геологических разрезов

Fig. 3. Geological map of central Kyzyk-Chadr ore field, based on previous exploration (R. T. Ussar, 1978), modified and updated:

1 – alluvial and proluvial units; Tumatginskaya suite ($V-C_1t$): 2 – mottled sandstones and aleurolites, 3 – tuffs, tuff breccias, tuff conglomerates banded with intermediate lavas, aleurolites and sandstones, 4 – migmatites, gneisses and schists; Kyzyk-Chadr gabbro-diorite-granodiorite-granite assemblage ($C_{2-3}kz$) productive for porphyry copper and gold-quartz mineralization: 5 – quartz diorite-porphyrites, granodiorite porphyries, quartz porphyries, undivided (ore-bearing phases) (a – individual dikes, b – porphyry intrusive formed by spatially adjacent dike-like bodies of variably composed porphyry rocks), 6 – granites, 7 – granodiorites, 8 – quartz monzodiorites, 9 – diorites, gabbrodiorites; Tannuolsky gabbro-plagiogranite complex (C_1t): 10 – plagiogranites, tonalities, 11 – diorites, quartz diorites; 12 – ruptures; 13 – areas of advanced metasomatic alteration and sulfide mineralization; 14 – quartz veins including gold-bearing ones; 15 – contour of copper orebody based on Cu cutoff (0.2%); 16 – contour of the highest grade orebody portion based on Cu cutoff (0.4%); 17 – geological section lines

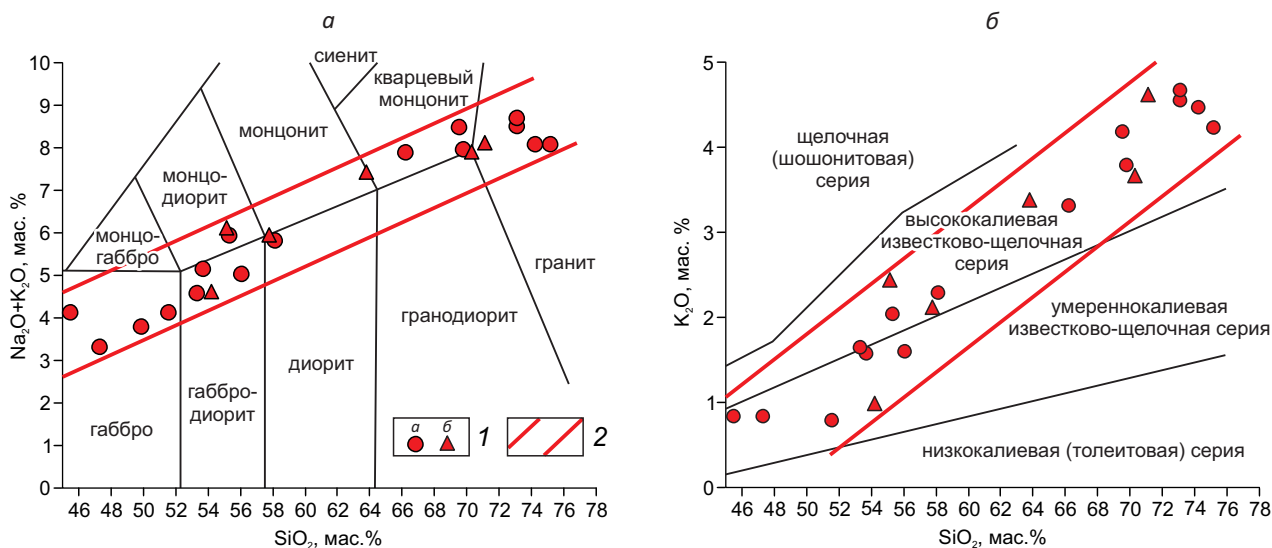


Рис. 4. Петрохимический состав пород кызыкчадрского интрузивного комплекса на диаграммах TAS (а) и $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ (б):

1 – фигуративные точки пород: главных фаз (а), порфировых фаз (б); 2 – поля фигуративных точек

Fig. 4. Petrochemical rock composition of Kyzyk-Chadr intrusive complex in diagrams TAS (a) and $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ (b):

1 – figurative rock points: main phases (a), porphyry phases (b); 2 – figurative point fields

телями порфировых пород различного состава (преимущественно гранодиорит- и гранит-порфиры). Порфировый интрузив имеет неправильную плитообразную форму, вытянут в западно-северо-западном направлении на 2,5 км при ширине 50–500 м, имеет крутое, до вертикального, падение и располагается в целом согласно основным дизъюнктивным нарушениям рудного поля. Штокверковое золотосодержащее молибден-медно-порфировое оруденение месторождения Кызык-Чадр, сопровождающееся интенсивными метасоматическими преобразованиями, приурочено к экзо-эндоконтактной зоне рудоносного порфирового интрузива и контролируется зонами трещиноватости и расланцевания в гранитоидах главных фаз продуктивного комплекса.

По своим петрохимическим характеристикам породы кызыкчадрского комплекса относятся к породам известково-щелочной серии с повышенной калиевой щёлочностью. Они формируют петрохимический ряд с постепенным

возрастанием доли K_2O и общей щёлочности от основных разновидностей к кислым (рис. 4). Рудоносные гранодиорит- и гранит-порфиры по химическому составу полностью соответствуют кислым дифференциатам главных фаз кызыкчадрского комплекса. Породы таннуольского комплекса, слагающие большую часть Ожинского плутона к северу от Кызыкчадрского рудного узла, характеризуются гораздо более низкими значениями K_2O и общей щёлочности, а также рядом других петрохимических параметров [3], что позволяет чётко отделить от них породы продуктивного кызыкчадрского комплекса, в том числе их рудоносные порфировые фазы.

По своему химическому составу породы кызыкчадрского комплекса схожи с породами других интрузивных комплексов, с которыми связан ряд известных медно- и молибден-порфировых месторождений Сибирского региона и Монголии – Жирикенское, Сорское, Эрдентуин-Обо [12].



Пострудные дайки, широко распространённые в пределах Кызыкчадрского рудного узла, представлены диоритовыми порфиритами, андезитами и долеритами, которые часто затруднительно отнести к тому или иному интрузивному комплексу.

Установленные минералого-петрографические и петрохимические характеристики можно использовать для идентификации образований рудоносного кызыкчадрского комплекса в составе Ожинского плутона (в том числе по ретроспективным петрохимическим данным) и выделения на этой основе новых поисковых участков, перспективных на медно-порфировое оруденение.

В геофизических полях Кызыкчадрское рудное поле характеризуется чередованием участков повышенного и пониженного магнитного поля, отражающим сочетание зон гидротермальных изменений и рудной минерализации различных типов, а также аномалиями ВП, фиксирующими мощные зоны сульфидизации (пиритизации), развитые преимущественно на флангах штокверковых рудных тел.

Месторождение Кызык-Чадр – основной объект Кызыкчадрского рудного узла, традиционно относится по комплексу признаков к золото-молибден-медно-порфировому геолого-промышленному типу [3, 4, 10, 11]. Месторождение располагается в наиболее интенсивно дислоцированной осевой части зоны субширотного глубинного разлома, сопровождаемого серией оперяющих тектонических нарушений различного порядка, выраженных зонами трещиноватости, катаклаза, милонитизации, рассланцевания, брекчирования. Площадь месторождения сложена преимущественно среднезернистыми гранитами кызыкчадрского комплекса, прорванными сложно построенным порфировым интрузивом, его апофизами и дайками. В краевой части интрузива присутствуют разрозненные тела приконтактовых эксплозивных брекчий, что предполагает относительно малый эрозионный срез рудно-магматической системы объекта. В экзо-эндоконтактах порфирового интрузива развит конформный ему рудоносный штокверк с прожилково-вкрапленной рудной минерализацией, сопровождающейся

зонально построенным ореолом гидротермально-метасоматических изменений (см. рис. 3).

Минерализованная зона месторождения Кызык-Чадр, включающая потенциально-промышленные рудные тела, оконтуривается по изоконцентрате Cu 0,05 % и представляет собой крутопадающую линейную штокверковую зону (1700 × 100)–(300 × 300)–500 м, приуроченную к пластинообразному порфировому интрузиву. Минерализованная зона сопровождается первичными ореолами рассеяния Mo , Au , Ag и элементов-спутников – Pb , Zn и др. Вариации содержаний главных рудных компонентов в пределах минерализованной зоны составляют: Cu – 0,05–0,5 %, редко до 1–2,6 %; Mo – 0,005–0,02 %, редко до 0,08 %; Au – 0,0 n –0, n г/т, редко до 1–2 г/т; Pb – 0,004–0,03 %, редко до 0,1–0,4 %; Zn – 0,005–0,032 %, редко до 0,1–1 %. Содержания в рудах элементов-примесей по данным спектрального анализа составляют (в ppm): Sn – 10–30, Co < 10, Ni – 5–10, Ag – 0,5–1,0, W – 10–50, As – 60–800, Sb – 30–200, Hg – 5 ppb. По геохимическим признакам эрозионный срез объекта оценивается как верхнерудный.

Границы потенциально промышленных рудных тел в пределах минерализованной зоны выделяются только по данным опробования, по бортовому содержанию меди 0,2 %, и в целом конформны контактам порфирового интрузива. Главные попутные компоненты руд – молибден и золото, которые значительно повышают общую ценность руд. Кроме них в качестве попутных компонентов присутствуют серебро, рений, селен.

В верхней части рудного тела месторождения Кызык-Чадр развита зона гипергенеза. В её составе выделяется зона выщелачивания (с уменьшением содержаний Cu в рудных телах в 2–3 раза, до 0,1 % и ниже) мощностью 10–20 м, невыдержанная, от 0 м в плотных окварцованных участках до 100 м вдоль разрывных нарушений. Зона окисления развита до глубины 40–100 м, невыдержанная, преобладают полукисленные руды. Зона вторичного сульфидного обогащения проявлена фрагментарно.

Судя по данным бурения, рудоносная зона, включающая потенциально промышленное медно-порфировое оруденение, может продол-

жаться на глубину до 700–800 м и более. Также возможно выявление не вскрытых на поверхности новых кулисообразных рудных тел, верхние выклинки которых вероятно вскрыты в пересечениях скважин на южном фланге месторождения.

Метасоматические изменения. Рудоносные порфиры и вмещающие их фанеритовые гранитоиды месторождения интенсивно гидротермально изменены на значительной площади. Главные минералы метасоматического ореола – кварц, серицит, хлорит, альбит, карбонаты, калишпат, мусковит, эпидот; изредка отмечается вторичный биотит в виде реликтов. Перечисленные вторичные минералы входят в состав следующих типов гидротермально-метасоматических изменений, традиционно выделяемых на месторождениях медно-порфиrowого типа: калиево-кремниевые, филлизитовые и пропилитовые [5, 6].

Калиево-кремниевые изменения проявлены калишпатизацией, окварцеванием и биотитизацией гранитоидов. На месторождении Кызык-Чадр реликты калиевых изменений выявлены в центральной (осевой) его части. Здесь кварц и калишпат образуют в породах неравномерно распространённые разнозернистые срастания в виде вкрапленности, зонков, гнёзд размером от первых миллиметров до первых сантиметров. Они также формируют штокверк калишпат-кварцевых, кварцевых, в меньшей степени кальцит-калишпат-кварцевых, иногда с хлоритом, прожилков мощностью от первых миллиметров до первых сантиметров. Вторичный биотит, характерный для изменений этого типа, установлен на месторождении Кызык-Чадр лишь в единичных случаях в виде хлоритизированных реликтов, в отличие от типичных медно-порфиrowых месторождений.

Филлизитовые изменения являются ведущим типом метасоматических изменений Кызык-Чадра. Размеры ореола развития филлизитовых изменений на поверхности рудного поля – около 4000 × 700 м. Изменения выражены интенсивными серицитизацией, окварцеванием и хлоритизацией, иногда развиты карбонатизация и альбитизация. При этом плагиоклаз замещается агрегатными псевдоморфозами се-

рицита, альбита, иногда карбоната, тёмноцветные минералы – кварцем, хлоритом, серицитом или мусковитом, калишпат – шахматным альбитом и кальцитом. Филлизиты сопровождаются штокверком кварцевых и карбонат-кварцевых прожилков и маломощных жил.

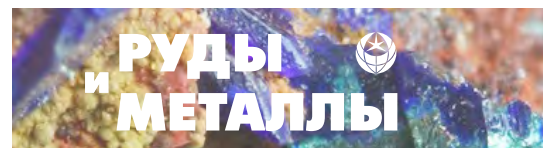
Развиваются филлизиты преимущественно по среднезернистым гранитам, а в пределах осевой части месторождения – по телам порфиrow. Наиболее интенсивно изменены породы, которые подверглись существенной тектонической проработке – катаклазу, брекчированию, рассланцеванию. Расположенные на флангах месторождения тела гранодиоритов, кварцевых диоритов и монзонитоидов кызыкчадрского комплекса слабо затронуты этими изменениями.

Филлизиты накладываются по системе разнорядковых трещин на более ранние калиево-кремниевые изменения, зачастую полностью их замещая. Степень окварцевания, серицитизации и карбонатизации возрастает с приближением к крупным осевым трещинным структурам, маркируемым зонами интенсивно проявленных изменений этого типа.

Широкое развитие филлизитовых изменений на месторождении Кызык-Чадр, как и редуцированное развитие калиево-кремниевых изменений, является характерной особенностью рассматриваемого объекта.

На глубоких уровнях степень серицитизации в изменениях этого типа значительно снижается, преобладают окварцевание и хлоритизация, усиливается альбитизация, и они постепенно переходят в пропилилоподобные образования существенно кварц-альбит-хлоритового состава.

Пропилитовые изменения на месторождении Кызык-Чадр представлены типичной для таких изменений минеральной ассоциацией: хлорит, минералы эпидот-цоизитового ряда, альбит, иногда кальцит, кварц, серицит. Собственно пропилитовые изменения развиты на периферии месторождения. С удалением от рудоносной зоны пропилиты переходят в зону слабых гидротермальных изменений, трудноотличимых от продуктов регионального метаморфизма.



Рудная минерализация. Руды месторождения Кызык-Чадр имеют относительно простой минеральный состав. Главные рудные минералы – пирит, халькопирит, молибденит; второстепенные – блёклые руды, борнит, магнетит, гематит, рутил; редкие – галенит, сфалерит, арсенопирит, энаргит, самородное золото (рис. 5).

Структуры руд неравнозернистые, гипидиоморфнозернистые, реже аллотриоморфнозернистые; микроструктуры – ситовидные, микропйкилитовые, разъедания, нитевидные, каёмчатые, реликтовые.

Текстуры руд вкрапленные, прожилково-вкрапленные, прожилковые, полосчатые. Микротекстуры – прожилковые, цементные, брекчиевые, сетчатые, брекчиевидные.

Пирит является наиболее распространённым рудным минералом месторождения и его периферии. Даже в пределах медно-рудной зоны месторождения количество пирита зачастую превышает количество халькопирита. Пирит образует вкрапленность, гнёзда, линзы, шлиры, прожилки совместно с кварцем, кальцитом, хлоритом в различных соотношениях. Количество пирита варьирует от долей до 5–7 %.

Халькопирит – основной медный минерал медно-порфировых руд месторождения, образует вкрапленность, микропросечки (в том числе в пирите), гнёзда в прожилках кварцевого, карбонат-кварцевого, кварц-калишпатового составов. Халькопирит иногда содержит включения галенита и пирита, в виде микропрожилков в пирите ассоциирует с блёклой рудой. Содержание халькопирита в метасоматитах редко превышает 1,5 %, с чем связано общее низкое содержание меди в руде.

Молибденит редко образует крупные скопления, в основном – мелкие тонкочешуйчатые выделения. Изредка молибденит представлен видимой вкрапленностью и гнёздами в прожилках кварца, примазками по тектоническим трещинам.

Самородное золото – один из важнейших попутных компонентов медно-порфировых руд, существенно повышающий их ценность. В рудах месторождения Кызык-Чадр золото преимущественно образует мелкие (от 1–5 мкм) включе-

ния в пирите, халькопирите и борните. В рудных и нерудных минералах месторождения присутствуют также более крупные обособления золота размерами до 0,1–0,2 мм (рис. 6).

Кроме основных рудных минералов в меднорудной зоне и на её периферии установлены редко встречающиеся магнетит, борнит, блёклая руда, рутил, галенит, сфалерит, арсенопирит.

Магнетит фиксируется в осевых частях рудной зоны, образует неравномерно распределённую вкрапленность, иногда неравномерно замещён гематитом. *Борнит* представлен вкрапленностью наряду с халькопиритом и пиритом и отмечен только в верхних частях минерализованной зоны. *Блёклая руда теннантит-ттраэдритового ряда* образует сростания с халькопиритом в микропрожилках. *Рутил* формирует тонкую вкрапленность, прожилковидные и гнездовые мелкозернистые скопления, часто пространственно ассоциирует с халькопиритом. *Галенит* и *сфалерит* присутствуют в виде вкрапленности и сростков в прожилках кварца и гнёздах окварцевания. *Арсенопирит* образует вкрапленность идиоморфных кристаллов, пересекается тонкими микропрожилками халькопирита в сростании с блёклой рудой.

По результатам минералогического изучения в ФГБУ «ЦНИГРИ» лабораторно-технологической пробы руд месторождения Кызык-Чадр, среднее содержание пирита в рудах составило 4,5 %, халькопирита 1,5 %. Молибденит, галенит, блёклая руда и магнетит присутствуют в виде незначительной примеси. Самородное золото преимущественно образует свободные мелкие зёрна размером 0,1–0,2 мм, в меньшем количестве присутствуют тонкие включения самородного золота в ассоциации с халькопиритом.

В приповерхностных условиях в верхней части минерализованной зоны неравномерно развита зона окисления и вторичного сульфидного обогащения переменной мощности. Степень преобразования первичных рудных минералов в основном умеренная. Халькозин, дигенит, ковеллин и куприт замещают халькопирит, часто с образованием тонких прожилков и каёмок; малахит, хризокolla, азурит образуют примазки; локально развиты дендриты и прожилки самородной меди. Наиболее широко распрост-

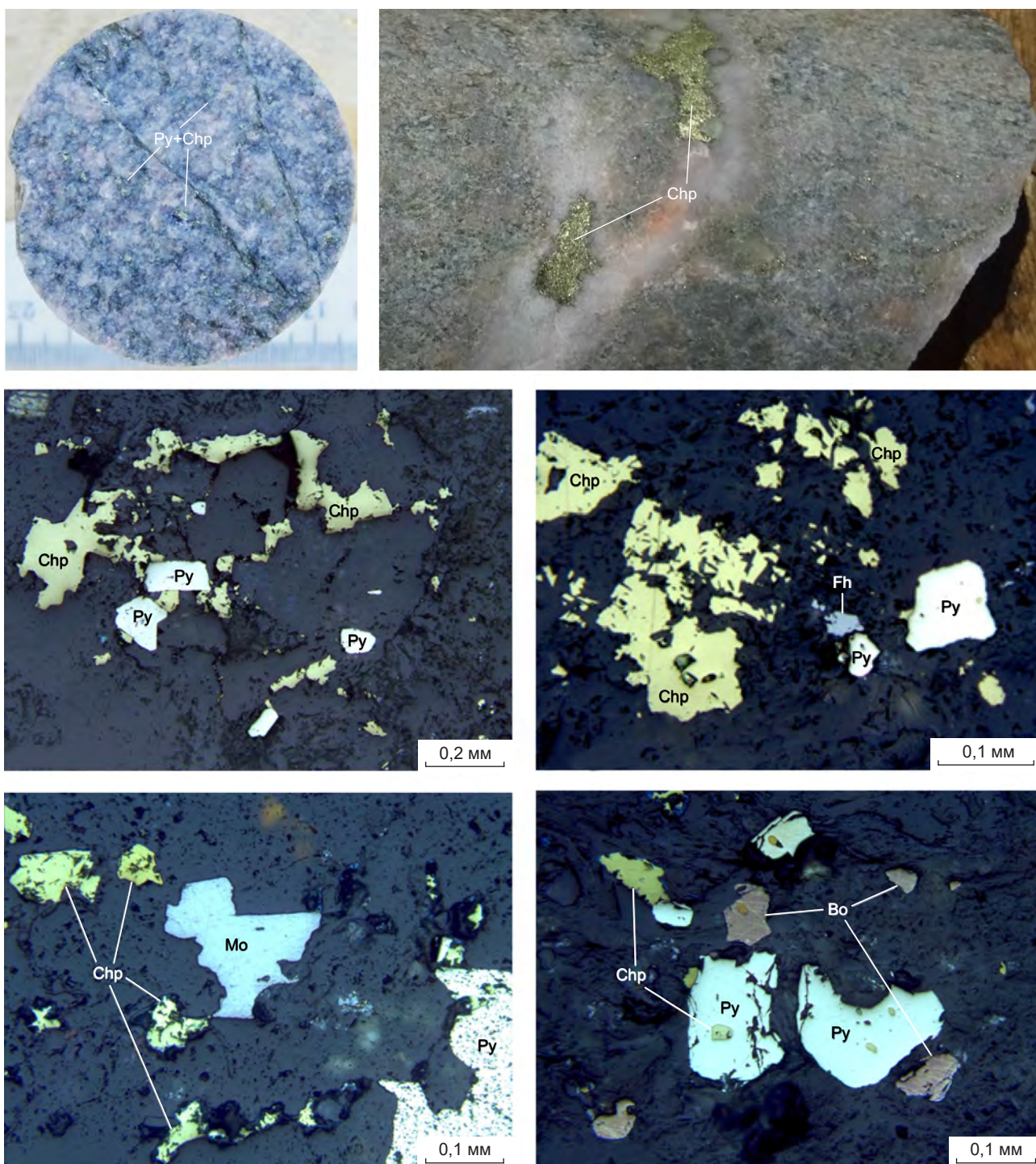


Рис. 5. Медно-порфировые руды месторождения Кызык-Чадр в образцах и полированных шлифах:

Py – пирит, Chp – халькопирит, Fh – блёклая руда, Mo – молибденит, Bo – борнит

Fig. 5. Kyzyl-Chadr porphyry copper ores in samples and polished sections:

Py – pyrite, Chp – chalcopyrite, Fh – fahlore, Mo – molybdenite, Bo – bornite

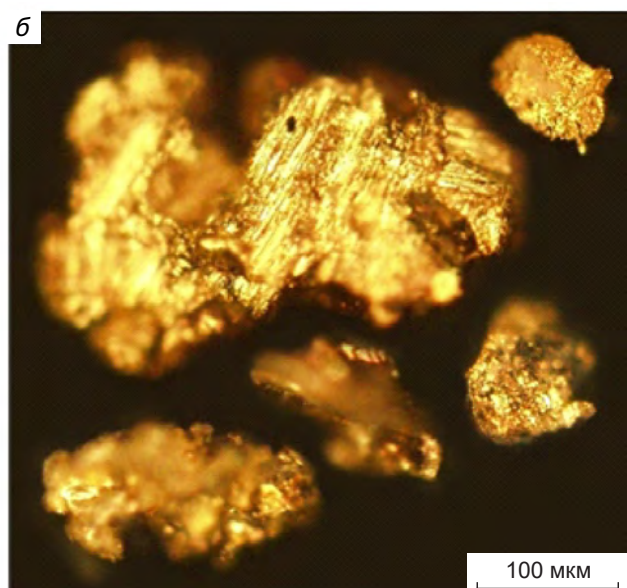
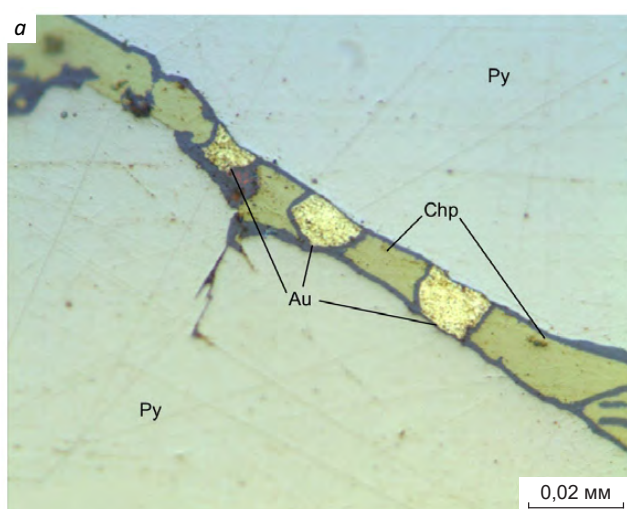


Рис. 6. Формы выделения самородного золота в рудах месторождения Кызык-Чадр в полированном шлифе (а), в гравиконцентрате лабораторно-технологической пробы (б):

Py – пирит, Chp – халькопирит, Au – золото

Fig. 6. Native gold forms in Kyzыk-Chadr ores in a polished section (a), in gravity concentrate of laboratory technological sample (b):

Py – pyrite, Chp – chalcopyrite, Au – gold

ранены гидроксиды железа, которые образуются по пириту и халькопириту.

На основании наблюдаемых минеральных соотношений и положения агрегатов в объёме рудно-магматической системы, а также по аналогии с известными месторождениями медно-порфиrowого типа, рудные минералы месторождения Кызык-Чадр объединены в следующие рудные минеральные ассоциации (от ранних к поздним): магнетитовая, халькопиритовая, молибденитовая, пирит-халькопиритовая, пиритовая, галенит-сфалеритовая (полисульфидная), блёклорудная [5].

Магнетитовая минеральная ассоциация представлена магнетитом, который на месторождении распространён ограниченно, преимущественно в виде редких микровключений в пирите, фиксирующихся обычно вблизи границы области распространения халькопиритовой ассоциации. Вероятно, эти выделения являются реликтами и могут свидетельствовать об интенсивном замещении рудно-метасоматических образований ранней стадии поздними.

Халькопиритовая ассоциация представлена халькопиритом, отличается практически полным отсутствием пирита. Она выявлена во внутренних частях минерализованного ореола месторождения, но, как правило, характеризуется относительно невысокими содержаниями меди. Может быть сопоставлена с магнетит-борнит-халькопиритовой ассоциацией крупных типовых медно-порфиrowых месторождений, однако на месторождении Кызык-Чадр магнетит и борнит в её составе практически не отмечаются (возможно, они замещены или разложены на поздних стадиях минералообразования).

Молибденитовая ассоциация выделена и оконтурена по наличию молибденитовой минерализации; её контур отвечает содержаниям $Mo > 0,005 \%$, т. е. промышленно извлекаемым концентрациям молибдена; обнаруживает видимую корреляцию с основной меднорудной пирит-халькопиритовой ассоциацией.

Пирит-халькопиритовая ассоциация сложена пиритом и халькопиритом с широкими вариациями их соотношений, контур её распространения отвечает содержаниям $Cu > 0,05 \%$. Повсеместно содержит примесь молибденита;

вероятно, образует с молибденитовой ассоциацией единый пирит-халькопирит-молибденитовый минеральный комплекс (тип руд).

Пиритовая ассоциация представлена пиритом, слагает «пиритовый ореол» во внешних частях филлизитовой зоны и во внешней пропилитовой зоне.

Галенит-сфалеритовая (полисульфидная) ассоциация представлена сфалеритом, галенитом, выделяется по повышенным (0,05–0,1 % и более) содержаниям этих элементов. Также в ассоциацию могут входить пирит, халькопирит, блёклые руды, золото. Как правило, сопровождается кварц-карбонатную прожилковую минерализацию.

Блеклорудная (медно-сурьмяно-мышьяковистая) ассоциация представлена блёклыми рудами теннантит-тетраэдритового ряда, ассоциирующими с пиритом, борнитом, халькопиритом. Развита локально, в зонах разрывных нарушений, часто ассоциирует с полисульфидной ассоциацией, с которой, вероятно, образует единый полиметаллический минеральный комплекс.

Золоторудная минерализация на месторождении развита неравномерно. Её максимумы в значительной степени контролируются тектоническими нарушениями, в связи с чем часто совпадают с проявлениями полисульфидной и мышьяковистой минерализаций. В то же время во многих случаях отмечается сочетание повышенных содержаний золота с основными продуктивными пирит-халькопиритовой и молибденитовой минеральными ассоциациями. Кроме того, на флангах штокверкового рудного тела, на его выклиниваниях по простиранию и, вероятно, по восстанию присутствуют мало-мощные (до 14 м) непротивлённые (40–170 м) золотосульфидные минерализованные зоны с осевыми золотокварцевыми жилами.

Рудно-метасоматическая зональность (РМЗ) месторождения Кызык-Чадр определяется закономерным расположением в пространстве зон, образованных телескопированием гидротермально-метасоматических изменений калиево-кремниевого, филлизитового и пропилитового типов и связанных с их развитием рудных минеральных ассоциаций [1, 7, 13].

В поперечном сечении (рис. 7) зональность гидротермально-метасоматических изменений на месторождении заключается в смене от центра к периферии следующих генерализованных метасоматических зон: калиевой (кварц-калишпатовой), сохранившейся в виде реликтов; филлизитовой (кварц-серицитовой); пропилитовой с двумя подзонами – внутренней пропилитовой (кварц-хлоритовой) и внешней пропилитовой (эпидот-хлоритовой). В экзоконтактах порфирированного интрузива фрагментарно развито интенсивное прожилковое окварцевание («кварцевый штокверк»).

Калиевая зона определяется наличием интенсивно проявленных изменений калиево-кремниевого типа. Типоморфные минералы зоны – кварц и калишпат; широко развит хлорит, замещающий тёмноцветные минералы, однако, в отличие от типичных медно-порфирированных месторождений, практически не установлен вторичный биотит или его хлоритизированные реликты. В небольших количествах присутствуют наложенные альбит, серицит и другие минералы поздней системы. Калиевая зона распространена крайне ограниченно, что может быть результатом особенностей условий рудообразования.

Внутренняя пропилитовая зона определяется телескопированием тесно связанных с филлизитами пропилитоподобных образований и умеренно проявленных изменений калиево-кремниевого типа (аналоги этой зоны выделяются под различными названиями на всех значительных месторождениях медно-порфирированного типа [1, 2, 8, 13]). Типоморфные минералы зоны – кварц, хлорит, альбит, в подчинённых количествах могут присутствовать эпидот, серицит, карбонат; калишпат практически отсутствует. Данная зона достаточно определённо выделяется как визуально, так и по результатам петрографических исследований, содержит значительную долю меднорудной минерализации месторождения.

Филлизитовая зона определяется преобладанием интенсивных изменений филлизитового типа. Типоморфные минералы зоны – серицит, кварц, хлорит, иногда присутствуют карбонат, альбит, эпидот. Филлизитовая зона весьма



интенсивно и широко развита на месторождении, что так же, как и редуцированное развитие калиевой зоны, является характерной особенностью данного объекта.

Внешняя пропилитовая зона определяется преобладающим развитием собственно пропилитовых изменений на периферии месторождения. Типоморфные минералы зоны – хлорит, минералы эпидот-цоизитового ряда, альбит, иногда кальцит, редко серицит. Типичная периферическая зона рудно-метасоматических ореолов медно-порфириновых месторождений, переходящая в зону слабых гидротермальных изменений, трудно отличимых от продуктов регионального метаморфизма.

Общая морфология метасоматического ореола и его отдельных зон конформны пластинообразным телам кулисно построенного рудноносного порфирированного интрузива и его апофиз.

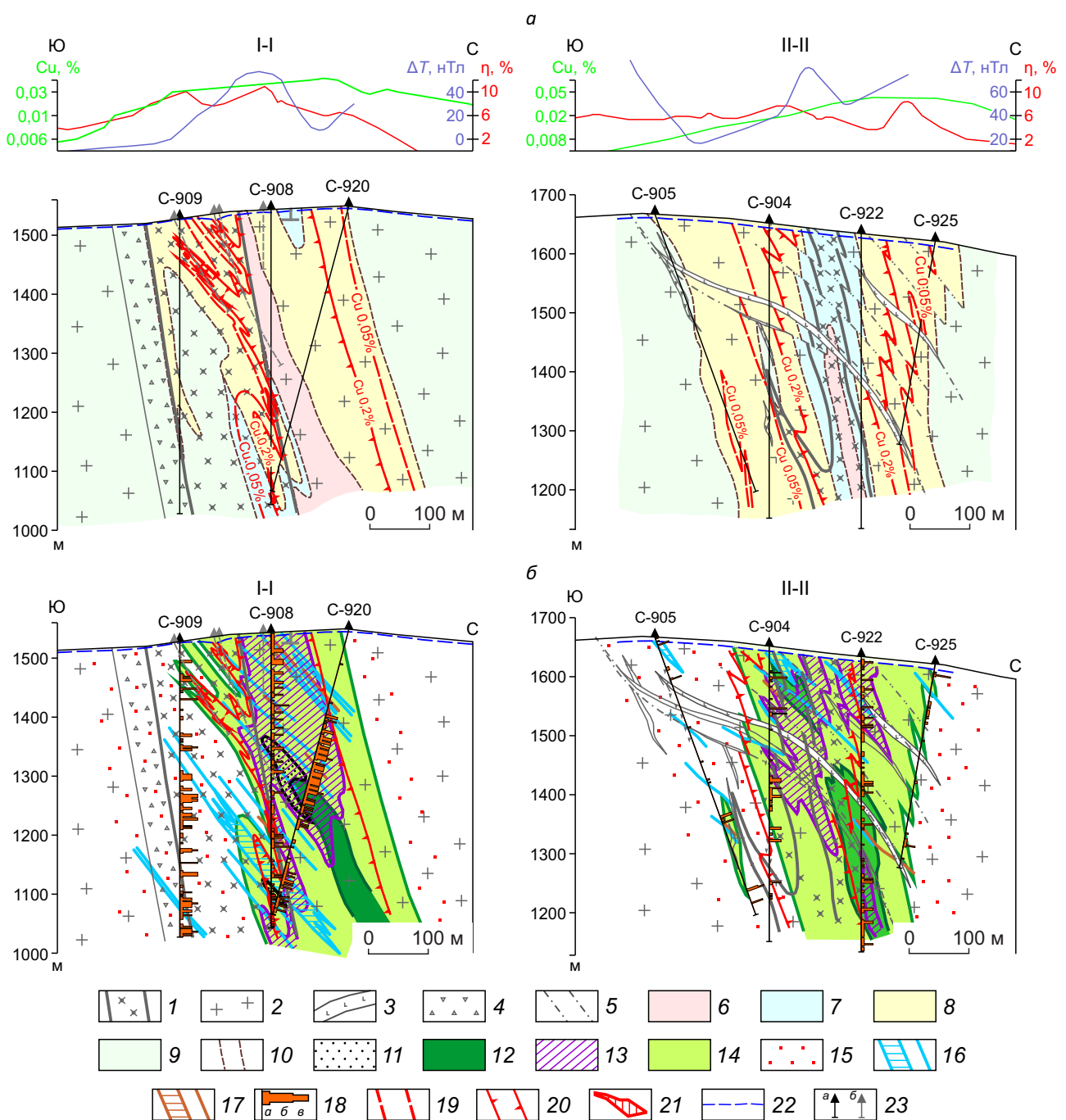
Рудная составляющая РМЗ заключается в смене от центра к периферии зон преобладающего распространения рудных минеральных и соответствующих им минералого-геохимических ассоциаций, занимающих определённое положение относительно системы зон гидротермально-метасоматических изменений. Редуцированная халькопиритовая ассоциация с реликтами магнетита в её краевых частях фиксируется во внутренних частях калиевой зоны. С удалением от предполагаемого центра системы, в участках сопряжения калиевой, внутренней пропилитовой и филлизитовой зон, локализуется собственно медно-порфирированное оруденение, представленное основной продуктивной пирит-халькопиритовой ассоциацией и тесно связанной с ней молибденитовой минеральными ассоциациями, развитыми в полосе общей мощностью от 150 до более 200 м. На флангах меднорудной зоны, во внешних частях филлизитовой и внешней пропилитовой зон развит широкий (до 400 м на южном фланге и до 200 м на северном) ореол пиритовой минерализации («пиритовый ореол»). Содержания пирита здесь достигают 3–5 % и более. Широкое развитие имеют кварц-пиритовые прожилки, изредка в прожилках отмечается молибденит. Медная минерализация в этой части рудной зоны крайне слабая, количество халькопирита редко дости-

гает 0,1 % в отдельных маломощных зонках. На периферии рудно-метасоматического ореола во внешней пропилитовой зоне отмечается бедная вкрапленность пирита.

Полиметаллическая минерализация, включающая полисульфидную (галенит-сфалеритовую) и блеклорудную минеральные ассоциации, распространена фрагментарно как во внутренних, так и внешних частях рудоносной зоны месторождения Кызык-Чадр и приурочена к дискордантным (диагональным в плане) крутопадающим зонам малоамплитудных тектонических разрывных нарушений.

Морфология и распределение зон рудной минерализации различного состава в поперечных сечениях рудоносной зоны месторождения Кызык-Чадр конформна морфологии порфирированного интрузива и зон метасоматических изменений.

В продольном сечении (рис. 8), как и в поперечных, намечаются элементы концентрической метасоматической зональности с локализацией редуцированной калиевой зоны в центральной части рудно-метасоматического ореола месторождения. Калиевая зона облекается внутренней пропилитовой зоной, сменяющейся на флангах интенсивно проявленной филлизитовой зоной. Как видно, общая морфология метасоматического ореола и его отдельных зон вполне конформны пластинообразным телам кулисно построенного порфирированного интрузива и его апофиз. Морфология и распределение в продольном сечении зон рудной минерализации различных составов также вполне конформна морфологии порфирированного интрузива и зон метасоматических изменений. Редуцированная халькопиритовая ассоциация с реликтами магнетита в её краевых частях меняется с удалением от предполагаемого центра системы на «базовую» пирит-халькопиритовую ассоциацию, затем на пиритовую «пиритового ореола». Полиметаллическая (галенит-сфалеритовая) ассоциация закономерно локализуется в узких крутопадающих линейных зонах, очевидно, контролируемых разрывными нарушениями. К ним же приурочены и локально проявленные участки развития блеклорудной минерализации. Молибденитовая минерализация по распреде-



лению её концентраций и контурам зон практически совпадает с пирит-халькопиритовой.

Таким образом, на месторождении проявлена концентрическая зональность, симметричная в поперечном и асимметричная в продольном сечениях (калиевая зона в наиболее полном виде развита только в восточной части оре-

ола, тогда как в западной резко преобладают филлизитовые изменения).

Минералогическая и изотопно-геохимическая зональность месторождения. Широкое развитие на месторождении интенсивных изменений филлизитового типа в значительной степени снижает контрастность рудно-метасо-

Рис. 7. Поперечные схематические разрезы через минерализованную зону месторождения Кызык-Чадр с метасоматической (а) и рудно-минералогической (б) нагрузкой; графики значений вызванной поляризуемости (η , %) и интенсивности магнитного поля (ΔT , нТл) по материалам Р. Т. Уссара, 1978 г., АО «Сибирское ПГО»; график содержания Cu (%) в ВОР по материалам АО «Сибирское ПГО»:

1 – рудоносный порфировый интрузив (кварцевые диорит-порфиры, гранодиорит-порфиры); 2 – породы главных фаз кызыкчадрского комплекса (преимущественно граниты); 3 – дайки среднего и основного составов, пострудные; 4 – мелкообломочные брекчии приконтактных частей порфирового интрузива; 5 – малоамплитудные тектонические нарушения (зоны трещиноватости); генерализованные зоны гидротермально-метасоматических изменений: 6 – калиевая и внутренняя пропилитовая, нерасчленённые (q, cl, fsp, ab, bt \pm src, ca), 7 – внутренняя пропилитовая (q, cl, ab \pm src, fsp, ca), 8 – филлизитовая (src, q, cl \pm ab, ca), 9 – внешняя пропилитовая (ep, cl, ca, ab \pm src); 10 – границы метасоматических зон; области распространения рудных минеральных ассоциаций (от ранних к поздним): 11 – магнетитовая (реликты), 12 – халькопиритовая, 13 – молибденитовая ($Mo \geq 0,005$ %), 14 – пирит-халькопиритовая ($Cu \geq 0,05$ %), 15 – пиритовая, 16 – галенит-сфалеритовая (полисульфидная – $Pb + Zn \geq 0,01$ %), 17 – блеклорудная (медно-сурьмяно-мышьяковистая – $As + Sb \geq 0,01$ %); 18 – содержания Au по данным кернового опробования в градациях (а – 0,05–0,1; б – 0,1–0,5; в – > 0,5 г/т); 19 – контур распространения медной минерализации по C_{Cu} 0,05 %; 20 – контур меднорудного тела по $C_{борг}$ 0,2 % (рядовые руды); 21 – блок наиболее богатых руд $C_{ср}$ Cu 0,4 %, по АО «Сибирское ПГО» (на продольном разрезе); 22 – уровень зоны окисления и выщелачивания медных руд; 23 – поисковые скважины: а – работ АО «Сибирское ПГО» 2017–2019 гг., б – предшествующих ГРП

Fig. 7. Schematic cross-sections through Kyzyk-Chadr mineralized zone with metasomatic (a) and ore-mineralogical (b) loading; value charts of induced polarization (η , %) and magnetic field strength (ΔT , nTl) based on materials by R. T. Ussar, 1978, JSC Siberian PGO; Cu values chart (%) in secondary dispersion halos based on JSC Siberian PGO materials:

1 – ore-bearing porphyry intrusive (quartz diorite-porphyrates); 2 – rocks of Kyzyk-Chadr complex main phases (primarily granites); 3 – postore intermediate and basic dikes; 4 – clastic breccias of porphyry intrusive near-surface parts; 5 – low-amplitude tectonic deformations (fracture zones); generalized zones of hydrothermal-metasomatic alteration: 6 – undivided potassic and internal propylitic (q, cl, fsp, ab, bt \pm src, ca), 7 – internal propylitic (q, cl, ab \pm src, fsp, ca), 8 – phyllisite (src, q, cl \pm ab, ca), 9 – outer propylitic (ep, cl, ca, ab \pm src); 10 – metasomatic zone boundaries; distribution areas of ore mineral associations (early to late): 11 – magnetite (relics), 12 – chalcopyrite, 13 – molybdenite ($Mo \geq 0,005$ %), 14 – pyrite-chalcopyrite ($Cu \geq 0,05$ %), 15 – pyrite, 16 – galena-sphalerite (polysulfide – $Pb+Zn \geq 0.01\%$), 17 – fahlore ($Cu-Sb-As - As+Sb \geq 0.01\%$); 18 – Au grades based on core sampling data (a – 0.05-0.1; b – 0.1-0.5; c – > 0.5 g/t); 19 – contour of Cu mineralization distribution at 0.05% Cu; 20 – contour of copper body at 0.2% Cu cutoff (run-of-mine ores); 21 – block of the highest grade ore at 0.4% Cu (average) based on JSC Siberian PGO data (lateral section); 22 – level of copper ore oxidation and leaching zone; 23 – prospecting holes: a – activities by JSC Siberian PGO in 2017-2019, b – previous exploration

матической зональности объекта. В целях оценки возможности повышения эффективности минералогических методов при локальном прогнозировании в пределах площади работ были проведены специализированные исследования, нацеленные на выявление элементов скрытой минералого-геохимической зональности. Такую зональность демонстрируют, в первую очередь, рентгеноструктурные параметры слоистых силикатов и изотопный состав серы сульфидов.

Рентгенофазовый анализ и ИК-спектроскопия показали, что в пределах рудно-метасоматического ореола месторождения состав основных минералов метасоматитов достаточно однообразен и представлен преимущественно кварцем и диоктаэдрической калиевой слюдой мусковит-фенгитового ряда, которые доминируют практически во всех метасоматических зонах. В подобных случаях минералогическая зональность может быть проявлена наиболее отчётливо только в вариациях количества слю-

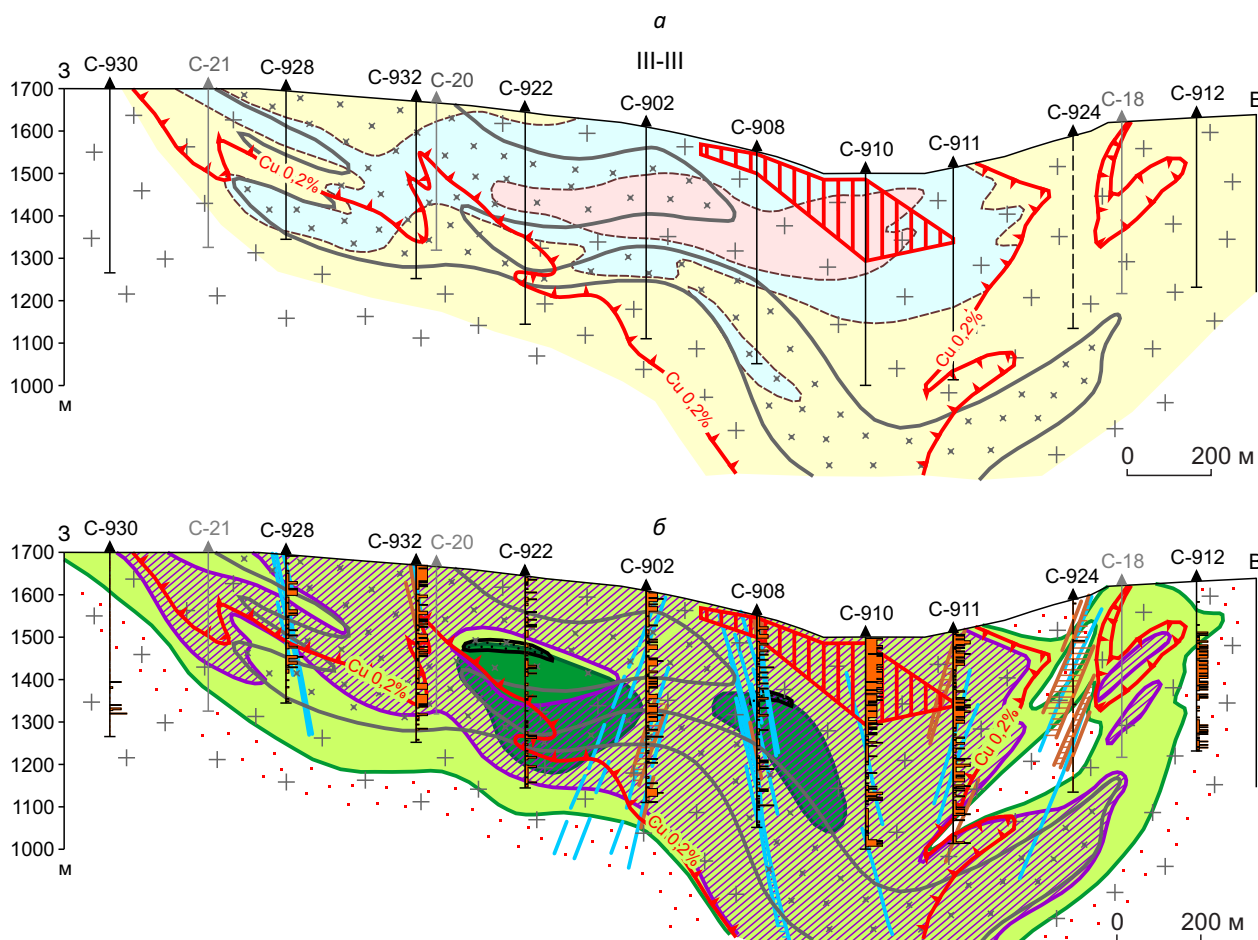


Рис. 8. Продольные схематические разрезы через минерализованную зону месторождения Кызык-Чадр с метасоматической (а) и рудно-минералогической (б) нагрузкой:

усл. обозн. см. рис. 7

Fig. 8. Lateral schematic sections through Kyzyk-Chadr mineralized zone with metasomatic (a) and ore-mineralogical (b) loading:
see Fig. 7 for legend

ды, а также в изменчивости её химического состава.

Анализ распределения параметра $C \sin \beta$ (элементарной ячейки слюды) серицита из разных метасоматических зон показывает направленное и достаточно монотонное изменение в составе. От флангов к центральной, наиболее продуктивной части месторождения наблюдается отчётливое увеличение доли фенгитового компонента (рис. 9, а), параллельно происхо-

дит существенное снижение отношения слюда/кварц в метасоматитах. Область развития фенгитовых слюд фиксирует наиболее продуктивную часть месторождения, вмещающую промышленные рудные тела, что даёт основание использовать этот показатель при проведении ГРП.

Минеральные равновесия, от которых зависит осаждение сульфидов меди в гидротермальных системах, определяются главным об-

разом фугитивностью кислорода. Этим же фактором контролируется изотопный состав сульфидной серы [9], что служит основанием для использования величины $\delta^{34}\text{S}$ в качестве показателя физико-химической зональности рудно-магматических систем.

На месторождениях медно-порфирового типа отмечено снижение $\delta^{34}\text{S}$ от рудных тел к надрудному «пиритовому» ореолу и в направлении от центра к флангам, отражающее рост окислительного потенциала среды. Результаты выполненных определений величины $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов месторождения Кызык-Чадр (см. рис. 9, б) выявили аналогичную закономерность. Они в полной мере подтверждают прямую однозначную корреляционную связь между повышением доли тяжёлого изотопа серы в сульфидах и концентрациями меди в рудах. Непрерывность поля фигуративных точек на графике свидетельствует в пользу генетического единства изученных сульфидов при определяющей роли повышения фугитивности кислорода на флангах рудообразующей системы. С этим же фактором можно связать и концентрирование полезных компонентов руд в восстановительной зоне и использовать распределение значений $\delta^{34}\text{S}$ для прогноза оруденения.

С практической точки зрения важно отметить, что корреляционная зависимость между составом слюд, $\delta^{34}\text{S}$ и содержаниями меди достаточно близка к функциональной и указывает на определяющую роль того же фактора (или факторов) в концентрации полезных компонентов в рудах. Данный вывод может служить основанием для более широкого использования рентгенометрических и изотопных данных при выявлении метасоматической зональности и прогнозе оруденения медно-порфирового типа в пределах различных перспективных площадей.

Заключение. Выполненные исследования позволили уточнить основные особенности геологической позиции и строения золотосодержащего молибден-медно-порфирового месторождения Кызык-Чадр, вещественный состав и зональность его рудно-метасоматических образований, морфологию прогнозируемых рудных тел, выявить элементы их скрытой мине-

ралого-геохимической и изотопно-геохимической зональности.

Месторождение Кызык-Чадр обнаруживает основные черты, позволяющие отнести его к медно-порфировому геолого-промышленному типу и использовать в качестве эталонного для разработки регионально адаптированной геолого-поисковой модели объектов этого перспективного типа.

Основные элементы строения месторождения Кызык-Чадр в целом отвечают типовой модели медно-порфирических месторождений [1, 7, 13]: штокверковое золотосодержащее медно-молибденовое оруденение приурочено к порфирическим интрузивам; рудно-метасоматический ореол, зональный относительно центральной (осевой) части месторождения, насыщенной телами порфирических даек, представлен последовательно сменяющимися друг друга в направлении от центра к периферии зонами (калиевой (кварц-калишпатовой) с убогой рудной минерализацией существенно халькопиритового состава; внутренней пропилитовой (кварц-хлоритовой) с потенциально промышленным молибденит-халькопирит-пиритовым оруденением; филлизитовой (кварц-серицитовой) с молибденит-халькопирит-пиритовым оруденением во внутренних частях и существенно пиритовой минерализацией («пиритовый ореол») во внешних частях; пропилитовой (эпидот-хлоритовой) с бедной вкрапленностью пирита).

Вместе с тем, отмечается ряд особенностей морфологии рудных тел и вещественного состава этого месторождения: ярко выраженный линейный (лентовидный в плане) характер и крутое падение рудоносной зоны и её составляющих, редуцированное распространение наиболее продуктивной на типовых медно-порфирических месторождениях калиевой метасоматической зоны с практически полным отсутствием реликтов характерного для неё вторичного биотита и резкое преобладание филлизитовых изменений. Эти особенности могут быть обусловлены формированием оруденения в пределах долгоживущей разломной зоны, экранирующим эффектом вмещающей интрузив метаморфизованной толщи и преимущественно

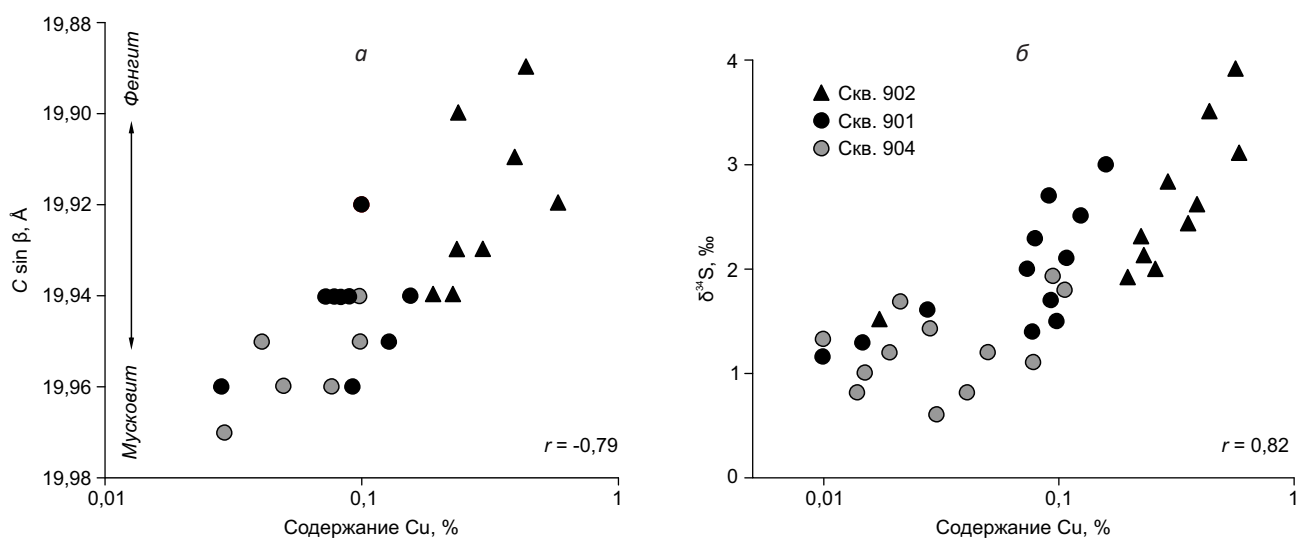


Рис. 9. Зависимость между содержанием меди и составом серицита (а); зависимость между содержанием меди и изотопным составом серы сульфидов (б) в метасоматитах месторождения Кызык-Чадр

Fig. 9. Relationship between Cu grade and ceresite composition (a), Cu grade and S isotope composition of sulfides (b) in Kyzzyk-Chadr metasomatites

кислым составом вмещающих оруденение интрузивных пород.

Комплекс критериев и признаков меднопорфиорового оруденения, выявленных, или уточнённых в ходе проведённых исследований, мо-

жет быть использован в качестве элементов геолого-поисковой модели для повышения эффективности проведения дальнейших геологоразведочных работ в пределах Алтае-Саянской минерагенической зоны.

Список литературы

1. Гирфанов М. М. Рудно-метасоматическая зональность медно-порфиоровых месторождений – условия образования и модели : автореф. дис. на соискание учёной степени канд. геол.-минерал. наук. – М. : ЦНИГРИ, 1993. – 25 с.
2. Голованов Н. М., Николаев Е. Ж., Кажихин М. А. Комплексная прогнозно-поисковая модель меднопорфиоровой формации. – Ташкент : Фан, 1988. – 202 с.
3. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Западно-Саянская. Лист N-46-XXXV (Уюк). – [Электронный ресурс]. – М. : ВСЕГЕИ, Московский филиал, 2019.
4. Гусев Н. И., Берзон Е. И., Семёнов М. И. Кызыкчадрское медно-порфиоровое месторождение (Тува): геохимические особенности и возраст магматизма // Региональная геология и металлогения. – 2014. – № 59. – С. 70–79.
5. Кривцов А. И., Мигачёв И. Ф., Минина О. В. Минералого-геохимические типы руд меднопорфиоровых месторождений – золотоносность и зональность // Геохимия. – 1985. – № 10. – С. 1417–1429.
6. Кривцов А. И., Мигачёв И. Ф., Попов В. С. Меднопорфиоровые месторождения мира. – М. : Недра, 1986. – 240 с.



7. Медно-порфировые месторождения. К 300-летию горно-геологической службы России / под ред. А. И. Кривцова. – М. : ЦНИГРИ, 2001. – 232 с. – (Модели месторождений благородных и цветных металлов).
8. Мигачёв И. Ф., Гирфанов М. М., Шишаков В. Б. Медно-порфировое месторождение Песчанка // Руды и металлы. – 1995. – № 3. – С. 48–58.
9. Омото Х., Рай Р. Изотопы серы и углерода // Геохимия гидротермальных рудных месторождений. – М. : Мир, 1982. – С. 405–450.
10. Рогов Н. В. Магматические и другие структуры, перспективы и некоторые особенности металлогении Кызык-Чадрского Au-Cu-Mo месторождения Тувы // Магматизм и металлогения рудных районов Тувы. – Новосибирск : Наука, 1992. – С. 108–119.
11. Семёнов М. И., Юркевич Л. Г. Геология, геохимия и рудоносность Ожинского интрузивного плутона // Геологическое строение и полезные ископаемые Центральной Сибири : сборник статей. – Красноярск : АО «Сибирское ПГО», 2019. – С. 110–119.
12. Berzina A. N., Berzina A. P., Gimon V. O. Paleozoic–Mesozoic Porphyry Cu(Mo) and Mo(Cu) Deposits within the Southern Margin of the Siberian Craton: Geochemistry, Geochronology, and Petrogenesis (a Review) // Minerals. – 2016. – V. 6, I. 4. – DOI: 10.3390/min6040125.
13. John D. A., Ayuso R. A., Barton M. D. [et al.]. Porphyry copper deposit model: Scientific Investigations Report 2010-5070-B / USGS // Mineral Deposit Models for Resource Assessment. – Reston, VA, USA, 2010. – 169 p.

References

1. Girfanov M. M. Rudno-metasomaticheskaya zonal'nost' medno-porfirovykh mestorozhdenii – usloviya obrazovaniya i modeli: avtoref. dis. na soiskanie uchen. stepeni kand. geol.-mineral. nauk. [Ore-metasomatic zoning of porphyry copper deposits – formation conditions and models. Extended abstract of candidate's thesis], Moscow, TsNIGRI Publ., 1993, 25 p.
2. Golovanov N. M., Nikolaev E. Zh., Kazhikhin M. A. Kompleksnaya prognozno-poiskovaya model' medno-porfirovoi formatsii [Integrated predictive exploration model of porphyry copper formation], Tashkent, Fan Publ., 1988, 202 p.
3. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1 : 200 000. Izdanie vtoroe. Seriya Zapadno-Sayanskaya. List N-46-XXXV (Uyuk) [State Geological Map of the Russian Federation, scale 1 : 200 000. Second edition. West Sayan series. Sheet N-46-XXXV (Uyuk)], Moscow, VSEGEI, Moscow branch Publ., 2019.
4. Gusev N. I., Berzon E. I., Semenov M. I. Kyz'kchadrskoe medno-porfirovoe mestorozhdenie (Tuva): geokhimicheskie osobennosti i vozrast magmatizma [Kyz'kchadr copper-porphyry deposit (Tuva): geochemical features and age of magmatism], *Regional'naya geologiya i metallogeniya* [Regional Geology and Metallogeny], 2014, No 59, pp. 70–79. (In Russ.).
5. Krivtsov A. I., Migachev I. F., Minina O. V. Mineralogo-geokhimicheskie tipy rud medno-porfirovykh mestorozhdenii – zolotonosnost' i zonal'nost' [Mineral and geochemical types of ores of copper-porphyry deposits – gold content and zoning], *Geokhimiya* [Geochemistry International], 1985, № 10, pp. 1417–1429. (In Russ.).
6. Krivtsov A. I., Migachev I. F., Popov V. S. Medno-porfirovoe mestorozhdeniya mira [World porphyry copper deposits], Moscow, Nedra Publ., 1986, 240 p.
7. Medno-porfirovye mestorozhdeniya. K 300-letiyu gorno-geologicheskoi sluzhby Rossii [Copper-porphyry deposits. To the 300th anniversary of the mining and geological service of Russia], Moscow, TsNIGRI Publ., 2001, 232 p.
8. Migachev I. F., Girfanov M. M., Shishakov V. B. Medno-porfirovoe mestorozhdenie Peschanka [Peschanka porphyry copper deposit], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 1995, No 3, pp. 48–58. (In Russ.).
9. Omoto Kh., Rai R. Izotopy sery i ugleroda [Sulfur and carbon isotopes], *Geokhimiya gidrotermal'nykh rudnykh mestorozhdenii* [Geochemistry of hydrothermal ore deposits], Moscow, Mir Publ., 1982, pp. 405–450. (In Russ.).
10. Rogov N. V. Magmатические и другие структуры, перспективы и некоторые особенности металлогении Кызык-Чадрского Au-Cu-Mo месторождения Тувы [Magmatic and other structures, prospects and some features of metallogeny of the Kyz'k-Chadr Au-Cu-Mo deposit in Tuva], *Magmatizm i metallogeniya rudnykh raionov Tuvy* [Magmatism and metallogene-

- ny of ore regions of Tuva*], Novosibirsk, Nauka Publ., 1992, pp. 108–119.
11. Semenov M. I., Yurkevich L. G. Geologiya, geokhimiya i rudonosnost' Ozhinskogo intruzivnogo plutona [Geology, geochemistry and ore content of the Ozhinsky intrusive pluton], *Geologicheskoe stroenie i poleznye iskopaemye Tsentral'noi Sibiri: sbornik statei* [Geological structure and minerals of Central Siberia: collection of articles], Krasnoyarsk, AO "Sibirskoe PGO", 2019, pp. 110–119. (In Russ.).
 12. Berzina A. N., Berzina A. P., Gimon V. O. Paleozoic–Mesozoic Porphyry Cu(Mo) and Mo(Cu) Deposits within the Southern Margin of the Siberian Craton: Geochemistry, Geochronology, and Petrogenesis (a Review), *Minerals*, 2016, V. 6, I. 4, DOI: 10.3390/min6040125.
 13. John D. A., Ayuso R. A., Barton M. D. [et al.]. Porphyry copper deposit model: Scientific Investigations Report 2010-5070-B, USGS, *Mineral Deposit Models for Resource Assessment*, Reston, VA, USA, 2010, 169 p.

Авторы

Андреев Антон Вадимович

старший научный сотрудник¹
aandreev@tsnigri.ru

Гирфанов Михаил Миргалимович

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

Старостин Иван Александрович

младший научный сотрудник¹
starostin@tsnigri.ru

Авилова Ольга Владимировна

научный сотрудник¹
avilova@tsnigri.ru

Кряжев Сергей Гаврилович

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

Юрмазов Дмитрий Николаевич

главный геолог²

Бабкин Игорь Александрович

ведущий геолог²

Семёнов Михаил Иванович

начальник партии²

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

² АО «Сибирское ПГО», г. Красноярск

Authors

Andreev Anton Vadimovich

senior researcher¹
aandreev@tsnigri.ru

Girfanov Mikhail Mirgalimovich

PhD
leading researcher¹
girfanov@tsnigri.ru

Starostin Ivan Alekseevich

junior researcher¹
starostin@tsnigri.ru

Avilova Olga Vladimirovna

researcher¹
avilova@tsnigri.ru

Kryazhev Sergey Gavrilovich

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

Yurmazov Dmitriy Nikolaevich

chief geologist²

Babkin Igor' Aleksandrovich

leading geologist²

Semenov Mikhail Ivanovich

Head of the party²

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

² JSE «Siberian PGO», Krasnoyarsk, Russia



Мышьяковистая самородная медь золото-медно-порфирирового месторождения Ак-Суг, Восточная Тыва

**Arsenical native copper from Au-Cu porphyry Ak-Sug deposit,
Eastern Tyva**

**Шведов Г. И., Самородский П. Н.,
Макаров В. А., Муромцев Е. А.,
Шадчин М. В., Лобастов Б. М., Глушков Ю. В.**

**Shvedov G. I., Samorodsky P. N., Makarov V. A.,
Muromtsev E. A., Shadchin M. V.,
Lobastov B. M., Glushkov Yu. V.**

Рассмотрено геологическое строение Au-Cu-порфирирового месторождения Ак-Суг (Тыва). Изучено распространение в рудах месторождения самородной меди. Установлено, что самородная медь имеет как гипергенное, так и гипогенное происхождение. Охарактеризована гипогенная самородная медь с повышенным содержанием мышьяка (до 4,4 %) в ассоциации с арсенидами меди, самородным серебром, цирконом, браннеритом, ксенотимом-(Y), флоренситом-(Ce), а также халькозином и берцелианитом. Отмечается приуроченность гипогенной самородной меди к зонам расслаивания руд.

Ключевые слова: Ак-Суг, золото-медно-порфирировые месторождения, самородная медь, арсениды меди.

The geology of the Ak-Sug Au-Cu-porphyry deposit in the eastern Tyva is considered. The distribution of native copper in ores of the deposits was studied. It has been established that the native copper is of both hypogene and supergene origin. The hypogene native copper is characterized by an elevated arsenic content (up to 4.4 %) and occurs in association with copper arsenides, native silver, zircon, brannerite, xenotime-(Y), florensite-(Ce), chalcocite, and berzelianite. Hypogene native copper is confined to ore schistosity zones.

Keywords: Ak-Sug, porphyry gold-copper deposits, native copper, copper arsenides.

Для цитирования: Шведов Г. И., Самородский П. Н., Макаров В. А., Муромцев Е. А., Шадчин М. В., Лобастов Б. М., Глушков Ю. В. Мышьяковистая самородная медь золото-медно-порфирирового месторождения Ак-Суг, Восточная Тыва. Руды и металлы. 2021. № 1. С. 77–92. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10005.

For citation: Shvedov G. I., Samorodsky P. N., Makarov V. A., Muromtsev E. A., Shadchin M. V., Lobastov B. M., Glushkov Yu. V. Arsenical native copper from Au-Cu porphyry Ak-Sug deposit, Eastern Tyva. Ores and metals, 2021, № 1, pp. 77–92. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10005.

Введение. Самородная медь как самостоятельный рудный минерал является наиболее распространённым самородным металлом. Исследователи, как правило, уделяют большое внимание проявлениям самородной меди в базальтах и ассоциирующих с ними осадочных породах. Это объясняется, очевидно, тем, что в мире известен и хорошо изучен один район уникальных месторождений самородной меди – Калюмет-Хекла, на южном берегу оз. Верхнее (штат Мичиган, США), где залежи меди сосредоточены на полуострове Кивино. Рудовмещающие породы – миндалекаменные базальты, перемежающиеся с пластами конгломератов, сформированных в среднепротерозойском внутриконтинентальном рифте [13, 17].

Обзор публикаций показывает, что самородная медь встречается в достаточно разнообразных геологических обстановках. В одном из первых подробных обзоров [19] проявления самородной меди описаны не только в базальтах и связанных с ними осадочных породах, но и в основных (Нью-Джерси) и ультраосновных (Италия) интрузивах, осадочных породах (Мичиган, Боливия), в зоне окисления сульфидных месторождений (Нью-Мехико), также известны находки в современных болотах (Монтана). По данным М. И. Новгородовой, самородная медь встречается в метеоритах, лунном реголите, в магматических породах основного, среднего, кислого и щелочного составов, а также в осадочных толщах [12]. В гидротермальных рудах гипогенная медь встречалась, например, в составе ранней рудной ассоциации месторождения Золотая Гора [14]. На этом объекте медь наблюдается в жильчатых телах диопсид-гранатовых пород, залегающих среди серпентинитов, и находится в ассоциации с медистым золотом, халькозином, кальцитом, диопсидом, апатитом, сфеном, магнетитом [8]. В большинстве случаев самородная медь здесь беспримесная, высокой чистоты. Аналогичная чистая медь встречается в слабо минерализованных миндалекаменных диабазах, тогда как в промышленно значимых проявлениях этого же типа она часто содержит примесь мышьяка. Медь с примесью

мышьяка до нескольких процентов распространена и в скарновых месторождениях [12].

В то же время необходимо отметить недостаточную освещённость вопросов, касающихся условий образования самородной меди в месторождениях медно-порфировой рудной формации. К месторождениям порфирирового типа в последние годы проявляют интерес ведущие горнодобывающие компании мира. Такие месторождения – комплексные, большого объёма – обеспечивают более 60 % мировой добычи меди, около 15 % золота и основной объём производства молибдена. Изучение особенностей нахождения и формирования самородной меди на данных объектах не только решает вопросы условий формирования медной минерализации, но и является важным направлением с точки зрения отработки эффективных схем извлечения меди из руд, а также решения вопросов снижения содержания мышьяка в медном концентрате.

Материал статьи подготовлен в рамках выполнения работ по гранту РФФИ по теме «Геолого-генетическая модель Ак-Сугского месторождения, как эталонного медно-порфирирового объекта Восточно-Саянской металлогенической провинции». Здесь, при изучении минералого-геохимической зональности месторождения, авторами была выявлена и охарактеризована мышьяксодержащая самородная медь, локализованная преимущественно в западной и северо-западной частях рудной зоны.

Геологическое строение. Ак-Сугское месторождение располагается в пределах южного склона Восточного Саяна и входит в состав Ак-Сугского рудного узла, который локализован на сопряжении двух крупных тектонических структур Алтае-Саянской складчатой области: Восточно-Тувинской и Кизир-Казырской складчатых систем, естественной границей между которыми является крупный региональный Кандатский разлом.

Месторождение приурочено к многофазному Ак-Сугскому массиву кембрийского возраста [1], определяющему основные черты его геологического строения (рис. 1). Породы Ак-Сугского массива и одноимённого интрузивного комплекса развиты на значительной части

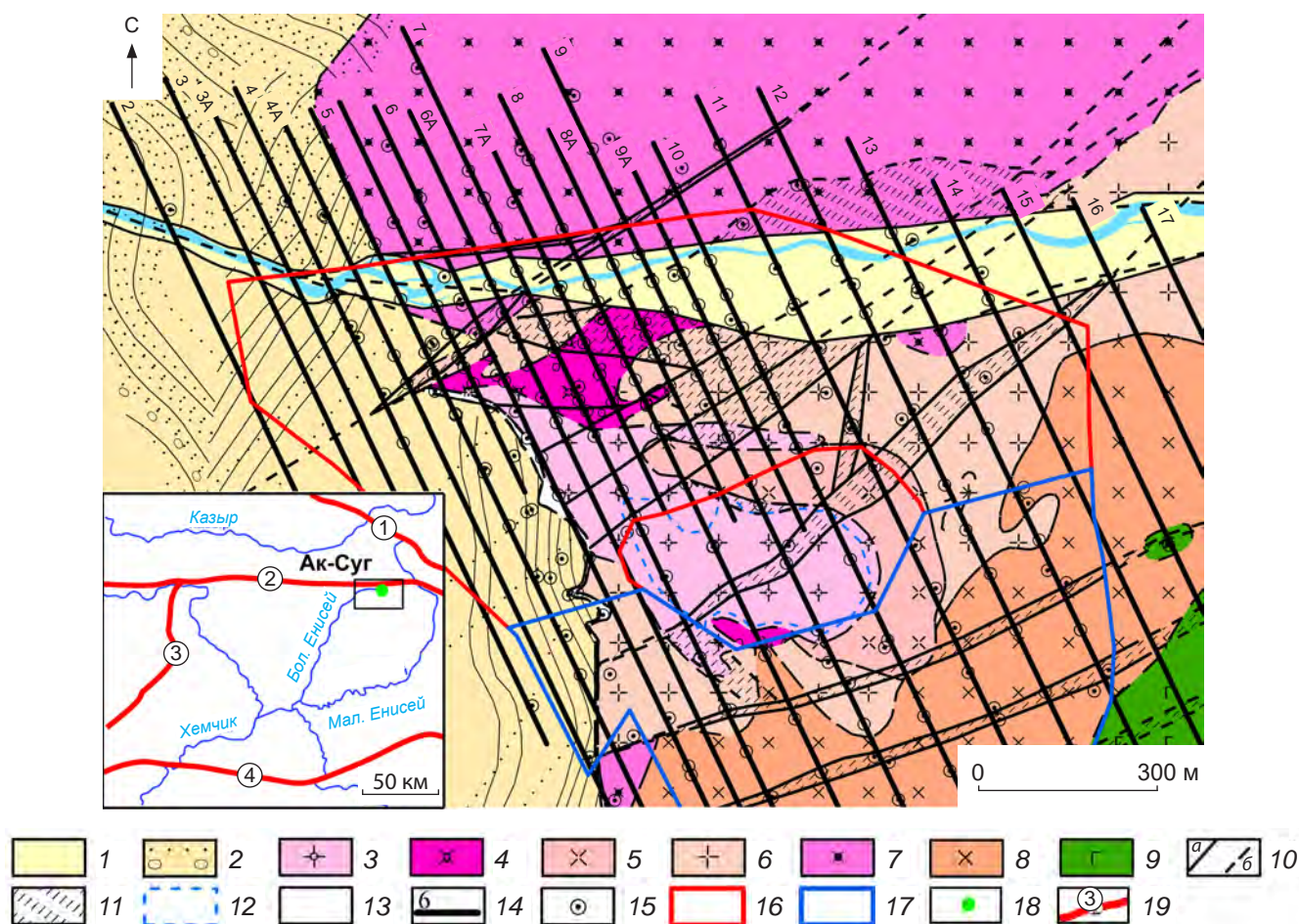


Рис. 1. Геологическая карта месторождения Ак-Суг, по материалам разведочных работ (Ю. В. Глушков, 2014):

1 – современные аллювиальные отложения; 2 – толтаковская свита среднего девона (красноцветные туффосланники, туфоконгломераты); гранитоиды Ак-Сугского массива: 3 – плагиогранит-порфиры, 4 – тоналит-порфиры, 5 – тоналиты порфиоровидные, 6 – тоналиты, плагиограниты слабопорфиоровидные, 7 – безрудные, метасоматически изменённые тоналиты, 8 – кварцевые диориты, тоналиты, 9 – диориты, габбродиориты; 10 – тектонические нарушения достоверные (а), предполагаемые (б); 11 – зоны смятия, дробления, рассланцевания; 12 – «кварцевое ядро»; 13 – милониты; 14 – разведочные линии, их номера; 15 – скважины; 16 – контур Северной рудной залежи; 17 – контур Южной рудной залежи; на врезке: 18 – месторождение Ак-Суг; 19 – региональные разломы, их номера: 1 – Восточно-Саянский, 2 – Кандатский, 3 – Куртушибинский, 4 – Хемчикско-Азасский

Fig. 1. Geological map of Ak-Sug deposit, based on exploration data (Yu. V. Glushkov, 2014):

1 – recent alluvial deposits; 2 – Middle Devonian Toltakovskaya suite (redbed tuff sandstones, tuff conglomerates); Ak-Sug massif granitoids: 3 – plagiogranite porphyries, 4 – tonalite porphyries, 5 – porphyry-like tonalites, 6 – tonalites, poorly porphyric plagiogranites, 7 – metasomatically altered barren tonalites, 8 – quartz diorites, tonalites, 9 – diorites, gabbrodiorites; 10 – tectonic deformations: actual (a), inferred (b); 11 – crumple, crush, schistosity zones; 12 – “quartz core”; 13 – milonites; 14 – prospecting lines, their numbers; 15 – drillholes; 16 – contour of Severnaya orebody; 17 – contour of Yuzhnaya orebody; inset: 18 – Ak-Sug deposit; 19 – regional faults, their numbers: 1 – Vostochno-Sayansky, 2 – Kandatsky, 3 – Kurtushibinsky, 4 – Khemchiksky-Azassky

площади рудного поля. Предполагается, что они сформировались последовательно, в несколько фаз, образовав при этом обычный гомодромный ряд от диоритов и габбро по южной периферии массива до плагιοгранитов и кварц-плагииоклазовых порфиров в его центральной части. Ак-Сугский массив имеет клиновидную форму, вытянут в северо-западном направлении. С севера он ограничен зоной Кандатского глубинного разлома, на востоке и юго-востоке также по зоне дробления контактирует с эффузивами хамсаринской свиты и гранодиоритами таннуольского комплекса. Южная и западная границы – тектонические с красноцветными девонскими отложениями (вулканогенно-осадочные породы толтаковской свиты) [6, 7, 10].

Структура месторождения определяется позицией и морфологией Ак-Сугского интрузивного массива, контролирующего пространственное размещение околорудных и рудовмещающих метасоматитов, а также рудной минерализации. Интрузивный массив располагается вблизи стыка двух региональных разломов – Ак-Сугского и Челдезрикского. Ак-Сугский разлом ограничивает рудоносную интрузию с севера, имеет близширотное простирание и является ветвью Кандатского глубинного разлома. Челдезрикский разлом ориентирован северо-западно, следует вдоль северного борта Даштыгойского грабена, в значительной мере определяя морфологию последнего. Даштыгойский грабен прослеживается в меридиональном и северо-западном направлении более чем на 35 км при ширине 2,5–5 км и выполнен осадочно-вулканогенными девонскими породами (песчаники – 20 %, гравелиты, конгломераты – 30 %, вулканиты кислого состава – 30 %, алевролиты и аргиллиты – 20 %). Месторождение Ак-Суг соприкасается с грабеном по тектоническому нарушению. Зона Ак-Сугского разлома выражена мощной полосой дробления, интенсивной трещиноватости и расщепления пород (до нескольких сотен метров). В пределах месторождения она проявлена отрицательными формами рельефа – долиной р. Ак-Суг, а на глубине подсечена многими скважинами. В

скважинах зона разлома прослеживается интервалами развальцевания пород (до тектонической глинки) с частыми кавернами, заполненными сыпучим мелкозернистым материалом, преимущественно кварц-полевошпатового состава. Мощность тектонически нарушенных интервалов – от первых метров до десятков метров.

Зоны развальцевания и дробления имеют западно-юго-западное простирание и преимущественно крутое (70–85°) падение на север, являясь таким образом многочисленными мелкими ответвлениями основной структуры широтного простирания. Зона дробления и смятия пород сопровождается широкой полосой трещиноватости, охватывающей практически всё рудное поле месторождения. При этом среди систем трещиноватости самой различной ориентировки преобладает юго-западная при крутом падении на северо-запад или юго-восток. Наблюдаются и пологопадающие трещины, но они распространены в меньшей степени. Наибольшая густота трещин отмечается в пределах Северной рудной залежи и в центральной части месторождения («кварцевое ядро»). Количество трещин при этом составляет от 7–10 до 50–70 на один погонный метр. К югу от «кварцевого ядра» интенсивность трещиноватости уменьшается в два-три раза. Преобладающее юго-западное направление простирания трещиноватости характерно не только для всех пород интрузии, но для красноцветных отложений к западу от месторождения.

В целом метасоматическая зональность месторождения Ак-Суг согласуется с типовой зональностью метасоматической колонны медно-порфировых объектов, имеющей вид (от центра к периферии): «кварцевое ядро» → кварцевые, серицит-кварцевые метасоматиты ± калиевые метасоматиты → кварц-серицитовые и кварц-серицит-хлоритовые метасоматиты → аргиллизиты → пропициты. Калиевые метасоматиты развиты очень слабо. Картина зональности на отдельных участках иногда усложняется наложенной аргиллизацией, а также непосредственным соседством пропицитов с породами «кварцевого ядра». Аргиллизиты



не образуют какой-то определённо очерченной зоны, они встречаются в виде отдельных участков в зонах кварц-серицитовых и кварцевых метасоматитов. Около 80 % запасов руд месторождения сосредоточено в кварц-серицитовых, кварц-серицит-хлоритовых метасоматитах, аргиллизитах и аргиллизированных породах, образованных, прежде всего, за счёт порфировых интрузий. Оруденение Ак-Сугского месторождения представлено прожилковыми и прожилково-вкрапленными рудами [6].

Особенностью Ак-Сугского месторождения является отсутствие калиевых метасоматитов с ортоклазом и биотитом, обычно приуроченных к внутренней зоне. Вместе с тем в рудном поле в качестве внешнего ореола развиты ранние кварц-калишпатовые прожилки с халькопиритом и пиритом в диоритах, кварцевых диоритах и гранодиоритах, то есть в породах первой фазы. Вероятно, отсутствие широкого проявления калиевого метасоматоза может быть объяснено натровым уклоном магматизма при становлении Ак-Сугской интрузии.

Установлено, что в процессе становления Ак-Сугского интрузивного массива отделение восходящих флюидов было неоднократным, что и привело вначале к формированию связанной с ранней фазой обширной зоны пропилитизации, а затем – зон кварц-серицитового, кварцевого метасоматоза и аргиллизации, обусловленных внедрением более кислых по составу поздних фаз. Большая часть промышленного молибденово-медного оруденения образовалась вслед за внедрением порфиров ранней генерации. С поздней фазой порфиров, по-видимому, связано переотложение ранее образовавшихся руд и формирование богатых скоплений в виде крутопадающей пластинообразной залежи, ориентированной в широтном направлении в трещинной зоне Ак-Сугского разлома (Северная рудная залежь).

Поздняя фаза была рудоносной в меньшей степени, чем первая, и сопровождалась интенсивным окварцеванием, что привело к образованию в центральной части месторождения «кварцевого ядра». К северу от него развита кварц-серицитовая зона с богатыми молиб-

деново-медными рудами, затем следует пропилитовая с преимущественно прожилковой минерализацией пирита. Гипогенные минеральные ассоциации отложились на месторождении минимум в восемь стадий, разделённых катаклазом [7]: 1) пирит-кварцевая (кварц, пирит, магнетит, гематит, ферберит); 2) сульфидно-карбонат-кварцевая (кварц, кальцит, калиевый полевой шпат, пирит, халькопирит, борнит, теннантит); 3) галенит-молибденит-теннантит-халькопирит-кварцевая (кварц, халькопирит, теннантит, молибденит, пирит, галенит, сфалерит); 4) золото-пирит-борнит-халькопирит-кварцевая (кварц, борнит, халькопирит, пирит, галенит, барит, золото); 5) золото-теллуридно-борнит-халькопирит-кварцевая (кварц, халькопирит, борнит, пирит, теннантит-тетраэдрит, галенит-клаусталит, алтаит, гессит, петцит, золото, калаверит, креннерит, сильванит, эмпрессит, штюцит, мутманнит, меренскиит, арсенопалладинит, сопчеит, темагамит, самородный теллур, барит, молибденит, кобальтин, энаргит); 6) золото-пирит-халькопирит-блётчлорудно-кварцевая (кварц, теннантит-тетраэдрит, халькопирит, пирит, галенит-клаусталит, борнит, касситерит, энаргит, науманнит, барит, ангидрит, сфалерит, золото и электрум); 7) золото-висмутотеллуридно-сульфидно-кварцевая (кварц, халькопирит, пирит, борнит, висмутсодержащий теннантит, золото, гессит, петцит, цумоит, кавацулит, тетрадимит, виттихенит, айкинит и барит); 8) кварц-карбонатная (кварц, кальцит, анкерит, барит, ангидрит).

Рудный процесс завершился формированием ангидрит-гипсовых прожилков.

В целом представляется, что образование многофазной гранитоидной интрузии и связанного с ней оруденения на месторождении Ак-Суг происходило длительное время, поскольку породы ранних фаз интрузии обнаруживаются в гальке отложений ниже-среднедевонского возраста, а процесс аргиллизации наложен на последние.

В формировании минералого-геохимической зональности месторождения принимают участие многочисленные метасоматические процессы, взаимоотношение которых создаёт

сложную рудно-метасоматическую структуру, определяющую сложное строение месторождения Ак-Суг.

Методика исследований. Изучалась коллекция прозрачных и полированных шлифов руд и вмещающих пород, переданная геологической службой ООО «Тывамедь». Для повышения качества наблюдений полированные шлифы были подвергнуты переполровке.

Методы исследования руд Ак-Сугского месторождения включали петрографическое изучение прозрачных шлифов (микроскоп Axioskop 40APOL) и минераграфическое – полированных шлифов (микроскоп Olympus BX 51) с последующим определением химического состава минералов. Для этого применялся сканирующий электронный микроскоп Tescan Vega3 SBH с ЭДС анализатором OxfordX-Act (R&D Центр НН СФУ, г. Красноярск, аналитики С. А. Сильянов и Б. М. Лобастов). При работе на сканирующем микроскопе выполнялись следующие условия: ускоряющее напряжение 20 кВ; ток зонда 2,3 нА (на чаше Фарадея); время съёмки – 120 с. Накопление спектров производилось из точки до шкалы в 300 тыс. импульсов. При анализе использованы образцы химически чистых элементов и соединений стандартов MAC (Micro-Analysis Consultants Ltd, Великобритания, рег. № 11192): Ti, Fe, V, Zr, Y, GaP (P), SrF₂ (Sr), LaB₆ (La), CeO₂ (Ce), NaCl (Cl), CaF₂ (F), SiO₂ (Si), Al₂O₃ (Al), MgO (Mg), CaF₂ и волластонит (Ca).

Для элементов S (Ka), Fe (Ka), Co (Ka), Ni (Ka), Cu (Ka), Zn (Ka), As (La), Sb (La) и Pb (Ma) в качестве стандартов использовались чистые металлы (Co, Ni) и следующие соединения: FeS, FeS₂, FeAsS, ZnS, CuFeS₂, Sb₂S₃, PbTe.

Измерение тока зонда производилось на стандарте металлического кобальта MAC (рег. № 9941) через каждые 60 минут исследования. Обработка результатов проводилась с помощью ПО Oxford Instruments.

Самородная медь золото-медно-порфирового месторождения Ак-Суг. По данным документации керн скважин, самородная медь была обнаружена в скважинах 3г-1, 4а-1, 4а-2, 4-3, 4-4, 5а-2-1, 5а-3, 5а-4, 5г-1, 5-4, 11-2 на глубинах от 32,0 до 386,0 м (запад и северо-за-

пад месторождения) (рис. 2). В ходе изучения представленной коллекции прозрачных и полированных шлифов авторами статьи самородная медь подтверждена в скважинах 3г-1, 5г-1 и 5-4.

В изученных образцах самородная медь тяготеет к карбонатно-кварцевым прожилкам, образуя прожилковидные, амёбовидные выделения и рассеянную вкрапленность. При этом крупные частицы амёбовидной (до первых мм) и прожилковой (до нескольких см по удлинению при мощности до первых мм) форм, как правило, окружены пылевидными и мелкими ((0,001–0,002)–(0,05–0,1) мм) частицами меди округлой и неправильной форм.

Интересная особенность, отмеченная в ходе изучения руд месторождения, – значительное сокращение количества сульфидных минералов при появлении самородной меди. Как правило, выделения самородной меди не сопровождаются сульфидной минерализацией. Исключение – образец, отобранный из скважины 5-4 с глубины 263,1 м, содержащий небольшое (менее одного процента от объёма) количество борнита. Вторичные минералы меди (куприт, азурит, малахит) встречаются до глубины 160 м, как правило, в небольшом количестве (менее 1 %), кроме образца из скважины 5г-1 (глубина отбора 122,3 м), в котором самородная медь подверглась существенному (местами полному) замещению купритом, развивающимся в виде кайм, и малахитом. В то же время из регулярно встречающихся минералов-спутников, диагностируемых в отражённом свете, отмечены гематит и рутил.

Вмещающие кварц-карбонатные прожилки с самородной медью (образцы 3г-1-132,0; 5-4-154,0; 5-4-172,5; 5-4-263,1; 5-4-356,0) породы – метасоматически изменённые плагиогранит-порфиры, тоналиты и плагиограниты. По результатам изучения прозрачных шлифов на данных интервалах самородная медь встречается, как правило, в интенсивно расслабленных породах. При этом отдельные порфирокласты кварца и фрагменты кварцевых прожилков «плавают» в массе серицита. Часто отмечается наложенная карбонатизация. В скважине 5-4 (интервал 356,0 м) медь от-

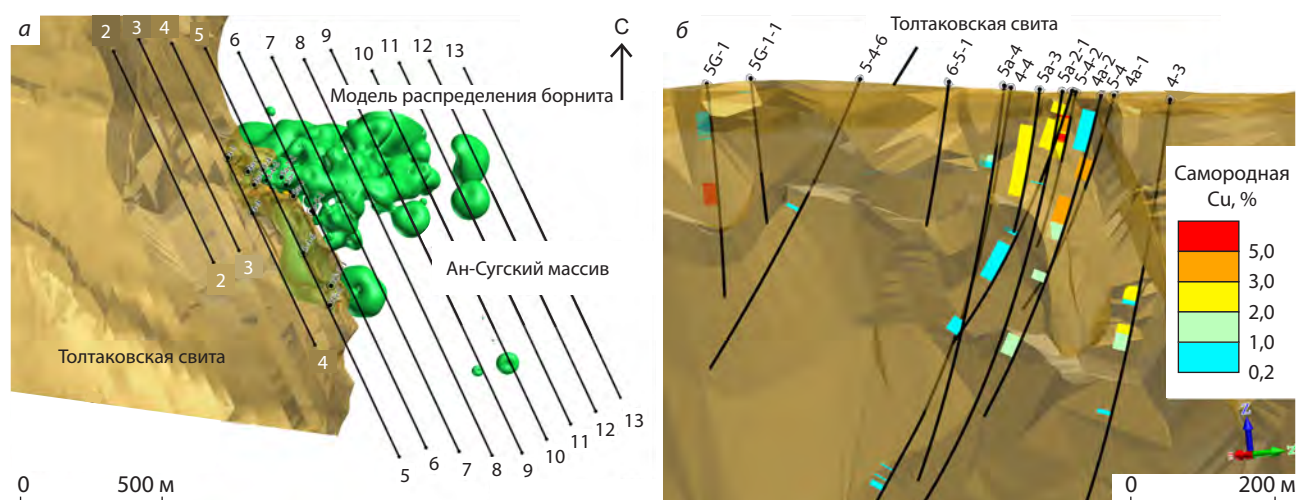


Рис. 2. Характер распределения борнита и самородной меди на месторождении Ак-Суг:

a – объёмная модель распределения борнита в границах содержания минерала более 0,3 % (проекция на план); *b* – интервалы с самородной медью в скважинах на границе Ак-Сугского массива и толтаковской свиты девона, по материалам разведочных работ (Ю. В. Глушков, 2014) (проекция скважин на вертикальную плоскость по разведочной линии 5-5)

Fig. 2. Distribution pattern of bornite and native copper at Ak-Sug deposit:

a – 3D bornite distribution model within mineral content limits of over 0.3 % (plan projection); *b* – native copper intervals in drillholes at the boundary between Ak-Sug massif and Devonian Toltakovskaya suite, based on exploration data (Yu. V. Glushkov, 2014) (hole projection on a vertical plane along prospecting line 5-5)

мечена в частично раздробленном и карбонатизированном прожилке. Минерал в виде рассеянной неравномерно вкрапленности отмечается вдоль всего прожилка (зёрна размером 0,005–1,5 мм, зёрна менее 0,05 мм имеют преимущественно изометрическую или слабо удлиненную форму, более крупные – амёбовидную). Судя по морфологии и взаимоотношениям минералов, формирование меди происходило близкоодновременно с процессом карбонатизации.

Учитывая незначительную мощность зоны окисления Ак-Сугского месторождения, наличие самородной меди как в приповерхностной части, так и на глубоких его горизонтах может свидетельствовать о различных механизмах её формирования.

Самородная медь в скважине 5г-1 в интервалах 62,2, 122,3 и 159,1 м представляет собой, вероятно, гипергенную медь. Самородная медь

здесь образует мелкие, неправильной формы выделения, тонкие, переплетающиеся прожилки, а также замещается и обрастает купритом, малахитом и ассоциирует с гидроокислами железа. По химическому составу эта медь является чистой и не содержит примесей.

По результатам электронно-микроскопического изучения медь, обнаруженная в составе скважины 5-4 (интервал 154,0 м), имеет беспримесный состав и тесно срачивается с рутилом, цирконом и фторапатитом (рис. 3; табл. 1).

Самородная медь в этой же скважине, на интервале 263,1 м, содержит примесь мышьяка в количестве от 2,35 до 4,5 мас. % и активно замещается арсенидами меди – альгодонитом и домейкитом. Отметим, что в этом образце медь также наблюдается в составе тонкого (2–4 мм) кварц-карбонатного (кварц, кальцит, доломит) прожилка и находится в весьма тесном

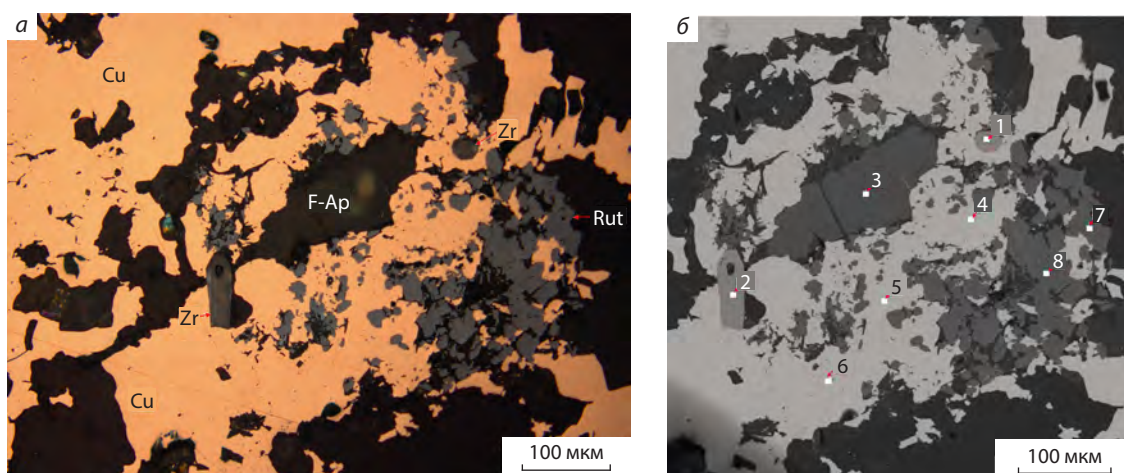


Рис. 3. Самородная медь в сростании с цирконом, F-апатитом и рутилом. Образец 5-4-154,0 в отражённом свете (а), в обратнорассеянных электронах (б):

Cu – самородная медь; Zr – циркон; F-Ap – фторапатит; Rut – рутил; номера точек анализов см. табл. 1

Fig. 3. Native copper intergrown with zircon, F-apatite and rutile. Sample 5-4-154,0 in reflected light (a), in backscattered electrons (b):

Cu – native copper, Zr – zircon, F-Ap – F-apatite; Rut – rutile; see Table 1 for analysis point numbers

1. Химический состав самородной меди и срощивающихся с ней минералов (образец 5-4-154,0)

1. Chemical composition of native copper and intergrown minerals (sample 5-4-154,0)

№ анализа	Содержания элементов, мас. %									Сумма	Минерал
	O	F	Si	P	Cl	Ca	Ti	Cu	Zr		
1	36,11	-	14,49	-	-	-	-	-	51,14	101,74	Циркон
2	35,96	-	14,47	-	-	-	-	-	51,49	101,92	Циркон
3	26,66	3,05	-	19,48	0,39	37,85	-	-	-	97,43	F-апатит
4	-	-	-	-	-	-	-	99,69	-	99,69	Медь
5	-	-	-	-	-	-	-	98,10	-	98,10	Медь
6	-	-	-	-	-	-	-	99,52	-	99,52	Медь
7	41,47	-	-	-	-	-	59,10	-	-	100,56	Рутил
8	41,37	-	-	-	-	-	58,71	-	-	100,08	Рутил

Примечание. Номера точек анализов см. рис. 3, б.

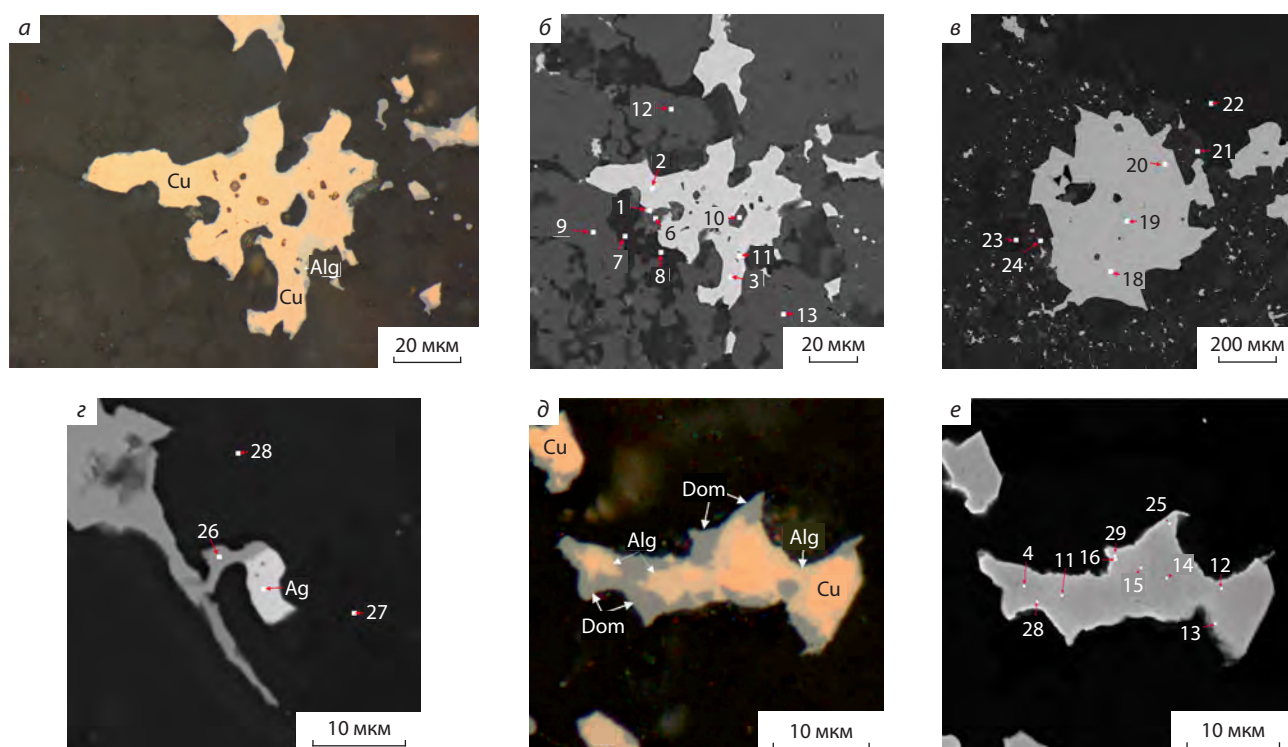


Рис. 4. Зёрна и агрегаты мышьяксо­дер­жа­щей са­мо­род­ной ме­ди. Об­раз­ец 5-4-263,1 в от­ра­жён­ном све­те (а), в об­рат­но­рас­се­ян­ных элек­т­ро­нах (б–г):

Cu – са­мо­род­ная ме­дь; Alq – аль­го­донит; Ag – се­реб­ро; Dom – до­мей­кит; но­ме­ра то­чек ана­ли­зов см. табл. 2, 3

Fig. 4. Grains and aggregates of arsenical native copper. Sample 5-4-263,1 in reflected light (a), in backscattered electrons (b-d):

Cu – native copper; Alq – algonite; Ag – silver; Dom – domeykite; see Tables 2, 3 for analysis point numbers

2. Хи­ми­че­ский со­став мышьяк­со­дер­жа­щей са­мо­род­ной ме­ди (об­раз­ец 5-4-263,1)

2. Chemical composition of arsenical native copper (sample 5-4-263,1)

№ ана­ли­за	№ ри­сун­ка	Со­дер­жа­ния эле­мен­тов, мас. %			Сум­ма
		Fe	Cu	As	
2	4, б	-	97,51	2,55	100,07
3	4, б	-	97,63	2,35	99,98
14	4, е	-	96,56	2,48	99,04
18	4, в	-	97,04	4,31	101,35
19	4, в	-	98,00	2,87	100,87
20	4, в	-	97,63	3,87	101,50
26	4, з	0,88	94,02	4,40	99,29

Примечание. Но­ме­ра то­чек ана­ли­зов см. рис. 4, б–е.

сра­стания с мно­го­чис­лен­ны­ми зёр­нами и кри­стал­лами ф­то­ра­па­ти­та и зёр­нами ба­ри­та (рис. 4; табл. 2, 3).

Ин­те­рес­но, что кро­ме ука­зан­ных ми­не­ра­лов в сра­стания и в ас­со­ци­а­ции с мышьяк­со­дер­жа­щей са­мо­род­ной ме­дью об­на­ру­же­ны мел­кие зёр­на са­мо­род­но­го се­реб­ра, цир­ко­на, бран­не­ри­та $U(Ti,Fe)_2O_6$, ксе­но­ти­ма-(Y) (Y,Dy,Gd,Er,U,Tb)PO₄ и ф­ло­рен­си­та-(Ce) (Sr,Ce,La,Nd)Al₃(PO₄)₂(OH)₆. В э­ти­х же про­жил­ках об­на­ру­же­ны се­лен­со­дер­жа­щий халь­ко­зин и бер­це­ли­анит (Cu₂Se). По­след­ний ха­рак­тер­ен для низ­ко-

температурных гидротермальных месторождений урана [15].

Альгодонит Cu_6As и домейкит Cu_3As относятся к редким минералам месторождения Ак-Суг. Выделены и диагностированы в составе скважины 5-4 на интервале 263,1 м как фазы, обрастающие по краям и замещающие агрегаты мышьяксодержащей самородной меди (см. рис. 4 д, е; табл. 4).

В целом оба минерала являются редкими, малораспространёнными фазами. Ещё более редкий минерал – коутекит Cu_5As_2 , также обнаруженный в составе аншлифа 5-4-263,1 и представленный самостоятельными зёрнами размером до $0,016 \times 0,020$ мм (рис. 5; табл. 5).

Обсуждение результатов. Известно, что гипогенная медь гидротермального происхождения ассоциирует с халькозином, арсенидами меди, карбонатами. Медь гипергенного происхождения находится в ассоциации с купритом, гидрооксидами железа и гидрокарбонатами меди.

На золото-медно-порфировых месторождениях самородная медь отмечалась в основном только в зонах окисления как гипергенный минерал [5, 9, 10, 16]. На Ак-Сугском месторождении самородная медь в виде ксеноморфных вкрапленников размером до нескольких сантиметров и прожилками мощностью до нескольких миллиметров была обнаружена в туфо песчаниках толтаковской свиты $D1(?)tl$ [10]. Источник меди и её генезис не обсуждался. Априори считалось, что вся самородная медь месторождения является гипергенной.

Обнаружение авторами данной статьи мышьяковистой меди, замещающейся редкими арсенидами меди (альгодонит, домейкит, коутекит) на значительных глубинах и в составе кварц-карбонатных прожилков, позволяет по-новому взглянуть на происхождение части самородной меди месторождения Ак-Суг. Содержание мышьяка в меди изученных образцов варьирует от 0,0 до 34,5 мас. % (рис. 6).

По экспериментальным данным, растворимость мышьяка в меди составляет 6,83 ат. % при эвтектической температуре 685°C , примерно 6,5 ат. % при температуре перитектоидного превращения и около 5,1 ат. % при 25°C

[4]. Обнаруженная авторами фаза-1 (см. рис. 6) с подобными содержаниями мышьяка может быть отнесена к самородной меди с незначительной примесью мышьяка или к минералу витнеиту, имеющему состав (Cu,As) , однако этот вопрос может быть решён однозначно только на основе рентгеноструктурных исследований. Вторая фаза (фаза-2), содержащая в своём составе 15–16 мас. % мышьяка, является, по всей видимости, альгодонитом с теоретической формулой Cu_6As или Cu_8As (см. табл. 4) [15]. По данным справочной литературы, синтетическая фаза (фаза β , см. рис. 6), аналогичная по составу этому минералу, устойчива ниже 325°C . Третий состав (фаза-3) с содержанием мышьяка 19–20 ат. % согласно диаграмме состояния является гетерогенным и также может существовать ниже 325°C . Четвёртая обнаруженная фаза (фаза-4) (см. рис. 6) с содержаниями мышьяка 27–31 мас. % (см. табл. 4) удовлетворительно пересчитывается на кубический минерал α -домейкит состава Cu_3As . Синтетическая кубическая фаза, соответствующая α -домейкиту, устойчива ниже 225°C и 100 МПа [15]. Согласно Скиннеру и Льюису, α -домейкит устойчив вообще ниже 90°C [24]. Наконец, пятая обнаруженная фаза (фаза-5) (см. рис. 6) с содержаниями мышьяка 31,5–34,5 мас. % (см. табл. 5) вполне соответствует минералу коутекиту. Гексагональный коутекит, в свою очередь, отвечает синтетической фазе Cu_2As , устойчивой ниже 300°C , которая образуется при эвтектоидном распаде высокотемпературной тетрагональной γ -фазы Cu_5As_2 [15].

При этом известно, что формирование домейкита и альгодонита связано с гидротермальными процессами [20, 21]. Таким образом, изученные фазы состава медь–мышьяк Ак-Сугского месторождения могли формироваться в низкотемпературном интервале от 225 до 300°C .

Образование самородной меди в зоне гипергенеза связано с увеличением окислительного потенциала и связыванием железа и серы соответственно в оксидной и сульфатной формах. При этом также возникают сульфиды меди с пониженным содержанием Fe и



3. Химические составы минералов, ассоциирующих с мышьяксодержащей самородной медью (образец 5-4-263,1)

3. Chemical compositions of minerals associated with arsenical native copper (sample 5-4-263,1)

№ анализа	№ рисунка	Содержания элементов, мас. %												
		O	F	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ca	Mn	Fe	Sr	Ba
1	4, б	29,6	-	-	-	-	-	15,1	-	-	-	-	6,76	50,17
6	4, б	40,68	4,69	-	0,75	-	18,96	0,27	-	37,31	-	-	-	-
7	4, б	50,59	-	-	-	46,48	-	-	-	1,07	-	-	-	-
8	4, б	49,54	-	-	-	46,65	-	-	-	-	-	-	-	-
9	4, б	36,23	4,87	-	-	-	19,98	-	-	38,51	-	-	-	-
10	4, б	39,26	5,11	-	-	-	19,42	-	-	38,73	-	-	-	-
12	4, б	38,43	3,92	-	-	-	20,48	-	-	40,04	-	-	-	-
13	4, б	36,55	5,49	-	-	-	20,16	-	-	40,23	-	-	-	-
21	4, в	52,22	-	-	-	-	-	-	-	47,79	-	-	-	-
22	4, в	49,78	-	-	-	47,69	-	-	-	-	-	-	-	-
23	4, в	51,11	-	-	-	49,29	-	-	-	-	-	-	-	-
24	4, в	36,56	6,68	-	-	-	17,94	-	0,12	40,15	-	-	-	-
27	4, г	54,33	-	14,33	-	-	-	-	-	27,27	0,77	3,27	-	-
28	4, г	53,49	-	12,33	-	-	-	-	-	26,24	1,19	6,72	-	-

Примечание. Номера точек анализов см. рис. 4, б–г. Номерам анализов соответствуют следующие минералы: 1 – барит; 6, 9, 10, 12, 13, 24 – F-апатит; 7, 8, 22, 23 – кварц; 21 – кальцит; 27, 28 – доломит.

4. Химический состав арсенидов меди, обрастающих и замещающих самородную медь (образец 5-4-263,1)

4. Chemical composition of copper arsenides overgrowing and replacing native copper (sample 5-4-263,1)

№ анализа	Содержания элементов, мас. %			Сумма	Минерал	Кристаллохимическая формула
	Fe	Cu	As			
4	-	84,37	15,63	100,00	Альгодонит	$Cu_{6,05}As_{0,95}$
11	0,49	85,18	15,94	101,61	Альгодонит	$(Cu_{6,01}Fe_{0,04})_{6,05}As_{0,95}$
12	-	84,10	15,74	99,84	Альгодонит	$Cu_{6,04}As_{0,96}$
13	-	83,34	16,11	99,45	Альгодонит	$Cu_{6,01}As_{0,99}$
15	0,49	81,20	19,08	100,78	Альгодонит	$(Cu_{5,80}Fe_{0,04})_{5,84}As_{1,16}$
16	0,54	69,63	31,12	101,30	Домейкит	$(Cu_{2,88}Fe_{0,03})_{2,91}As_{1,09}$
25	-	68,66	29,0	97,67	Домейкит	$Cu_{2,94}As_{1,06}$
28	-	70,4	26,9	97,30	Домейкит	$Cu_{3,02}As_{0,98}$
29	-	67,73	28,65	96,37	Домейкит	$Cu_{2,94}As_{1,06}$

Примечание. Номера точек анализов см. рис. 4, е.

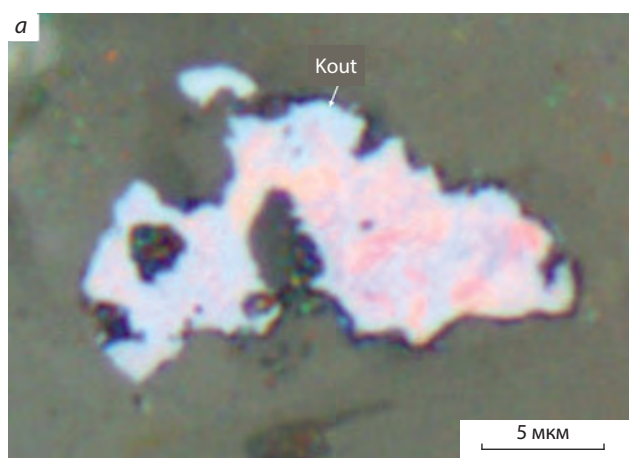
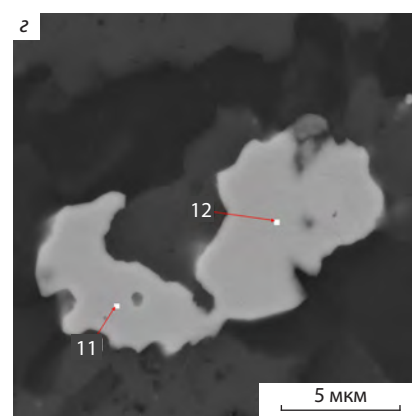
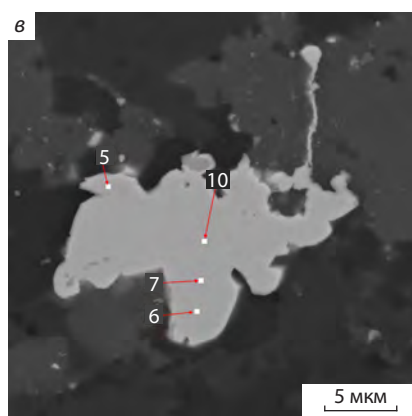
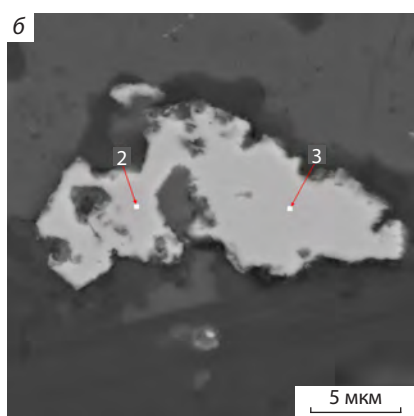


Рис. 5. Зёрна коутекита. Образец 5-4-263,1 в отражённом свете (а), в обратнорассеянных электронах (б–д):

Kout – коутекит; номера точек анализов см. табл. 5

Fig. 5. Koutekite grains. Sample 5-4-263,1 in reflected light (a), in backscattered electrons (b-d)

Kout – koutekite; see Table 5 for analysis point numbers



5. Химический состав коутекита месторождения Ак-Суг (образец 5-4-263,1)

5. Chemical composition of Ak-Sug deposit koutekite (sample 5-4-263,1)

№ анализа	№ рисунка	Содержания элементов, мас. %			Сумма	Кристаллохимическая формула
		Cu	As	Fe		
2	5, б	65,96	34,38	0,52	100,86	$(\text{Cu}_{4,83}\text{Fe}_{0,04})_{4,87}\text{As}_{2,13}$
3	5, б	66,05	34,53	0,32	100,90	$(\text{Cu}_{4,83}\text{Fe}_{0,03})_{4,86}\text{As}_{2,14}$
5	5, в	68,99	30,76	-	98,94	$\text{Cu}_{5,08}\text{As}_{1,92}$
6	5, в	68,85	30,72	0,43	100,00	$(\text{Cu}_{5,05}\text{Fe}_{0,04})_{5,09}\text{As}_{1,91}$
7	5, в	70,3	31,56	0,28	102,14	$(\text{Cu}_{5,05}\text{Fe}_{0,02})_{5,07}\text{As}_{1,93}$
10	5, в	69,72	31,37	-	101,09	$\text{Cu}_{5,07}\text{As}_{1,93}$
11	5, г	67,09	32,14	-	99,23	$\text{Cu}_{4,98}\text{As}_{2,02}$
12	5, г	67,92	32,08	-	100,00	$\text{Cu}_{5,00}\text{As}_{2,00}$

Примечание. Номера точек анализов см. рис. 5, б–г.

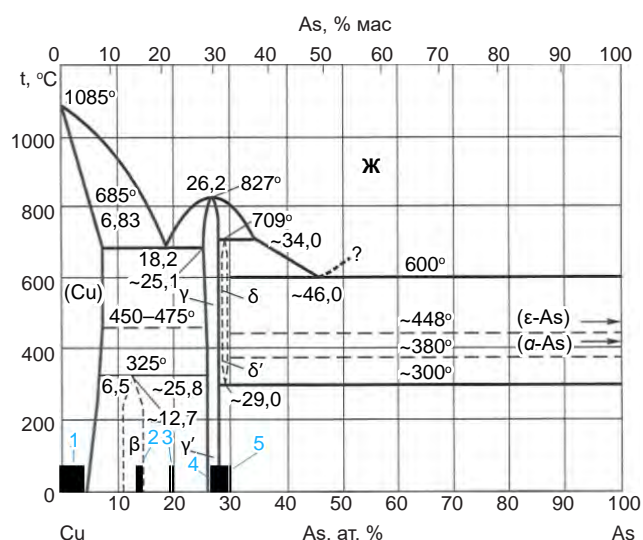


Рис. 6. Диаграмма состояния системы Cu-As по [4] с участками составов арсенидов меди Ак-Сугского месторождения (фазы 1-5 – чёрные прямоугольники)

Fig. 6. Diagram of Cu-As system state after [4] with areas of copper arsenide composition, Ak-Sug deposit (black rectangles)

безжелезистые: борнит, халькозин, ковеллин [22].

Известно также, что в образовании гипогенной медной минерализации на медно-порфировых объектах участвуют сложные высококонцентрированные растворы, имеющие хлоридно-сульфатный состав и высокие концентрации солевых компонентов [3]. В этих условиях медь подвижна, поэтому для образования самородной необходимо её выпадение из хлоридного комплекса в условиях восстановительной среды и при отсутствии сульфидной серы [18]. Осаждению меди из раствора будут способствовать повышенные содержания фтора, а также слабощелочная среда [18]. Именно эти условия создались в исследованных кварц-карбонатных прожилках, где кроме самородной меди и арсенидов меди в большом количестве проявились фторapatит, браннерит и редкоземельные минералы (ксенотим-(Y), флоренсит-(Ce) и др.). Находки домейкита

и коутекита в низкотемпературных песчаниках с урановой минерализацией Индии и Казахстана были описаны в литературе давно [2, 23].

Возможно также, что гипогенная самородная медь Ак-Сугского месторождения возникла в ходе послерудного метаморфизма при дефиците серы и высокой активности мышьяка за счёт преобразования мышьяксодержащих медных сульфидов (теннантита, эннергита и других). Обнаружение в ассоциации с мышьяксодержащей самородной медью браннерита, ксенотима-(Y) и флоренсита-(Ce) не исключает также наложение на ранние руды более поздних магматических пород массива щелочных гранитов арысканского комплекса, проявленного на Арысканском месторождении редких земель, расположенном в 12 км к северо-востоку от Ак-Суга, где оруденение представлено редкоземельной и уран-мышьяковой минерализацией [11]. Выявление источника редкоземельных элементов на Ак-Сугском месторождении и анализ их связи с редкоземельной минерализацией Арысканского месторождения требует отдельного самостоятельного исследования.

Выводы:

1. На месторождении Ак-Суг присутствует два типа самородной меди: гипергенная, ассоциирующая с гидроокислами железа, с оксидами и гидрокарбонатами меди (купритом, малахитом и т. д.), и гипогенная медь. Гипогенная медь находится в составе кварц-карбонатных прожилков, содержит значительные количества мышьяка, замещается редкими арсенидами меди и ассоциирует с баритом, фторapatитом, цирконом, браннеритом, ксенотимом-(Y), флоренситом-(Ce), берцелианитом.

2. Формирование гипогенной самородной меди может быть связано с восходящими низкотемпературными метаморфогенными флюидами. Миграция флюидов осуществлялась по зоне расщеливания Ак-Сугского разлома.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Краевого фонда науки и Акционерного общества «Корпорация развития Енисейской Сибири» в рамках научного проекта № 20-45-242903.

Список литературы

1. Берзина А. Н., Берзина А. П., Гимон В. О. Cu-Мо-порфириновое месторождение Аксуг (Северо-Восточная Тува): хронология процессов магматизма и рудообразования (U-Pb, Re-Os изотопные данные), металлогенические следствия // Геология и геофизика. – 2019. – Т. 60 (9). – С. 1330–1349.
2. Абулгазина С. Д., Котельников П. Е., Сальков С. А., Тасов Б. М., Яренская М. А., Ясницкая Г. П. Новые данные о коутеките // Записки Всесоюзного минералогического общества. – 1991. – Ч. 120, вып. 2. – С. 49–51.
3. Борисенко А. С., Боровиков А. А., Житова Л. М., Павлова Г. Г. Состав магматогенных флюидов, факторы их геохимической специализации и металллоносности // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47, № 12. – С. 1308–1325.
4. Копылов Н. И., Каминский Ю. Д. Мышьяк / под ред. Г. А. Толстикова. – Новосибирск : Сибирское университетское издательство, 2004. – 367 с.
5. Кривцов А. И., Мигачёв И. Ф., Попов В. С. Медно-порфириновые месторождения мира. – М. : Недра, 1986. – 236 с.
6. Кужугет Р. В., Монгуш А. А., Монгуш А. О. Эволюция химического состава блёклых руд Ак-Сугского золото-молибден-медно-порфирирового месторождения (Северо-Восточная Тува) // Известия Томского политехнического университета. – Томск : Инжиниринг георесурсов, 2018. – Т. 329, № 2 – С. 81–91.
7. Кужугет Р. В., Монгуш А. О., Анкушева Н. Н. Источники серы сульфидов медно-золото-порфирирового месторождения Ак-Суг (Восточная Тува) // Минералогия. – 2019. – Т. 5, № 4. – С. 73–82.
8. Минералы. Справочник в 7 томах. Т. 1. Самородные элементы, интерметаллические соединения, карбиды, нитриды, фосфиды, арсениды, антимониды, висмутиды, сульфиды, селениды, теллуриды. – М. : Академия наук СССР, 1960. – 617 с.
9. Мовсесян С. А., Исаенко М. П. Комплексные медно-молибденовые месторождения. – М. : Недра, 1974. – 344 с.
10. Монгуш А. Д., Лебедев В. И. Ак-Сугское медно-молибден-порфириновое месторождение: вещественный состав пород и руд // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2013. – Т. 1, № 42. – С. 22–29.
11. Никифоров А. В., Хертек А. К., Козловский А. М. Арысканское редкоземельное месторождение: первые результаты Sm-Nd изотопных исследований, Восточная Тува // Материалы III Всероссийской школы-конференции с международным участием. – Кызыл : Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, 2017. – С. 99–102.
12. Новгородова М. И. Самородные металлы в гидротермальных рудах. – М. : Наука, 1983. – 281 с.
13. Савчук Ю. С., Волков А. В., Аристов В. В. Медистые базальты Северного Урала // Литосфера. – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 133–144.
14. Спиридонов Э. М., Плетнев П. А. Месторождение медистого золота Золотая Гора (о «золотородингитовой» формации). – М. : Научный мир, 2002. – 220 с.
15. Справочник-определитель рудных минералов в отражённом свете / Т. Н. Чвилева, М. С. Безсмертная, Э. М. Спиридонов [и др.]. – М. : Недра, 1988. – 504 с.
16. Титли С. Р., Бин Р. Э. Медно-порфириновые месторождения // Генезис рудных месторождений. Т. 1. – М. : Мир, 1984. – С. 245–333.
17. Уайт У. С. Месторождения самородной меди в северной части штата Мичиган // Рудные месторождения США. Т. 1. – М. : Мир, 1972. – С. 457–481.
18. Усенко У. В. Условия образования месторождений самородной меди Волюно-Подольской плиты // Известия Национальной Академии наук Украины. – 2010. – № 4. – С. 128–133.
19. Cornwall H. R. A summary of ideas on the origin of native copper deposits // Economic geology and the bulletin of the Society of Economic Geologists. – 1956. – V. 51, № 7. – P. 1–8.
20. Handbook of mineralogy. Elements, Sulfides and Sulfosalts. – 2003. – V. 1. – 588 p.
21. Pirajno F. Hydrothermal Processes and Mineral Systems. – 2010. – 1250 p.
22. Pracejus B. The ore minerals under the microscope: an optical guide, second edition. – Amsterdam : Elsevier, 2015. – V. 3. – 1118 p.
23. Singh Y., Singh K. D. P., Chhabra J., Srinivasan S., Sharma Y. C., Gupta R. K. First report of domeykite and koutekite (copper arsenides) in Siwalik sandstones of Romehra, Hamirpur district, Himachal Pradesh // Journal of the Geological Society of India. – 2002. – V. 60. – P. 695–699.
24. Skinner B. J., Luce F. D. Stabilities and composition of α -domykite and algodonite // Economic Geology. – 1971. – V. 66. – P. 133–139.



References

- Berzina A. N., Berzina A. P., Gimón V. O. Cu-Mo-porfirovoye mestorozhdenie Aksug (Severo-Vostochnaya Tuva): khronologiya protsessov magmatizma i rudoobrazovaniya (U-Pb, Re-Os izotopnye dannye), metallogenicheskie sledstviya [Cu-Mo-porphyry Aksug deposit (North-East Tuva): chronology of magmatism and ore formation processes (U-Pb, Re-Os isotope data), metallogenic consequences], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2019, V. 60 (9), pp. 1330–1349. (In Russ.).
- Abulgazina S. D., Kotel'nikov P. E., Sal'kov S. A., Tassov B. M., Yarenskaya M. A., Yasnitskaya G. P. Novye dannye o koutekite [New data on koutekite], *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva [Notes of the All-Union Mineralogical Society]*, 1991, V. 120, I. 2, pp. 49–51. (In Russ.).
- Borisenko A. S., Borovikov A. A., Zhitova L. M., Pavlova G. G. Sostav magmatogennykh flyuidov, faktory ikh geokhimicheskoi spetsializatsii i metalloznosti [Composition of magmatogenic fluids, factors of their geochemical specialization and metal content], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2006, V. 47, No 12, pp. 1308–1325. (In Russ.).
- Kopylov N. I., Kaminskii Yu. D. Mysh'yak [Arsenic], Novosibirsk, Sibirskoe universitetskoe izdatel'stvo Publ., 2004, 367 p.
- Krivtsov A. I., Migachev I. F., Popov V. S. Medno-porfirovoye mestorozhdeniya mira [World porphyry copper deposits], Moscow, Nedra Publ., 1986. – 236 p.
- Kuzhuget R. V., Mongush A. A., Mongush A. O. Evolyutsiya khimicheskogo sostava bleklykh rud Ak-Sugskogo zoloto-molibden-medno-porfirovogo mestorozhdeniya (Severo-Vostochnaya Tuva) [Evolution of the chemical composition of the fahlores of the Ak-Sug gold-molybdenum-copper-porphyry deposit (North-East Tuva)], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]*, Tomsk, 2018, V. 329, No 2, pp. 81–91. (In Russ.).
- Kuzhuget R. V., Mongush A. O., Ankusheva N. N. Istochniki sery sul'fidov medno-zoloto-porfirovogo mestorozhdeniya Ak-Sug (Vostochnaya Tuva) [Sources of sulfur sulfides of the copper-gold-porphyry deposit Ak-Sug (Eastern Tuva)], *Mineralogiya [Mineralogy]*, 2019, V. 5, No 4, pp. 73–82. (In Russ.).
- Mineraly. Spravochnik v 7 tomakh. T. 1. Samorodnye elementy, intermetallicheskie soedineniya, karbidy, nitridy, fosfidy, arsenidy, antimonidy, vismutidy, sul'fidy, selenidy, telluridy [Minerals. Reference book in 7 volumes. V. 1. Native elements, intermetallic compounds, carbides, nitrides, phosphides, arsenides, antimonides, bismuthides, sulfides, selenides, tellurides], Moscow, Akademiya nauk SSSR Publ., 1960, 617 p.
- Movsesyan S. A., Isaenko M. P. Kompleksnye medno-molibdenovye mestorozhdeniya [Complex copper-molybdenum deposits], Moscow, Nedra Publ., 1974, 344 p.
- Mongush A. D., Lebedev V. I. Ak-Sugskoe medno-molibden-porfirovoye mestorozhdenie: veshchestvennyi sostav porod i rud [Ak-Sug copper-molybdenum-porphyry deposit: material composition of rocks and ores], *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii [Bulletin of the Siberian Branch of the Earth Sciences Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, prospecting and exploration of ore deposits]*, 2013, V. 1, No 42, pp. 22–29. (In Russ.).
- Nikiforov A. V., Khertek A. K., Kozlovskii A. M. Aryskanskoe redkozemel'noe mestorozhdenie: pervye rezul'taty Sm-Nd izotopnykh issledovaniy, Vostochnaya Tuva [Aryskan rare earth deposit: first results of Sm-Nd isotope studies, Eastern Tuva], *Materialy III Vserossiiskoi shkoly-konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem [Proceedings of the III All-Russian school-conference with international participation]*, Kyzyl, Tuvinskii institut kompleksnogo osvoeniya prirodnnykh resursov SO RAN Publ., 2017, pp. 99–102. (In Russ.).
- Novgorodova M. I. Samorodnye metally v gidrotermal'nykh rudakh [Native metals in hydrothermal ores], Moscow, Nauka Publ., 1983, 281 p.
- Savchuk Yu. S., Volkov A. V., Aristov V. V. Medistye bazal'ty Severnogo Urala [Cuprous basalts of the Northern Urals], *Litosfera [Lithosphere]*, 2017, V. 17, No 3, pp. 133–144. (In Russ.).
- Spiridonov E. M., Pletnev P. A. Mestorozhdenie medistogo zolota Zolotaya Gora (o "zoloto-rodingitovoi" formatsii) [Field of the Copper gold Zolotaya Gora (about the "gold-rodingite" formation)], Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2002, 220 p.
- Spravochnik-opredelitel' rudnykh mineralov v otrazhennom svete [Reference book-identifier of ore minerals in reflected light], Ed. T. N. Chvileva, M. S. Bezsmertnaya, E. M. Spiridonov [et al.], Moscow, Nedra Publ., 1988, 504 p.
- Titli S. R., Bin R. E. Medno-porfirovoye mestorozhdeniya [Porphyry copper deposits], *Genezis*

- rudnykh mestorozhdenii. T. 1* [Genesis of ore deposits. V. 1], Moscow, Mir Publ., 1984, pp. 245–333. (In Russ.).
17. White U. S. Mestorozhdeniya samorodnoi medi v severnoi chasti shtata Michigan [Deposits of native copper in the northern part of Michigan], *Rudnye mestorozhdeniya SShA. T. 1* [Ore Deposits of the USA. T. 1], Moscow, Mir Publ., 1972, pp. 457–481. (In Russ.).
 18. Usenko U. V. Usloviya obrazovaniya mestorozhdenii samorodnoi medi Volyno-Podol'skoi plity [Conditions of the formation of a native copper mineralisation of the Volyn-Podolsk plate], *Izvestiya Natsional'noi Akademii nauk Ukrainy* [News of the National Academy of Sciences of Ukraine], 2010, No 4, pp. 128–133. (In Russ.).
 19. Cornwall H. R. A summary of ideas on the origin of native copper deposits, *Economic geology and the bulletin of the Society of Economic Geologists*, 1956, V. 51, No 7, pp. 1–8.
 20. Handbook of mineralogy. Elements, Sulfides and Sulfosalts, 2003, V. 1, 588 p.
 21. Pirajno F. Hydrothermal Processes and Mineral Systems, 2010, 1250 p.
 22. Pracejus B. The ore minerals under the microscope: an optical guide, second edition, Amsterdam, Elsevier, 2015, V. 3, 1118 p.
 23. Singh Y., Singh K. D. P., Chhabra J., Srinivasan S., Sharma Y. C., Gupta R. K. First report of domeykite and koutekite (copper arsenides) in Siwalik sandstones of Romehra, Hamirpur district, Himachal Pradesh, *Journal of the Geological Society of India*, 2002, V. 60, pp. 695–699.
 24. Skinner B. J., Luce F. D. Stabilities and composition of α -domykite and algodonite, *Economic Geology*, 1971, V. 66, pp. 133–139.

Авторы

Шведов Геннадий Иванович

доцент¹, инженер², g.shvedov@mail.ru

Самородский Павел Николаевич

кандидат геолого-минералогических наук
доцент кафедры геологии месторождений
и методики разведки¹, psamorodskiy@sfu-kras.ru

Макаров Владимир Александрович

доктор геолого-минералогических наук
заведующий кафедрой геологии месторождений
и методики разведки, директор¹, vmakarov58s@mail.ru

Муромцев Егор Алексеевич

аспирант¹, EgorMuromtsevSib@gmail.com

Шадчин Максим Викторович

аспирант¹, shamamr@gmail.com

Лобастов Борис Михайлович

инженер², ассистент кафедры геологии,
минералогии и петрографии¹, lbm02@ya.ru

Глушков Юрий Владимирович

главный геолог³, glushkovyv@mmcintergeo.ru

¹ Институт горного дела, геологии и геотехнологий
ФГАОУ ВО СФУ, г. Красноярск

² R&D центр НИИ Института горного дела,
геологии и геотехнологий ФГАОУ ВО СФУ, г. Красноярск

³ ООО «Тывамедь», г. Кызыл

Authors

Shvedov Gennadiy Ivanovich

Associate professor¹, engineer², g.shvedov@mail.ru

Samorodsky Pavel Nikolaevich

PhD, Associate professor of deposit geology
and exploration methods department¹
psamorodskiy@sfu-kras.ru

Makarov Vladimir Aleksandrovich

PhD, Head of deposit geology
and exploration methods department, Director¹
vmakarov58s@mail.ru

Muromtsev Egor Aleksandrovich

postgraduate¹, EgorMuromtsevSib@gmail.com

Shadchin Maksim Victorovich

postgraduate¹, shamamr@gmail.com

Lobastov Boris Mikhailovich

engineer², assistant of Geology, mineralogy
and petrography department¹, lbm02@ya.ru

Glushkov Yuri Vladimirovich

Chief geologist³, glushkovyv@mmcintergeo.ru

¹ Institute of Mining, Geology and Geotechnologies,
Krasnoyarsk, Russia

² R&D Center of Mining, Geology
and Geotechnologies Institute, Krasnoyarsk, Russia

³ LLC Tyvamed, Kyzyl, Russia



Гидротермальная минерализация в осадочных породах кембрия как индикатор рудовмещающей структуры кимберлитов Сюльдюкарского поля Якутии

Hydrothermal mineralization hosted by Cambrian sedimentary rocks as evidence of kimberlite-hosting structure, Syuldyukarskoye field, Yakutia

Игнатов П. А., Зарипов Н. Р.,
Толстов А. В., Колесник А. Ю., Мальцев М. В.

Ignatov P. A., Zaripov N. R.,
Tolstov A. V., Kolesnik A. Yu., Maltsev M. V.

На участке кимберлитов в Сюльдюкарском поле Якутии во вмещающих их терригенно-карбонатных породах кембрия приведены результаты картирования признаков сдвигов, прожилкового осветления красноватых пород, метазернистого пирита, пирит-кальцитовых и кальцитовых прожилков. Показана локализация кимберлитов в рудовмещающем сдвиге и узле его пересечения с поперечным разломом. С ним совмещаются ореолы прожилкового осветления, пирит-кальцитовых и кальцитовых прожилков, обладающих красной фотолюминесценцией (ФЛ) и фосфоресценцией. Красная, голубая и частично белая ФЛ обусловлена концентрацией в кальцитах $Mn > 0,1\%$. По вариациям изотопного состава углерода и кислорода кальциты образовались при участии среднетемпературных формационных и метеорных вод, углерода осадочных карбонатных пород и углеводородов глубинного происхождения. В гидротермальных кальцитах установлены аномальные концентрации Ba, Cr, Ni и La. Полученные данные позволяют прогнозировать новые алмазоносные тела в юго-восточной части ореолов эндогенной минерализации.

Ключевые слова: кимберлиты, сдвиги, прожилки, изотопы углерода и кислорода, люминесценция.

The paper describes diamondiferous kimberlite area within a new Yakutian Syuldyukarskoye field and presents detailed mapping results of ore-hosting shear evidence, veinlet bleaching of redbeds, outcrops of metagrained pyrite, pyrite-calcite and calcite veinlets hosted by Cambrian terrigenous-carbonate rocks where kimberlites occur. Kimberlite localization is shown at fault junction as well as kimberlite long axis combination with west-northwest ore-hosting shear. These tectonic structures combine with veinlet bleaching halos, those of pyrite-calcite and calcite veinlets, and calcite druses characterized by red photoluminescence and phosphorescence. Red, blue and partially white photoluminescence is caused by manganese concentration in calcites ($> 0,1\%$). Hydrothermal calcite nature is supported by C and O isotope composition variations, which reflect the input of medium temperature formational and meteoric waters, carbon of sedimentary carbonate rocks and deep hydrocarbons. Anomalous Ba, Cr, Ni and La content is recognized in hydrothermal calcites from near-kimberlite environment. Kimberlite position in the southeastern part of endogenous mineralization halos and greater diamond potential of the western kimberlite body, which is larger compared to the eastern one, allow forecasting of new productive bodies.

Keywords: kimberlites, shifts, veins, carbon and oxygen isotopes, luminescence.

Для цитирования: Игнатов П. А., Зарипов Н. Р., Толстов А. В., Колесник А. Ю., Мальцев М. В. Гидротермальная минерализация в осадочных породах кембрия как индикатор рудовмещающей структуры кимберлитов Сюльдюкарского поля Якутии. Руды и металлы. 2021. № 1. С. 93–105. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10006.

For citation: Ignatov P. A., Zaripov N. R., Tolstov A. V., Kolesnik A. Yu., Maltsev M. V. Hydrothermal mineralization hosted by Cambrian sedimentary rocks as evidence of kimberlite-hosting structure, Syuldyukarskoye field, Yakutia. Ores and metals, 2021, № 1, pp. 93–105. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10006.

Введение. Алмазоносные кимберлиты в новом Сюддюкарском поле Якутии открыты в 2015 г. геологами АК АЛРОСА (ПАО) в прогнозируемом Ыгыаттинском поле [11, 14–16]. Два сближенных кимберлита расположены в бассейне р. Сюддюкар и прорывают терригенно-карбонатные породы холомолохской свиты верхнего кембрия, залегающие под толщей верхнепалеозойских и мезозойских отложений (рис. 1). На глубине эти тела, вероятно, соединяются, слагая единый канал поступления глубинной магмы. Западное тело заметно крупнее восточного и содержит больше алмазов. Центральная часть Сюддюкарского кимберлитового поля

представляет собой так называемое трапповое окно, на котором отсутствуют перекрывающие карбонатный цоколь туфы, базальты и силлы пермо-триасовой эффузивно-осадочной формации. На большей же части поля траппы занимают верхнюю часть толщи, перекрывающей вмещающие кимберлиты карбонатные отложения нижнего палеозоя, что существенно затрудняет выявление новых кимберлитовых тел [15, 17].

В данном районе ореолы минералов-индикаторов кимберлитов в базальных горизонтах терригенных угленосных отложений каменноугольно-пермского возраста мало информатив-

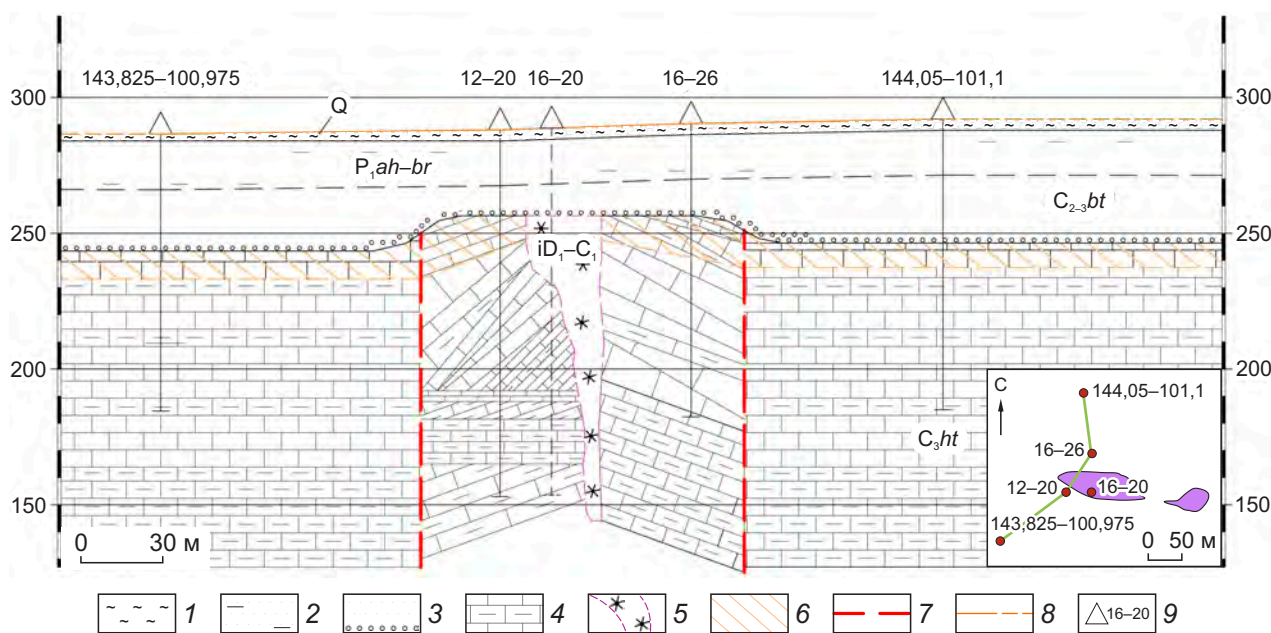


Рис. 1. Геологический разрез на участке Сюддюкарских кимберлитов:

1 – четвертичные отложения; терригенные угленосные отложения: 2 – нижнепермские ахтарандинской и боруллойской свит, 3 – каменноугольные ботуобинской свиты; 4 – верхнекембрийские терригенно-карбонатные отложения холомолохской свиты; 5 – кимберлиты; 6 – древняя кора выветривания; 7 – разломы; 8 – рельеф; 9 – устья скважин и их номера. Нарушенное залегание и углы падения пород кембрия установлены по документации ядра. На врезке показано положение линии разреза

Fig. 1. Geological section at Syuddyukarsky kimberlite area:

1 – Quaternary deposits; terrigenous carbonaceous deposits: 2 – Lower Permian (Akhtarandinskaya and Borulloiskaya suites), 3 – Carboniferous (Botuobinskaya suite); 4 – Upper Cambrian terrigenous-carbonate deposits of Kholomolokhskaaya suite; 5 – kimberlites; 6 – old crust of weathering; 7 – faults; 8 – topography; 9 – wellheads and their numbers. Inconsistent occurrence and Cambrian rock dip angles were defined from core documentation. The inset shows section line position



ны [16]. В Сьюльдюкарском поле распространены многочисленные тектонические нарушения и проявления основного магматизма среднепалеозойского и мезозойского возрастов, формировавшиеся до, во время и после внедрения кимберлитов. Такие сложные геологические условия объясняют тот факт, что вот уже почти пять лет при очевидной перспективности территории поиски новых алмазоносных тел с применением бурения не увенчались успехом.

Существенные ограничения классических геофизических и шлихоминералогических методов поисков коренных алмазных месторождений в условиях закрытых поисковых площадей и относительно мощного перекрытия вмещающих кимберлиты осадочных пород нижнего палеозоя обусловили использование нетрадиционных методов поисков скрытых рудовмещающих структур [5, 7, 9]. Они опробованы и в Сьюльдюкарском кимберлитовом поле [6].

В последнее время авторы получили новые данные по ореолам прожилкового осветления красноцветных пород, метазернистого пирита, пирит-кальцитовых и кальцитовых прожилков, распространённых в породах холомолохской свиты верхнего кембрия на детально изученном участке Сьюльдюкарского поля, в результате чего появилась возможность картировать тектонические признаки и вторичную минерализацию по равномерной, плотной (от 20×20 до 100×250 м) сети наблюдений. Установленные ореолы маркируют структуру, вмещающую кимберлиты. Описание этих ореолов приведено в настоящей статье.

Фактический материал и методы исследований. На анализируемом участке площадью $1,5 \times 1,5$ км по единой специальной методике [5] изучены разрезы холомолохской свиты мощностью от первых десятков до 200 м по 70 поисковым скважинам, пройденным по сети 20×20 м вблизи кимберлитов и от 100 до 250 м на удалении от них. По керну каждой скважины фиксировались признаки разломов и выделения вторичного пирита в виде прожилков и метазернистых вкраплений, пирит-кальцитовые прожилки, прожилки и друзы кальцита. Последние распространены почти повсеместно.

По коллекции кальцитов из 29 проб в лаборатории МГРИ выполнен качественный фотолюминесцентный анализ в затемнённом помещении при помощи прибора ОИ-18 с лампой СВД-120 и фильтром УФС-2. Аналитиками Г. А. Акуловым, Д. Н. Колгановым, И. А. Мишиным, М. В. Стрельниковым визуально фиксировался цвет флюоресценции и фосфоресценции и время последней. По 15 пробам выполнены анализы методом ИСП-АЭС в лаборатории НИГП АК АЛРОСА (ПАО) по методике БГРЭ-МП5мод (III категория точности) на приборе iCAP 6300Duo (Thermo Scientific (США)). В 26 образцах кальцита определён изотопный состав углерода и кислорода в лаборатории ГИН РАН. Анализы выполнены под руководством доктора геол.-минерал. наук Б. Г. Покровского на комплексе корпорации Thermoelectron, включающем масс-спектрометр Delta V Advanced и установку Gas-Bench-II. Подготовку проб осуществляли по большей части высверливая технической бормашиной кальцит в объёмах одной-трёх спичечных головок.

По результатам документации и анализам составлена база данных и проект в геоинформационной системе с использованием комплекса QGIS. Поскольку границы кимберлитов, плоскости тектонических микросмещений и прожилки, как правило, имеют крутое падение, то при картографировании эти признаки прямо проецировались к устью скважин.

Результаты исследований. Детальное картирование признаков сдвигов (микровзбросы, зеркала скольжения с горизонтальными бороздами) показало ореол, распространённый вдоль разлома, проходящего по осям двух сближенных тел кимберлитов (рис. 2).

Этот ореол отражает узел пересечения сдвигов западно-северо-западного и северо-северо-восточного простираний с большим влиянием субширотного разлома взбросо-сдвигового типа, которые действовали во время формирования кимберлитов. Эта проницаемая зона, вероятно, служила каналом поступления глубинной магмы, обогащённой CO_2 и другими газами, и обусловила камуфлетные взрывы.

В Сьюльдюкарском поле в глинисто-мергельных красноцветных породах кембрия ши-

роко распространено прожилковое осветление. Такое же осветление изучено в Накынском кимберлитовом поле, расположенном вместе с Сьюльдюкарским и Мирнинским полями в единой Вилюйско-Мархинской зоне глубинного разлома. Установлено, что вторичное осветление обусловлено поступлением восстановительных по железу газов (углеводородов и, вероятно, водорода) и сопровождается выносом железа [4]. Его распространение отражает формирование газогеохимических ореолов по тектоническим нарушениям. Ореол прожилкового осветления вокруг кимберлитов рассматриваемого поля в поперечнике составляет от первых сотен до 730 м (рис. 3).

Форма ореола в плане изометрическая. Относительно кимберлитов прожилковое освет-

ление более распространено на север. Внутри ореола увеличивается число прожилков с разной ориентацией плоскостей. Это, с одной стороны, отражает центральную часть узла пересечения разломов, где локализованы кимберлиты. С другой стороны, может указывать на разное время проявления тектонических деформаций.

В карбонатных породах кембрия встречаются новообразования пирита в виде сферических и линзовидных агрегатов размерами меньше миллиметра до первых сантиметров. Пирит замещает кальцит и доломит и корродирует примесные алевритовые и песчаные зёрна кварца. Имеют место пиритовые и пирит-кальцитовые прожилки, указывающие на гидротермальное происхождение пирита. На

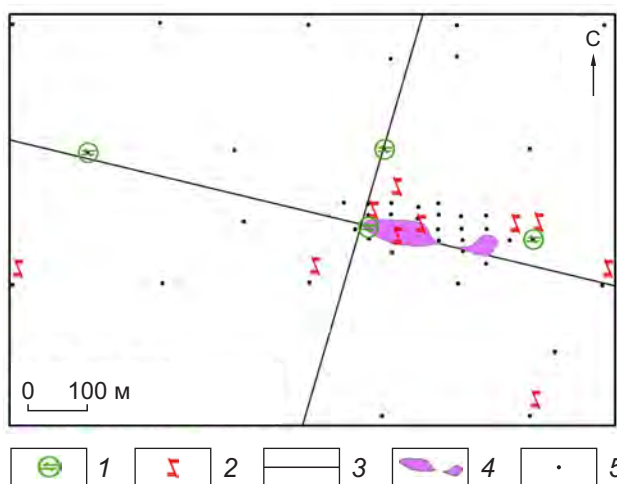


Рис. 2. Распространение признаков сдвигов, маркирующих рудовмещающие разломы на участке Сьюльдюкарских кимберлитов:

1 – зеркала скольжения с горизонтальными бороздами; 2 – микровзбросы; 3 – оси сдвигов; 4 – кимберлит; 5 – скважины

Fig. 2. Distribution of shears marking ore-hosting faults at Syuldyukarsky kimberlite area:

1 – slickensides with horizontal notches; 2 – microup-thrusts; 3 – shear axes; 4 – kimberlite; 5 – drillholes

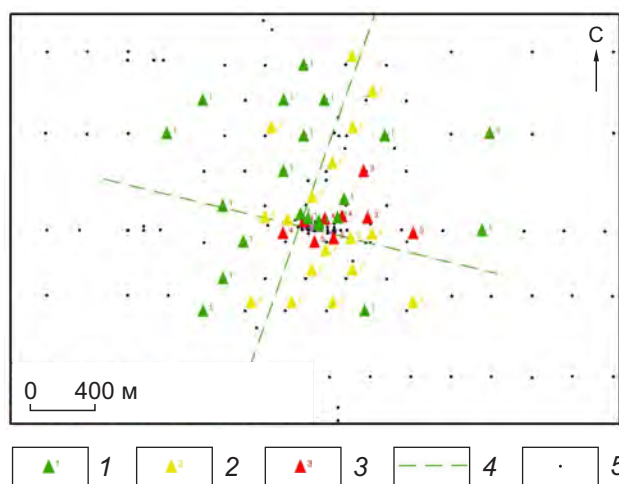


Рис. 3. Распределение скважин, вскрывших прожилки осветления с разной ориентацией в пределах участка Сьюльдюкарских кимберлитов:

прожилки осветления с различно ориентированными плоскостями: 1 – с одной, 2 – двумя, 3 – тремя и более; 4 – кимберлитоконтролирующие сдвиги; 5 – устья скважин

Fig. 3. Distribution of wells that encountered variously oriented bleaching veinlets within Syuldyukarsky kimberlite area:

bleaching veinlets with variously oriented planes: 1 – one, 2 – two, 3 – three or more; 4 – kimberlite-controlling shears; 5 – wellheads

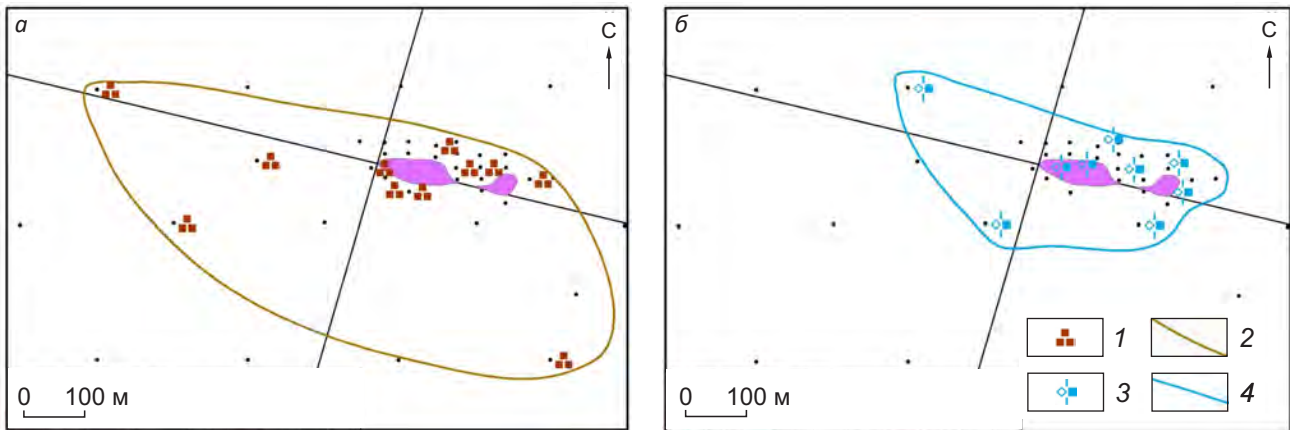


Рис. 4. Ореолы: относительно крупных выделений вторичного пирита в породах кембрия (а), пирит-кальцитовых прожилков на участке Сьюльдюкарских кимберлитов (б):

1 – выделения агрегатов пирита размерами более 2 см; 2 – контур ореола пиритизации; 3 – пирит-кальцитовые прожилки; 4 – контур ореола пирит-кальцитовых прожилков; остальные усл. обозн. см. рис. 2

Fig. 4. Halo relative to extensive secondary pyrite outcrops in Cambrian rocks (a), pyrite-calcite veinlets halo (b) at Syuldyukarsky kimberlite area:

1 – pyrite aggregates (> 2 cm); 2 – contour of pyritization halo; 3 – pyrite-calcite veinlets; 4 – contour of pyrite-calcite veinlet halo; for the rest of the symbols see the fig. 2

участке кимберлитов выявлен ореол относительно крупных (более двух сантиметров) агрегатов пирита (рис. 4, а).

Он имеет линзовидную форму и в большей мере отражает западно-северо-западный сдвиг, совпадающий с длинными осями кимберлитов. Кимберлиты расположены в северо-восточном фланге ореола интенсивной пиритизации, который расширяется на юго-восток. В этой связи надо отметить, что и площадь западного тела кимберлитов заметно больше, чем восточного. Представляется, что интенсивные новообразования пирита маркируют потоки горячего сероводорода, проникавшие по крутопадающим зонам трещин. Сероводород осаждался в местах повышенного содержания Fe в поровых формационных водах терригенно-карбонатных пород кембрия. Часть Fe высвобождалась в процессе осветления красноватых пород кембрия, залегающих стратиграфически ниже известняков и доломитов.

Интересно распространение на участке пирит-кальцитовых прожилков (рис. 4, б).

Они чаще встречаются в экзоконтактах кимберлитов и имеют тренд распространения в западно-северо-западном направлении. Так же, как и метазернистый пирит, пирит-кальцитовые прожилки в большей мере отражают субширотный рудовмещающий сдвиг. Прожилки и друзы кальцитов, обладающие красной фотолюминесценцией, слагают изометрический ореол, в целом совпадающий с вышеотмеченными новообразованиями (рис. 5). Характерно, что кимберлиты, как и в ореолах пиритизации, расположены в восточном фланге ореола гидротермальных кальцитов с красной фотолюминесценцией. Сам ореол охватывают один-три поперечных размера кимберлитов. Этот ореол весьма неоднороден и включает прожилки и друзы кальцита, в том числе кальцита из цемента гидротермальных брекчий, которые имеют другие цвета флуоресценции (ФЛ) и фосфоресценции или вовсе не люминесцируют. Это можно продемонстрировать на примере кальцитов из ближайшего к кимберлитам пространства и удалении от них от 100 до 200 м (табл. 1).

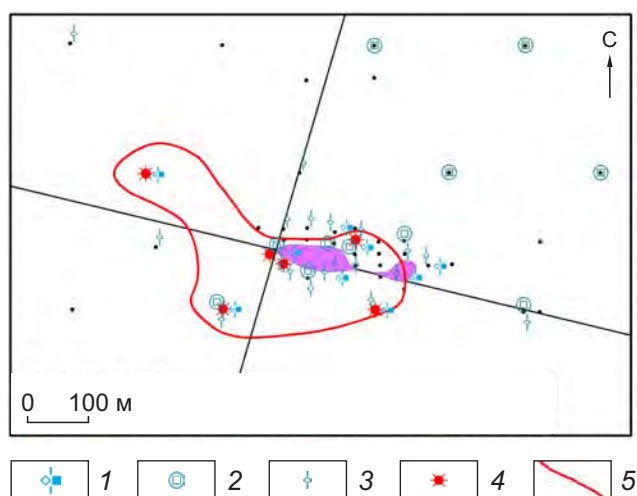


Рис. 5. Распространение кальцитов с красной фотолюминесценцией на участке Сьюльдюкарских кимберлитов:

1 – пирит-кальцитовые прожилки; 2 – друзы кальцита; 3 – прожилки кальцита; 4 – красная фотолюминесценция кальцитов; 5 – контур ореола кальцитов с красной фотолюминесценцией; остальные усл. обозн. см. рис. 2

Fig. 5. Red photoluminescence calcite distribution at Syuldyukarsky kimberlite area:

1 – pyrite-calcite veinlets; 2 – calcite druses; 3 – calcite veinlets; 4 – red calcite photoluminescence; 5 – boundaries of red photoluminescence calcite halo; for the rest of the symbols see the fig. 2

Заметны тенденции в распределении фотолюминесценции кальцитов вблизи кимберлитов, в отличие от удалённых от них проб: вблизи кимберлитов больше флюоресцирующих и фосфоресцирующих кальцитов, причём красная ФЛ преобладает над оранжевой, минимум нелюминесцирующих разностей, есть голубая ФЛ. Напомним, что совмещение в пространстве кальцитов с красной и голубой ФЛ установлено и для участков с алмазонасными кимберлитами Накынского поля [1, 9, 21].

Эта неоднородность выражается не только в разных скважинах, но и в одной скважине из кальцитов, отобранных с разных глубин, и даже кальцитов разных генераций из одного об-

разца. Такое разнообразие отражается и в разном изотопном составе кальцитов с различной люминесценцией (табл. 2).

Не углубляясь в анализ изотопного состава вторичных кальцитов, исходя из контекста данной статьи, надо отметить следующее. По изотопии углерода рассматриваемые кальциты формировались при участии:

- углерода осадочных известняков и доломитов нижнего палеозоя с вариациями $\delta^{13}\text{C}$ от 1,6 до -3,5 ‰;
- глубинного углерода, с $\delta^{13}\text{C}$ от -5,6 до -10,7 ‰, соответствующими углероду карбонатов и большинству алмазов;
- углерода, образованного при окислении метана с пределами от -11,1 до -37,1 ‰ [2, 13, 19, 20, 22].

Следует отметить, что для кальцитов из непосредственной близости от кимберлитов характерна наибольшая вариация изотопного состава углерода, что ранее было установлено для экзоконтактов кимберлитов Сьюльдюкарского поля сотрудниками ИЗК РАН А. С. Гладковым, Л. А. Кошкаревым и др.

По кислороду можно выделить два уровня значений, соответствующих участию низкотемпературных формационных вод осадочной толщи нижнего палеозоя с $\delta^{18}\text{O}$ от 15,5 до 22,5 ‰ и постмагматических средне- и высокотемпературных гидротерм с участием формационных вод в пределах от 11,1 до 15,4 ‰ [3, 13, 18–20, 22].

По соотношению ФЛ и изотопии кислорода и углерода кальцитов не видно каких-то закономерностей (рис. 6). Относительно углерода намечается связь оранжевой ФЛ с резко облегчённым (метановым) углеродом.

Элементный состав кальцитов, в которых диагностирована люминесценция, определён методом ИСП-АЭС в лаборатории НИГП АК АЛРОСА (ПАО). Намечается положительная связь красной фотолюминесценции и содержания MnO, превышающего 0,1 % (табл. 3). Подобные зависимости установлены и для прожилковых кальцитов Накынского поля [8, 10].

В табл. 3 приведены данные по содержаниям Cr, Ni, Ba и La, которые показывают присутствие высоких концентраций в некоторых пробах гидротермальных кальцитов. Концен-



1. Цвет фотолюминесценции (ФЛ) и фосфоресценции (ФФ) вторичных кальцитов из пород хололохской свиты кембрия на участке кимберлитов Сюльдюкарского поля

1. Photoluminescence and phosphorescence color of secondary calcites from Cambrian Kholomolokhskaaya suite rocks at kimberlite area, Syuldyukarskoye field

Линия-скважина-глубина, м	Форма выделений кальцита	Цвет ФЛ	Цвет ФФ, время послесвечения
<i>Кальциты из скважин, расположенных вблизи кимберлитов (по сети бурения 20 × 20 м)</i>			
10-22-75	Прожилок	Красный	Нет
10-22-100,5	Цемент карбонатной брекчии	Нет	Нет
12-20-59	Прожилок	Красный	Красный, 0,5 с
16-18-83-а	Жила крупнокристаллического кальцита	Красный, бледно-белый	Красный, меньше 0,5 с, белый
16-18-83-б	Жила крупнокристаллического кальцита	Нет	Нет
16-18-103-а	Друза	Красный, вкрапленники оранжевые	Красный, 1 с
16-18-103-б	Прожилок	Красный	Красный, 0,5 с
16-26-83-а	Прожилок	Местами оранжевый с синими прожилками	Нет
16-26-83-б	Прожилок	Красный	Красный, 0,5 с
16-26-83-в	Прожилок	Оранжевый и красный	Красный и оранжевый, 0,5 с
16-28-109,1-а	Прожилок	Бледно-белые прожилки с голубыми участками	Нет
16-28-109,1-б	Прожилок	Белый	Нет
24-24-89,5	Прожилок	Красный	Красный, 0,5 с
24-24-87	Прожилок	Красный	Красный, 0,5 с
32-24-105,5	Цемент карбонатной брекчии	Белый	Белый, 1 с
40-20-97-а	Друза и прожилок	Синий (вкрапления), красный	Белые прожилки
40-20-97-б	Прожилок кальцита в плоскости микросброса	Красный	Красный, 0,5 с
<i>Кальциты из скважин, расположенных на удалении от кимберлитов от 100 до 800 м</i>			
143,6-101,1-77	Прожилок	Оранжевый, белый, голубой	Нет
143,825-100,475-84	Прожилок	Красный	Красный, 1 с
143,825-100,475-104	Кальцит в микросбросо-взбросе	Редкие оранжевые точки	Нет
143,825-100,975-69	Прожилок	Красный	Красный, 0,5 с
144,05-100,6-57	Прожилок	Оранжево-красный	Красный, 0,5 с
144,05-100,85-96	Прожилок	Красно-оранжевый	Нет
144,265-100,475-86	Прожилок	Красный	Нет
144,265-100,725-94	Прожилок	Белый с оранжевыми точками	Нет
144,265-100,725-60	Прожилок	Белый с оранжевыми точками	Красный, 0,5 с
144,48-100,85-106	Прожилок	Красный	Нет
144,48-101,1-108,7	Прожилок	Нет	Нет
144,48-101,6-111,5	Жила крупнозернистого кальцита	Белый	Нет

2. Изотопный состав С и О вторичных кальцитов из пород хололохской свиты кембрия около кимберлитов Сюльдюкарского поля

2. C and O isotope composition of secondary calcites from Cambrian Kholomolokhsкая suite rocks near Syuldyukarskoye field kimberlites

Линия-скважина-глубина, м	$\delta^{13}\text{C}$, ‰ V-PDB	$\delta^{18}\text{O}$, ‰ V-SMOW	Фотолюминесценция
<i>Кальциты из скважин, расположенных вблизи кимберлитов (по сети бурения 20 × 20 м)</i>			
10-22-75	-2,5	12,7	Красная
10-22-100,5	1,6	16,5	Нет
12-20-59	-3	17,1	Красная
16-18-83а	-2,6	14,2	Красная
16-18-83б	-2,3	14,6	Нет
16-18-103а	0,8	13,0	Красная
16-18-103б	1,0	13,1	Красная
16-26-83а	-37,1	11,1	Оранжевая, синяя
16-26-83б	-24,5	11,9	Оранжевая с синими точками
16-26-83в	-33,9	11,5	Оранжевая, красная
16-28-109,1а	2,1	15,4	Белая, голубая
16-28-109,1б	-8,0	12,8	Белая
24-24-89,5	-3,5	12,7	Белая
24-24-87	-1,6	13,3	Красная
32-24-107,4	-2,2	17,4	Белая
<i>Кальциты из скважин, расположенных на удалении от кимберлитов от 100 до 800 м</i>			
143,6-101,1-77	-30,7	11,6	Оранжевая, белая, голубая
143,825-100,475-84	-7,7	14,2	Красная
143,825-100,475-104	-1,4	17,5	Редкие оранжевые точки
143,825-100,975-69	-5,6	16,1	Красная
144,05-100,6-57	-10,7	15,7	Оранжево-красная
144,265-100,475-86	-1,0	22,5	Красная
144,265-100,725-94	-11,1	14,0	Белая с оранжевыми точками
144,265-100,725-60	-8,0	14,6	Белая с оранжевыми точками
144,48-100,85-106	-0,8	16,5	Красная
144,48-101,1-108,7	-1,4	15,5	Нет
144,48-101,6-111,5	-0,8	16,6	Белая

трации Sr и Ni считаются геохимическими признаками кимберлитов [12]. Повышенные содержания Ba и TR во вторичных кальцитах и экзоконтактах кимберлитов Сюльдюкарского поля выявлены А. С. Гладковым и другими сотрудниками ИЗК РАН.

Выводы. Представленные данные позволяют сделать следующие выводы.

Во-первых, структура, вмещающая кимберлиты Сюльдюкарского поля в терригенно-кар-

бонатных породах кембрия, представлена узлом пересечения сдвигов, выраженным в ансамбле микровзбросов и зеркал скольжения с горизонтальными бороздами. Она занимает площадь, примерно в два раза превышающую кимберлиты. Осевая часть западно-северо-западного магистрального сдвига, которому подчиняются длинные оси кимберлитовых тел, установлена по сети поискового бурения 100 × 250 м и доказана по сети бурения 20 × 20 м.



3. Содержания Mn (%), Cr, Ni, Ba и La (г/т) в гидротермальных кальцитах с разной фотолюминесценцией (ФЛ) из пород хололохской свиты кембрия Сюдьюкарского поля

3. Mn (%), Cr, Ni, Ba and La (g/t) content in hydrothermal calcites of various photoluminescence from Cambrian Kholomolokhskaaya suite rocks, Syuldyukarskoye field

Линия-скважина-глубина, м	Форма кальцита	ФЛ	MnO	Cr	Ni	Ba	La
10-22-100,5	Прожилок	Нет	0,090	184,24	21,463	35,78	12,215
10-22-75	Цемент карбонатной брекчии	Красная	0,039	10,664	74,831	212,5	5,6313
12-20-59	Прожилок	Красная	0,214	20,413	24,276	76,21	16,872
24-24-89,5	Прожилок	Красная	0,234	15,972	26,366	37,11	22,44
143,4-101,475-96,5	Крупнозернистая жила	Голубая, белая	0,0195	5,4848	2,231	18,96	9,0039
143,6-101,1-77	Прожилок	Голубая, белая	0,0543	22,767	21,96	144,2	16,136
143,825-100,475-84	Прожилок	Голубая, белая	0,1230	13,06	4,5921	42,17	31,683
143,825-100,475-104	Кальцит в микросбросо-взбросе	Нет	0,1392	16,355	11,953	4356	21,153
143,825-100,975-69	Прожилок	Красная	0,1975	18,984	44,764	70,88	16,859
144,05-100,6-57	Прожилок	Оранжевая	0,2192	23,322	17,492	678,38	19,973
144,05-100,85-96	Прожилок	Голубая, белая	0,1954	0,75498	1,2884	11,22	26,793
144,265-100,475-86	Прожилок	Голубая, белая	0,1041	28,049	16,625	62,15	17,128
144,265-100,725-94	Прожилок	Белая и оранжевые точки	0,1114	12,742	6,5459	2890	17,683
144,265-100,725-60	Прожилок	Оранжевая	0,1006	7,3608	2,9419	33,87	14,871
144,48-100,85-100	Прожилок	Нет	0,0500	77,767	38,759	459,52	15,098
144,48-101,1-108,7	Прожилок	Нет	0,2199	22,359	16,787	690,26	19,751
144,48-101,6-111,5	Крупнозернистая жила	Нет	0,0326	9,3666	12,471	521,64	11,021
144,7-101,725-109	Прожилок	Белая	0,0809	23,884	5,952	3782	24,089
144,7-101,725-108,6	Прожилок	Белая	0,0758	39,012	17,827	164,5	17,245

Во-вторых, рудовмещающая структура имеет выражение в сопоставимых по площади ореолах:

- прожилкового осветления красноцветных пород кембрия;
- выделений метазернистого пирита размерами более 2 см;
- пирит-кальцитовых прожилков;
- прожилков и друз кальцита с красной фотолюминесценцией и флюоресценцией.

Образование пирита, по-видимому, происходило за счёт реакций глубинного сероводорода с растворами железа пластово-поровых и пластово-трещинных формационных вод в толще кембрия. Ореол кальцитов с красной ФЛ имеет внутреннее неоднородное строение и включает разности с белой, голубой и оран-

жевой люминесценцией и нелюминесцирующие кальциты. Их эндогенное происхождение подтверждается составом изотопов углерода и кислорода, отражающих средние и высокие температуры минералообразования, участие формационных вод и углекислого газа глубинного, органического и породного генезиса. Кальциты из этого ореола обладают весьма высокой изменчивостью изотопных составов углерода и кислорода. Среди них зачастую устанавливаются аномально высокие концентрации Cr, Ni, Ba, La и других элементов, что характерно для кимберлитов и карбонатитов Якутской алмазональной провинции. Таким образом, ореолы вторичной минерализации в непосредственной близости от кимберлитов Сюдьюкарского поля следует рассматривать как показате-

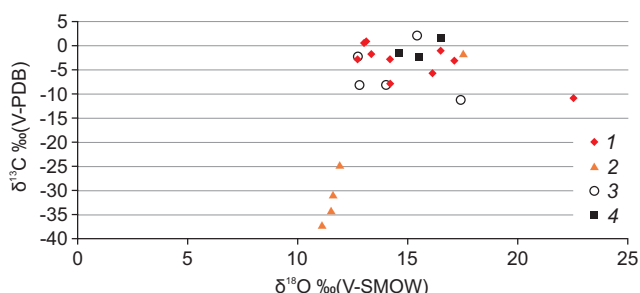


Рис. 6. Соотношение $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ гидротермальных кальцитов из холомолохской свиты с разной фотолюминесценцией на участке кимберлитов Сьюльдюкарского поля:

люминесценция: 1 – красная; 2 – оранжевая; 3 – белая; 4 – отсутствует

Fig. 6. Ratio of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in hydrothermal calcites from Kholomolokhskaya suite of various photoluminescence at Syuldyukarskoye field kimberlite area:

luminescence: 1 – red; 2 – orange; 3 – white; 4 – none

ли очага разгрузки флюидно-магматических и газо-гидротермальных систем.

В-третьих, кимберлиты располагаются на востоке установленных ореолов. Отмеченная асимметрия открывает перспективы обнаружения новых алмазоносных кимберлитовых тел в западно-северо-западном направлении от известных тел.

Список литературы

1. Василенко В. Б., Толстов А. В., Кузнецова Л. Г., Минин В. А. Петрохимические критерии оценки алмазоносности кимберлитовых месторождений Якутии // *Геохимия*. – 2010. – № 4. – С. 366–376.
2. Галимов Э. М. Вариации изотопного состава алмазов и связь их с условиями алмазообразования // *Геохимия*. – 1984. – Т. 8. – С. 109–118.
3. Дзюба А. А. Разгрузка рассолов Сибирской платформ. – Новосибирск : Наука, 1984. – 149 с.
4. Зарипов Н. Р., Игнатов П. А., Васюта Ю. В., Ковальчук О. Е., Лисковская Л. В., Килижеков О. К. Природа процессов осветления красноцветных

пород, вмещающих кимберлиты Накынского алмазоносного поля Якутии // *Руды и металлы*. – 2017. – № 1. – С. 67–74.

5. Игнатов П. А., Новиков К. В. Полевая диагностика тектонических нарушений и флюидоразрывных образований в кимберлитовмещающих отложениях нижнего палеозоя : методическое руководство. – Мирный : АПРОСА, 2019. – 76 с.
6. Игнатов П. А., Колесник А. Ю., Толстов А. В., Мальцев М. В. Геологические признаки рудовмещающих структур Сьюльдюкарского кимберлитового поля Якутии // *Горный журнал*. – 2019. – № 10. – С. 67–71.
7. Игнатов П. А., Кряжев С. Г., Толстов А. В., Мальцев М. В. Признаки скрытых структур в осадочных толщах, вмещающих месторождения алмазов Накынского поля Якутии // *Горный журнал*. – 2018. – № 11. – С. 18–23.
8. Игнатов П. А., Штейн Я. И., Чёрный С. Д., Яныгин Ю. Т. Новые приёмы оценки локальных площадей на коренные месторождения алмазов // *Руды и металлы*. – 2001. – № 5. – С. 32–43.
9. Игнатов П. А., Новиков К. В., Зарипов Н. Р., Ходня М. С., Шмонов А. М., Разумов А. Н., Килижеков О. К., Ковальчук О. Е., Кряжев С. Г. Комплекс нетрадиционных поисковых признаков коренных месторождений алмазов, используемый на закрытых территориях // *Смирновский сборник-2017. Проблемы минерагении, экономической геологии и минеральных ресурсов*. – М. : МАКС Пресс, 2017. – С. 207–228.
10. Игнатов П. А., Новиков К. В., Шмонов А. М., Зарипов Н. Р., Ходня М. С., Разумов А. Н., Килижеков О. К., Кряжев С. Г., Ковальчук О. Е. Зональность тектонических нарушений и вторичной минерализации в околокимберлитовом пространстве Майского месторождения алмазов Накынского поля Якутии // *Геология рудных месторождений*. – 2018. – Т. 60. – № 3. – С. 1–8.
11. Калмыков Б. А., Пелецкий М. Н. Палеогеографические особенности формирования Хатырыкского ореола кимберлитовых минералов : материалы научно-практической конференции к 30-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК АПРОСА «Геология, закономерности размещения, методы прогнозирования и поисков месторождений алмазов». – Мирный, 1998. – С. 218–221.
12. Кириллина А. В., Васильева В. И., Симоненко В. И. Геохимические методы поисков кимберлитов на закрытых территориях западной Якутии // *Роль*



- геохимии в развитии МСБ ТПИ. «Прогноз, поиски, оценка и инновационные технологии освоения редкометалльных объектов». – М. : ИМГРЭ, 2016. – С. 44–47.
13. Кулешов В. Н. Изотопный состав и происхождение глубинных карбонатов // Труды ГИН АН СССР. – 1986. – 129 с.
 14. Мальцев М. В. Критерии локализации и вещественно-индикационные признаки Сюльдюкарского кимберлитового тела как основа прогнозирования месторождений алмазов в Ыгыаттинском районе (Западная Якутия) : специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения» : автореферат на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук / Мальцев Михаил Викторович. – Мирный, 2019. – 167 с.
 15. Мальцев М. В., Толстов А. В. Новые перспективы коренной алмазности Вилюй-Мархинского междуречья : материалы Всероссийской научно-практической конференции ВППК-2017. – Якутск, 2017. – С. 339–344.
 16. Мальцев М. В., Толстов А. В., Фомин В. М., Старкова Т. С. Новое кимберлитовое поле в Якутии и типоморфные особенности его минералогических индикаторов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия Геология. – 2016. – № 3. – С. 86–94.
 17. Симоненко В. И., Толстов А. В., Васильева В. И. Новый подход к геохимическим поискам кимберлитов на закрытых территориях // Разведка и охрана недр. – 2008. – № 4–5. – С. 108–112.
 18. Соболевич Э. В., Бартницкий Е. Н., Цюнь О. В., Кононенко Л. В. Справочник по изотопной геохимии. – М. : Энергоиздат, 1982. – 341 с.
 19. Фор Г. Основы изотопной геологии. – М. : Мир, 1989. – 589 с.
 20. Хефс Й. Геохимия стабильных изотопов. – М. : Мир, 1983. – 198 с.
 21. Шмонов А. М. Геолого-структурные и минералогические признаки, присущие алмазным кимберлитовым телам дайково-жильного типа (на примере Накынского кимберлитового поля Якутии) : специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения» : автореферат на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук / Шмонов Алексей Михайлович. – М. : МГРИ-РГГРУ, 2014. – 121 с.
 22. Claude J. Allegre. Isotope Geology. – New York : Cambridge University Press, 2008. 553 p.

References

1. Vasilenko V. B., Tolstov A. V., Kuznetsova L. G., Minin V. A. Petrokhimicheskie kriterii otsenki almazonosnosti kimberlitovykh mestorozhdenii Yakutii [Petrochemical criteria for assessing diamond content of kimberlite deposits in Yakutia], *Geokhimiya [Geochemistry International]*, 2010, No 4, pp. 366–376. (In Russ.).
2. Galimov E. M. Variatsii izotopnogo sostavaalmazov i svyaz' ikh s usloviyamialmazoobrazovaniya [Variations in the isotopic composition of diamonds and their relationship with the conditions of diamond formation], *Geokhimiya [Geochemistry International]*, 1984, V. 8, pp. 109–118. (In Russ.).
3. Dzyuba A. A. Razgruzka rassolov Sibirskoi platformy [Unloading brines of the Siberian platform], Novosibirsk, Nauka Publ., 1984, 149 p.
4. Zaripov N. R., Ignatov P. A., Vasyuta Yu. V., Koval'chuk O. E., Liskovaya L. V., Kilizhekov O. K. Priroda protsessov osvetleniya krasnotsvetnykh porod, vmeshchayushchikh kimberlity Nakynskogo alamazonosnogo polya Yakutii [The nature of the processes of clarification of red-colored rocks containing kimberlites of the Nakyn diamondiferous field in Yakutia], *Rudy i metally [Ores and Metals]*, 2017, No 1, pp. 67–74. (In Russ.).
5. Ignatov P. A., Novikov K. V. Polevaya diagnostika tektonicheskikh narushenii i flyuidorazryvnykh obrazovaniy v kimberlitovmeshchayushchikh otlozheniyakh nizhnego paleozoya: metodicheskoe rukovodstvo [Field diagnostics of tectonic faults and fluid fractures in kimberlite-hosting deposits of the Lower Paleozoic: a methodological guide], Mirnyi, ALROSA Publ., 2019, 76 p.
6. Ignatov P. A., Kolesnik A. Yu., Tolstov A. V., Mal'tsev M. V. Geologicheskie priznaki rudovmeshchayushchikh struktur Syul'dyukarskogo kimberlitovogo polya Yakutii [Geological features of ore-bearing structures of the Syuldyukar kimberlite field in Yakutia], *Gornyi zhurnal [Mining magazine]*, 2019, No 10, pp. 67–71. (In Russ.).

7. Ignatov P. A., Kryazhev S. G., Tolstov A. V., Mal'tsev M. V. Priznaki skrytykh struktur v osadochnykh tolshchakh, vmeshchayushchikh mestorozhdeniya almazov Nakynskogo polya Yakutii [Signs of hidden structures in sedimentary strata containing diamond deposits of the Nakyn field of Yakutia], *Gornyi zhurnal [Mining magazine]*, 2018, No 11, pp. 18–23. (In Russ.).
8. Ignatov P. A., Shtein Ya. I., Chernyi S. D., Yanygin Yu. T. Novye priemy otsenki lokal'nykh ploshchadei na korennyye mestorozhdeniya almazov [New Methods for Estimating Local Areas for Primary Diamond Deposits], *Rudy i metally [Ores and Metals]*, 2001, No 5, pp. 32–43. (In Russ.).
9. Ignatov P. A., Novikov K. V., Zaripov N. R., Khodnya M. S., Shmonov A. M., Razumov A. N., Kilizhekov O. K., Koval'chuk O. E., Kryazhev S. G. Kompleks netraditsionnykh poiskovykh priznakov korennykh mestorozhdenii almazov, ispol'zuemyi na zakrytykh territoriyakh [A complex of unconventional prospecting signs of primary diamond deposits used in closed areas], *Smirnovskii sbornik-2017. Problemy mineragenii, ekonomicheskoi geologii i mineral'nykh resursov [Smirnov collection-2017. Minerageny, economic geology and mineral resources problems]*, Moscow, MAKS Press Publ., 2017, pp. 207–228.
10. Ignatov P. A., Novikov K. V., Shmonov A. M., Zaripov N. R., Khodnya M. S., Razumov A. N., Kilizhekov O. K., Kryazhev S. G., Koval'chuk O. E. Zonal'nost' tektonicheskikh narushenii i vtorichnoi mineralizatsii v okolo kimberlitovom prostranstve Maiskogo mestorozhdeniya almazov Nakynskogo polya Yakutii [Zoning of tectonic faults and secondary mineralization in the near-kimberlite space of the Maisky diamond deposit of the Nakyn field of Yakutia], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii [Geology of Ore Deposits]*, 2018, V. 60, No 3, pp. 1–8. (In Russ.).
- Kalmykov B. A., Peletskii M. N. Paleogeograficheskie osobennosti formirovaniya Khatyrykского oreola kimberlitovykh mineralov: materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii k 30-letiyu YaNIGP TsNIGRI AK ALROSA "Geologiya, zakonomernosti razmeshcheniya, metody prognozirovaniya i poiskov mestorozhdenii almazov" [Paleogeographic features of the formation of the Khatyryk halo of kimberlite minerals: materials of the scientific-practical conference dedicated to the 30th anniversary of the YaNIGP TsNIGRI AK ALROSA "Geology, distribution patterns, methods of forecasting and prospecting for diamond deposits"], *Mirnyi*, 1998, pp. 218–221.
11. Kirillina A. V., Vasil'eva V. I., Simonenko V. I. Geokhimicheskie metody poiskov kimberlitov na zakrytykh territoriyakh zapadnoi Yakutii [Geochemical methods of prospecting for kimberlites in the closed territories of western Yakutia], *Rol' geokhimii v razviti MSB TPI. "Prognoz, poiski, otsenka i innovatsionnye tekhnologii osvoeniya redkometall'nykh ob'ektov" [The role of geochemistry in the development of MSB TPI. "Forecast, prospecting, assessment and innovative technologies for the development of rare metal objects"]*, Moscow, IMGRE Publ., 2016, pp. 44–47. (In Russ.).
12. Kuleshov V. N. Izotopnyi sostav i proiskhozhdenie glubinnykh karbonatov [Isotopic composition and origin of deep carbonates], *Trudy GIN AN SSSR [Proceedings of the GIN AN SSSR]*, 1986, 129 p.
13. Mal'tsev M. V. Kriterii lokalizatsii i veshchestvenno-indikatsionnye priznaki Syul'dyukarskogo kimberlitovogo tela kak osnova prognozirovaniya mestorozhdenii almazov v Ygyattinskom raione (Zapadnaya Yakutiya) [Localization criteria and material-indicative signs of the Syuldyukar kimberlite body as the basis for forecasting diamond deposits in the Ygyattinsky region (Western Yakutia). Extended abstract of candidate's thesis], *Mirnyi*, 2019, 167 p.
14. Mal'tsev M. V., Tolstov A. V. Novye perspektivy korennoi almazonosnosti Vilyui-Markhinskogo mezhdurech'ya: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii VNPK-2017 [New perspectives of the primary diamond content of the Vilyui-Markhinsky interfluvium: materials of the All-Russian scientific-practical conference VNPK-2017], *Yakutsk*, 2017, pp. 339–344.
15. Mal'tsev M. V., Tolstov A. V., Fomin V. M., Starkova T. S. Novoe kimberlitovoe pole v Yakutii i tipomorfnye osobennosti ego mineralov-indikatorov [New kimberlite field in Yakutia and typomorphic features of its indicator minerals], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Geologiya [Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology]*, 2016, No 3, pp. 86–94. (In Russ.).
16. Simonenko V. I., Tolstov A. V., Vasil'eva V. I. Novyi podkhod k geokhimicheskim poiskam kimberlitov na zakrytykh territoriyakh [A new approach to geochemical prospecting for kimberlites in closed areas], *Razvedka i okhrana nedr [Prospect and protection of mineral resources]*, 2008, No 4–5, pp. 108–112. (In Russ.).
17. Sobotov E. V., Bartnitskii E. N., Ts'on' O. V., Kononenko L. V. Spravochnik po izotopnoi geokhimii [Iso-



- tope Geochemistry Handbook], Moscow, Energoizdat Publ., 1982, 341 p.
18. For G. Osnovy izotopnoi geologii [Fundamentals of isotope geology], Moscow, Mir Publ., 1989, 589 p.
19. Khefs I. Geokhimiya stabil'nykh izotopov [Geochemistry of stable isotopes], Moscow, Mir Publ., 1983, 198 p.
20. Shmonov A. M. Geologo-strukturnye i mineralogogeochemicheskie priznaki, prisushchie almazonosnym kimberlitovym telam daikovo-zhil'nogo tipa (na primere Nakynskogo kimberlitovogo polya Yakutii) [Geological-structural and mineralogical-geochemical features inherent in diamondiferous kimberlite bodies of dyke-vein type (on the example of the Nakyn kimberlite field of Yakutia). Extended abstract of candidate's thesis], Moscow, MGRI-RGGRU Publ., 2014, 121 p.
21. Claude J. Allegre. Isotope Geology, New York, Cambridge University Press Publ., 2008, 553 p.

Авторы

Игнатов Пётр Алексеевич

доктор геолого-минералогических наук, профессор,
заведующий кафедрой геологии месторождений полезных
ископаемых¹, petrignatov@gmail.com

Зарипов Наиль Ринатович

кандидат геолого-минералогических наук
геолог²
nail750@mail.ru

Толстов Александр Васильевич

доктор геолого-минералогических наук
директор³
TolstovAV@alrosa.ru

Колесник Александр Юрьевич

заведующий лабораторией³
KolesnikAYu@alrosa.ru

Мальцев Михаил Владимирович

кандидат геолого-минералогических наук
заместитель главного геолога по поискам,
начальник геологического отдела⁴
MaltsevMV@alrosa.ru

¹ Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ), г. Москва

² ООО «ГеоСолюшинс», г. Москва

³ Научно-исследовательское геологическое предприятие АК АЛРОСА (ПАО), г. Мирный

⁴ Вилуйская геологоразведочная экспедиция АК АЛРОСА (ПАО), г. Мирный

Authors

Ignatov Petr Alekseevich

PhD, Professor
Head of department of geology of mineral deposits¹
petrignatov@gmail.com

Zaripov Nail Rinatovich

PhD
geologist²
nail750@mail.ru

Tolstov Alexander Vasil'evich

PhD
Director³
TolstovAV@alrosa.ru

Kolesnik Alexander Yur'evich

Head of laboratory³
KolesnikAYu@alrosa.ru

Maltsev Mikhail Vladimirovich

PhD
Deputy chief geologist for prospecting,
Head of geological department⁴
MaltsevMV@alrosa.ru

¹ S. Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting Institute, Moscow, Russia

² LLC Geosolutions, Moscow, Russia

³ JSC ALROSA (PJSC), Mirny, Russia

⁴ Vilyui prospecting team of JSC ALROSA (PJSC), Mirny, Russia

Морфогенетические особенности гранатов из россыпи Дьюкунах, Якутская алмазоносная провинция

Morphogenetic features of garnets from Dyukunakh placer (Yakutian diamondiferous province)

Власова Э. А., Хмельков А. М.

Vlasova E. A., Khmelkov A. M.

Изучены морфологические особенности гранатов из верхнепалеозойской россыпи Дьюкунах и проведена расшифровка условий их морфогенеза. С помощью проведённого морфогенетического анализа было установлено, что гранаты прошли сложный эволюционный путь в экзогенных условиях, включая предельный износ в прибрежно-морских условиях и неоднократное переотложение. Кроме этого, гранаты были подвергнуты существенной гипергенной коррозии в коре выветривания и последующему растворению в условиях метасоматоза. В результате такой экзогенной эволюции на гранатах не осталось и следа от их первичных морфологических признаков, связанных с глубинным этапом морфогенеза. Вследствие этого говорить о степени сохранности первичных поверхностей на гранатах не приходится. По этой причине невозможно количественно определить степень удалённости коренных источников.

Ключевые слова: гранаты, россыпь, минералы-индикаторы кимберлитов, алмаз, морфогенез, метасоматоз, пирамидально-черепитчатый тип растворения.

Morphological features of garnets from the Upper Paleozoic Dyukunakh placer were studied and the conditions of their morphogenesis were interpreted. As a result of the morphogenetic analysis, it was found that garnets have evolved in exogenous conditions, including extreme wear in coastal marine conditions and repeated redeposition. In addition, garnets underwent significant hypergene corrosion in the residual soil and subsequent dissolution under metasomatic conditions. As a result of such exogenous evolution, no trace of their primary morphological characters associated with the deep stage of morphogenesis remained on garnets. For this reason, it is impossible to quantify the degree of primary sources removal.

Keywords: garnets, placer, kimberlite tracer minerals, diamond, morphogenesis, metasomatism, pyramidal-tiled type of resorption.

Для цитирования: Власова Э. А., Хмельков А. М. Морфогенетические особенности гранатов из россыпи Дьюкунах, Якутская алмазоносная провинция. Руды и металлы. 2021. № 1. С. 106–112. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10007.

For citation: Vlasova E. A., Khmelkov A. M. Morphogenetic features of garnets from Dyukunakh placer (Yakutian diamondiferous province). Ores and metals, 2021, № 1, pp. 106–112. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10007.



Введение. Минералогические исследования являются важной составной частью при поисках алмазных месторождений, без них невозможно провести качественную оценку перспектив как коренной, так и россыпной алмазности какой-либо территории.

Значительную долю при минералогических исследованиях в процессе алмазопроисковых работ занимает изучение типоморфных особенностей минералов-индикаторов кимберлитов (МИК). К сожалению, большинство работ по алмазной минералогии посвящены изучению минералов, извлечённых непосредственно из материнской породы (кимберлита), а значительно слабее изучены МИК из россыпей [3], хотя геологи-поисковики в первую очередь имеют дело с минералами именно из промежуточных коллекторов, современных или древних.

Особое место в изучении типоморфных особенностей МИК занимает исследование их морфологии, так как именно с этого начинается любое исследование минерального вещества [1]. Морфологические исследования минералов являются начальным этапом в сложном и длительном процессе изучения МИК. Знания морфологии минералов и условий их морфогенеза помогают опытному исследователю не только определить фациальную принадлежность вмещающих их осадков и литодинамические типы обстановок, через которые прошли минералы, но и особенности этих обстановок, интенсивность влияния тех или иных факторов, их продолжительность, последовательность этапов морфогенеза, степень удалённости от коренного источника и многое другое. Таким образом, морфогенетические исследования МИК в процессе алмазопроисковых работ способствуют решению трёх основных задач по отношению к шлиховым ореолам: их идентификации, локализации [2] и типизации (по условиям образования, взаимоотношению с вмещающими осадками и дальности переноса).

Морфогенетическому анализу были подвергнуты гранаты из верхнепалеозойской россыпи Дьюкунах, расположенной в пределах Моркокинского алмазносного района Якут-

ской алмазносной провинции (ЯАП) на правом берегу р. Алымджа-Туората. В геологическом строении россыпи принимают участие терригенные отложения лапчанской свиты среднего отдела каменноугольной системы, ботубинской свиты среднего и верхнего отделов каменноугольной системы, а также боруллойской свиты верхнего отдела пермской системы и современные отложения. Кроме этого, в данном районе имеют площадное распространение магматические образования траппового комплекса раннетриасового возраста.

Непромышленная погребённая россыпь алмазов Дьюкунах приурочена к отложениям лапчанской свиты среднего карбона, развитым в виде реликтов в пределах днища палеодолины древней гидросети. Несмотря на то, что россыпь Дьюкунах является непромышленной, она представляет поисковый интерес, так как коренные источники алмазов, за счёт которых сформировалась россыпь, до сих пор неизвестны. Кимберлитовые тела на ближайших территориях отсутствуют, поэтому проблема направления переноса алмазносного материала в пределы россыпи по-прежнему является актуальной.

Фактический материал и методика обработки. Детальные исследования морфологических особенностей гранатов были выполнены с помощью оптической компьютерной системы на базе бинокля «Лейка» MZ16A (Германия), предназначенной для визуализации и качественной обработки изображений макро- и микроморфологии минералов. Данная система помимо бинокля включает видеокамеру Leica DFC-490 (8 Мгп) и рабочую станцию с программным комплексом, обеспечивающим компьютерный интерфейс. Оптическое оборудование позволяет проводить до 920-кратного увеличение объектов с выводом цветного изображения на монитор и цифровой записью получаемого изображения. Имеющееся программное обеспечение предоставляет возможность делать снимки с высочайшей глубиной резкости, что достигается серией снимков через заданный шаг (в микронах) и последующей автоматической «сшивкой» получаемого изображения.

По результатам изучения морфологии гранатов была выполнена генетическая интерпретация топографии их поверхности и проведена расшифровка условий морфогенеза.

Всего из древней россыпи Дьюкунах были изучены более 800 зёрен гранатов, в том числе около 586 – непосредственно из отложений лапчанской свиты.

Результаты исследований и их обсуждение. Для верхнепалеозойских отложений в пределах россыпи Дьюкунах характерна алмаз-пироповая ассоциация МИК при практически полном отсутствии пикроильменита. Следует отметить, что совместно с гранатом и алмазами в россыпи также присутствует хромшпинелид. Однако результаты ранее выполненных исследований парагенетических особенностей состава хромшпинелидов с использованием специализированной программы «MineralogicalAnalyse» показали, что среди них преобладают разности некимберлитового генезиса [6]. Генетически они не связаны ни с алмазами, ни с гранатами из-за разных термодинамических условий образования и в данной работе не рассматриваются.

Большинство гранатов в отложениях россыпи Дьюкунах представлено зёрнами менее 1 мм при доминировании класса -0,5 мм. Зёрна граната из класса -2+1 мм встречаются крайне редко. По форме преобладают разности округлой формы (до 75–80 %) при полном отсутствии угловатых и остроугольных зёрен (рис. 1). Подавляющая их масса предельно изношена и относится к классу IV по шкале сохранности [4]. Такой сильный износ с преобладанием округлых форм, в узком по гранулометрии диапазоне (< 1 мм), зёрна могли приобрести лишь в прибрежно-морских условиях. Примечательно то, что сохранившаяся в отдельных местах в пределах россыпи кора выветривания по карбонатным породам палеозоя также содержит гранаты, которые по макроморфологии зёрен идентичны разностям из отложений лапчанской свиты. Полное отсутствие пикроильменита в минеральной ассоциации объясняется его более низкой физико-механической устойчивостью по сравнению с гранатом, в результате чего в прибреж-



Рис. 1. Внешний вид гранатов с прибрежно-морским износом из отложений лапчанской свиты россыпи Дьюкунах

Fig. 1. Habitus of garnets impacted by coastal marine wear from Lapchanskaya suite deposits of Dyukunakh placer

но-морских условиях пикроильменит практически весь уничтожился. О том, что изначально он имел место в минеральной ассоциации верхнепалеозойских отложений, свидетельствуют его сохранившиеся единичные идеально окатанные зёрна среди минералов тяжёлой фракции мелких гранулометрических классов (< 0,5 мм), состав которых подтверждён электронно-зондовым анализом.

Среди гранатов россыпи отмечается достаточно высокий процент кубоидов (до 15–20 % и более), являющихся крайней формой растворения в гипергенных условиях (рис. 2). При этом развитие кубоидов осуществлялось уже по идеально окатанным зёрнам гранатов, о чём свидетельствует их изометрическая выпуклая форма, приближающаяся к округлой. На некоторых зёрнах-кубоидах заметен незначительный послекоррозионный износ.

Значительная доля зёрен гранатов из верхнепалеозойских отложений в пределах россыпи Дьюкунах в той или иной степени подвергнута пирамидально-черепитчатому типу растворения с образованием характерных микроформ (преимущественно черепитчатой по-

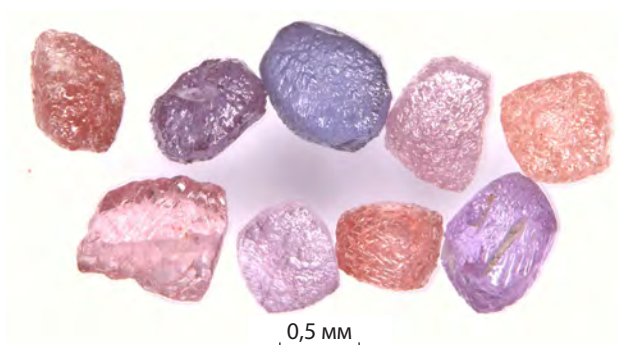


Рис. 2. Кубоиды гранатов из отложений лапчанской свиты

Fig. 2. Garnet cuboids from Lapchanskaya suite deposits

верхности). Причём данный тип растворения характерен как для предельно изношенных зёрен округлой формы без видимых следов гипергенного растворения, так и, что примечательно, для кубоидов. Поверхности пирамидально-черепитчатого типа растворения не несут на себе следов механического износа, что свидетельствует, во-первых, об отсутствии какого-либо заметного переноса гранатов после формирования данного типа растворения, во-вторых, о том, что пирамидально-черепитчатый тип растворения образовался в более поздний этап морфогенеза по отношению ко всем другим этапам, имеющим проявление на гранатах. Другими словами, образование пирамидально-черепитчатого типа растворения на гранатах реализовывалось на месте, непосредственно в осадочном коллекторе, после чего гранаты не испытали существенного перемещения.

Следует признать, что довольно необычно выглядят зёрна гранатов, по форме представляющие собой типичные кубоиды, но с пирамидально-черепитчатым типом растворения по их поверхности (см. рис. 2). Дело в том, что кубоидный и пирамидально-черепитчатый типы растворения реализуются в совершенно разных обстановках, под воздействием различных агентов. Кубоидный тип коррозии реализуется в коре выветривания, где агентами растворения выступают органические кисло-

ты (их водные растворы). При пирамидально-черепитчатом типе коррозии агентами растворения являются минерализованные (гидротермальные) растворы и реализуется он в более широком диапазоне обстановок. Эпигенетические изменения гранатов с образованием данного типа растворения могут происходить как в постмагматическую стадию, так и в условиях метасоматоза, а также при метатенезе (катагенезе) [1] и даже при диагенезе осадков [5]. В нашем случае развитие пирамидально-черепитчатого типа растворения как по изношенным округлым гранатам, так и по зёрнам-кубоидам свидетельствует, что данный тип наложился, с большей или меньшей степенью интенсивности, на все поверхности, сформировавшиеся на предыдущих этапах морфогенеза, полностью уничтожив их. В результате предшествующие пирамидально-черепитчатому типу растворения предельный износ и гипергенная коррозия узнаются лишь по характерной морфологии зёрен, являющейся индикатором соответствующих обстановок. Это относится в том числе и к зёрнам-кубоидам гранатов с пирамидально-черепитчатым типом растворения, на которых предыдущая каплевидная поверхность полностью уничтожена.

Сам факт развития пирамидально-черепитчатого типа растворения на гранатах по кубоидам свидетельствует о его вторичном генезисе. Изучение минеральных ассоциаций на сопредельных с россыпью Дьюкунах территориях в пределах Моркокинского алмазного района ЯАП позволяет с уверенностью утверждать, что пирамидально-черепитчатый тип растворения на данной территории реализовался в условиях метасоматоза, в результате воздействия трапповых интрузий на осадочный коллектор.

Иногда метасоматические изменения на гранатах проявлены достаточно интенсивно, вплоть до микрокоррозионного растрескивания внешней зоны зёрен. Из-за этого поверхность гранатов обесцвечивается, и зёрна приобретают белёсый цвет (рис. 3). Подобные изменения гранатов не следует путать с дислокационным типом растворения в условиях



Рис. 3. Интенсивно изменённые в условиях метасоматоза зёрна гранатов из отложений лапчанской свиты

Fig. 3. Metasomatically altered garnet grains from Lapchanskaya suite deposits

гипергенеза, с которым в данном случае они не имеют ничего общего. Даже на таких изменённых зёрнах при внимательном изучении можно заметить наличие черепитчатых микроформ, типичных для пирамидально-черепитчатого типа растворения.

Следует отметить, что морфологические особенности МИК из верхнепалеозойских отложений практически не меняются в пределах древней россыпи Дьюкунах не только по литорали, но и по вертикали. Лишь незначительно варьируют от пробы к пробе в ту или иную сторону процентные содержания идеально изношенных зёрен без видимых следов химического растворения, типичных кубоидов и гранатов с пирамидально-черепитчатым типом растворения.

Заключение. Результаты проведённого морфогенетического анализа гранатов из отложений в пределах россыпи Дьюкунах позволяют с большой долей уверенности утверждать, что их экзогенная эволюция происходила по следующей схеме: предельный износ в прибрежно-морских условиях – растворение в коре выветривания – переотложение с незначительным перемещением – растворение в

условиях метасоматоза без последующего переноса. Учитывая то, что обширные морские бассейны с интенсивной прибрежно-морской динамикой, как и мощная эпоха корообразования, имели место в среднем палеозое, можно сделать вывод, что сперва гранаты были идеально окатаны в прибрежно-морских условиях при формировании коллектора именно в среднепалеозойское время (D_3-C_1). Затем гранаты были подвергнуты гипергенному растворению в коре выветривания непосредственно в осадках этого же возраста и в это же время. После чего они были переотложены в позднепалеозойский (карбоновый) коллектор, который был подвергнут метасоматическому воздействию трапповых интрузий. Но растворение гранатов в условиях метасоматоза произошло в раннетриасовое время, в эпоху интенсивного проявления траппового магматизма. Учитывая то, что износ на гранатах после гипергенной коррозии незначительный и наблюдается лишь на части кубоидов, переотложение их из среднепалеозойского коллектора в верхнепалеозойский осуществлялось без значительного перемещения, в фациях ближнего или умеренного сноса. После растворения в условиях метасоматоза с образованием пирамидально-черепитчатого типа коррозии гранаты не испытали сколько-либо заметного перемещения.

Несмотря на то, что говорить о возрастной привязке различных типоморфных особенностей гранатов можно лишь с определённой долей вероятности, всё же приведённая выше схема их эволюции представляется вполне достоверной. Как бы то ни было, можно с уверенностью сказать, что гранаты прошли сложный эволюционный путь в экзогенных условиях, включая их предельный износ в прибрежно-морских условиях и неоднократное переотложение. При этом уже в отложениях лапчанской свиты, не говоря уже о вышележащих отложениях ботубинской свиты, гранаты являются переотложенными. Наличие гранатов с морским износом в континентальных осадках лапчанской и ботубинской свит нельзя трактовать иначе, как несоответствие гранатов, как и в целом минеральной ассоциации,



по своим морфологическим особенностям литодинамическому типу вмещающих осадков. Кроме этого, гранаты были подвергнуты существенной гипергенной коррозии в коре выветривания и метасоматическому воздействию трапповых интрузий. В результате такой экзогенной эволюции на гранатах не осталось и следа от их первичных морфологических признаков, связанных с глубинным этапом морфогенеза. Вследствие этого говорить о степени сохранности первичных поверхностей на гранатах не приходится. По этой причине не представляется возможным количественно определить степень удалённости коренных источников, являющихся поставщиком кимберлитового материала в пределы россыпи.

Проведённые детальные исследования морфологических особенностей гранатов с помощью оптической системы высокого разрешения позволили без привлечения их химического состава надёжно расшифровать условия морфогенеза и выявить всю последовательную цепочку их эпигенетических изменений. Таким образом, на примере данной работы показано, что даже без дорогостоящих микронзондовых исследований химического состава кимберлитовых минералов, с помощью традиционной оптической микроскопии, можно, опираясь только на морфологию минерала, вполне корректно восстановить все этапы морфогенеза, через которые прошёл данный минерал.

Список литературы

1. Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Похиленко Н. П. Морфология и морфогенез индикаторных минералов кимберлитов. – Новосибирск : СО РАН ; филиал «Гео», 2001. – 276 с.
2. Афанасьев В. П., Горяйнов С. А., Елисеев А. П., Зинчук Н. Н., Коптиль В. И., Надолинный В. А., Сонин В. М., Рылов Г. М. Изучение алмазов в геологоразведочном комплексе : методическое пособие. – Якутск : ЯФ ГУ СО РАН, 2004. – 300 с.
3. Харьков А. Д. Минералогические основы поисков алмазных месторождений. – М. : Недра, 1978. – 136 с.
4. Хмельков А. М. Основные минералы кимберлитов и их эволюция в процессе ореолообразования (на примере Якутской алмазоносной провинции). – Новосибирск : АРТА, 2008. – 252 с.
5. Хмельков А. М. Эпигенетические изменения кимберлитовых минералов в осадочном коллекторе в результате формирования складчатости // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2015. – № 1. – С. 73–82.
6. Хмельков А. М., Власова Э. А. Парагенетические особенности состава хромшпинелидов из россыпи Дьюкунах (Якутия) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2020. – № 4. – С. 36–45.

References

1. Afanas'ev V. P., Zinchuk N. N., Pokhilenko N. P. Morfologiya i morfogenez indikatornykh mineralov kimmerlitov [Morphology and morphogenesis of kimberlite indicator minerals], Novosibirsk, SO RAN, filial "Geo" Publ., 2001, 276 p.
2. Afanas'ev V. P., Goryainov S. A., Eliseev A. P., Zinchuk N. N., Koptil' V. I., Nadolinnyi V. A., Sonin V. M., Rylov G. M. Izucheniealmazov v geologorazvedochnom komplekse : metodicheskoe posobie [Studying diamonds in an exploration complex: a methodological manual], Yakutsk, YaF GU SO RAN Publ., 2004, 300 p.
3. Khar'kiv A. D. Mineralogicheskie osnovy poiskovalmaznykh mestorozhdenii [Mineralogical foundations of diamond deposits], Moscow, Nedra Publ., 1978, 136 p.
4. Khmel'kov A. M. Osnovnye mineraly kimmerlitov i ikh evolyutsiya v protsesse oreoloobrazovaniya (na primere Yakutskoi almazonosnoi provintsii) [The main minerals of kimberlites and their evolution in the process of the formation of halos (on the example of the Yakut diamondiferous province)], Novosibirsk, ARTA Publ., 2008, 252 p.

5. Khmel'kov A. M. Epigeneticheskie izmeneniya kimberlitovykh mineralov v osadochnom kollektore v rezul'tate formirovaniya skladchatosti [Epigenetic changes in kimberlite minerals in a sedimentary collector as a result of folding formation], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya* [Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology], 2015, No 1, pp. 73–82. (In Russ.).
6. Khmel'kov A. M., Vlasova E. A. Parageneticheskie osobennosti sostava khromshpinelidov iz rossypi D'yukunakh (Yakutiya) [Paragenetic features of the composition of chromspinelides from Dyukunakh placer (Yakutia)], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya* [Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology], 2020, No 4, pp. 36–45. (In Russ.).

Авторы

Власова Эльвира Александровна

геолог I категории
KulaninaEA@alrosa.ru

Хмельков Александр Михайлович

кандидат геолого-минералогических наук
ветеран АК «АЛРОСА» (ПАО)
st_56@mail.ru

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

Authors

Vlasova Elvira Aleksandrovna

1 category geologist
KulaninaEA@alrosa.ru

Khmelkov Aleksandr Mikhailovich

PhD
ALROSA (PJSC) veteran
st_56@mail.ru

Viluyi prospecting team of JSC ALROSA (PJSC),
Mirny, Russia

ПОЗДРАВЛЯЕМ С ЮБИЛЕЕМ



17 февраля 2021 года исполняется 70 лет крупному специалисту в сфере геологической съёмки, поисков и оценки месторождений рудных и неметаллических полезных ископаемых, научному руководителю ЦНИГРИ, академику РАЕН, доктору геолого-минералогических наук **Анатолию Иннокентьевичу Иванову**.

Заслуженный геолог РФ, почётный разведчик недр, первооткрыватель трёх месторождений золота и двух месторождений неметаллических полезных ископаемых Анатолий Иннокентьевич Иванов награждён медалями «За заслуги в разведке недр» (1984), «За трудовую доблесть» (1985), Почётной грамотой Президента Российской Федерации с нагрудным знаком (2019), медалью «Геолог Игорь Грамберг» (2020), удостоен звания «Человек года: ветеран-геологоразведчик России – 2019 г.». Он прошёл замечательный путь в профессии, внёс существенный вклад в укрепление минерально-сырьевой базы

страны и сегодня прилагает много сил для того, чтобы наш институт успешно работал и развивался.

Анатолий Иннокентьевич Иванов более 45 лет посвятил геологической съёмке, поискам и разведке полезных ископаемых. После окончания Иркутского государственного университета геологическая судьба подарила Анатолию Иннокентьевичу годы интереснейших исследований на Патомском нагорье, в Западном Прибайкалье, в Восточном Саяне – именно тогда в полной мере раскрылся его талант геолога-поисковика. В 1973–1991 гг. он работал в ПГО «Иркутскгеология» геологом, старшим геологом, начальником партии, ведущим геологом. С 1992 по 2011 г. занимал пост генерального директора ЗАО «Офит» и ЗАО «Сибирская геологическая компания».

На основе составленных А. И. Ивановым прогнозных оценок и при его непосредственном участии выявлены Витимский железорудный узел и Тонодский олово-вольфрамовый район, месторождения рудного золота Ожерелье, Ыканское, Аройское, а также Усть-Куретское месторождение гипса, месторождение талька Камчадал, ряд перспективных рудопроявлений золота, олова, вольфрама, молибдена. Созданные А. И. Ивановым методические и технологические приёмы поисков золоторудных месторождений, в том числе в сложных горно-таёжных ландшафтах, в условиях вечной мерзлоты, многократно апробированы в Восточной Сибири, в других перспективных рудных регионах Российской Федерации.

А. И. Иванов автор более 80 научных трудов, трёх монографий. Его исследования в области научно-методических основ прогноза, поисков и оценки крупнообъёмных месторождений золота в черносланцевых толщах хорошо известны коллегам в России и за рубежом. В комплексе с другими научными направлениями института эти работы позволяют ЦНИГРИ взаимодействовать с широким кругом производственных и академических организаций, играть заметную роль в сфере международного сотрудничества.

Анатолий Иннокентьевич начал работать в ЦНИГРИ в 2012 году в должности первого заместителя директора. Возглавив институт в 2014 году, он успешно руководил крупными проектами по государственным контрактам. Завершая свою миссию на посту директора в 2018 году, он сумел в короткие сроки провести преобразование института из унитарного предприятия в бюджетное учреждение: ФГБУ «ЦНИГРИ» сохранил научный коллектив и на новом этапе наращивает свой потенциал в системе Государственной геологической службы.

Ныне Анатолий Иннокентьевич Иванов осуществляет научное руководство исследованиями нашего института. Особое внимание он уделяет одному из наиболее важных направлений деятельности ЦНИГРИ – научно-методическому сопровождению геологоразведочных работ, проводимых за счёт средств федерального бюджета, а также курирует ряд важных проектов по приросту прогнозных ресурсов золота Российской Федерации.

Обладая огромным опытом полевых работ, Анатолий Иннокентьевич прекрасно понимает их значение для роста молодых специалистов, для формирования научных воззрений геолога и сегодня делает всё возможное, чтобы расширить географию экспедиций ЦНИГРИ, дать коллегам возможность полноценно работать в поле. По его инициативе создан Совет молодых учёных и специалистов ЦНИГРИ. В 2019 г. учреждена кафедра прогноза, поисков и разведки рудных месторождений – совместная структура ЦНИГРИ и геологоразведочного факультета МГРИ. Заведование базовой кафедрой ЦНИГРИ принял профессор, доктор геолого-минералогических наук А. И. Иванов. С 2020 года в стенах института проводится Молодёжная научно-образовательная конференция «МСБ алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче» – новый проект, вдохновителем которого также стал научный руководитель ЦНИГРИ Анатолий Иннокентьевич Иванов.

Талант и энергия, помноженные на опыт и профессионализм, помогают Анатолию Иннокентьевичу решать самые сложные вопросы. Он курирует проведение организуемой ЦНИГРИ ежегодной Международной научной конференции «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов», возглавляет диссертационный совет института, руководит работой ряда соискателей учёной степени кандидата наук, является научным консультантом по подготовке докторских диссертаций, определяет редакционную политику одного из старейших геологических научных журналов, «Отечественная геология», и уникального научно-технического журнала «Руды и металлы». И это далеко не полный перечень огромной работы, которую Анатолий Иннокентьевич Иванов выполняет как научный руководитель ФГБУ «ЦНИГРИ» и один из лидеров отечественной геологической отрасли.

Мы от всей души желаем Анатолию Иннокентьевичу талантливых учеников, новых увлекательных маршрутов, интригующих геологических находок, великолепного здоровья, солнечного счастья!

*Учёный совет ЦНИГРИ
Редколлегия журнала*

ПОЗДРАВЛЯЕМ С ЮБИЛЕЕМ



18 февраля 2021 г. исполнилось 60 лет известному специалисту в области минералогических, изотопно-геохимических и термобарогеохимических исследований рудных месторождений, заведующему отделом минералогии и изотопной геохимии ФГБУ «ЦНИГРИ», члену-корреспонденту РАЕН, доктору геолого-минералогических наук **Сергею Гавриловичу Кряжеву**.

С. Г. Кряжев создал поисковые минералого-геохимические модели эталонных золоторудных месторождений основных геолого-промышленных типов, на основе которых разработан комплекс поисковых критериев и методов их выявления. Изотопно-геохимические и термобарогеохимические критерии прогноза и поисков золоторудных месторождений в черносланцевых толщах были им успешно апробированы в производственных условиях при проведении поисковых работ в Иркутской области и Чукотском АО. При активном участии Сергея Гавриловича в ЦНИГРИ разработан, запатентован и внедрён в прак-

тику геологоразведочных работ ионно-сорбционный метод литохимических поисков скрытых полиметаллических месторождений.

Сергей Гаврилович Кряжев в 1983 г. окончил Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова по специальности «Геологическая съёмка, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых» и поступил на работу в ЦНИГРИ. Вся его трудовая деятельность связана с этим институтом, в котором он прошёл путь от инженера до заведующего отделом. В 2000 г. Сергей Гаврилович Кряжев защитил кандидатскую диссертацию «Геолого-генетические особенности и изотопно-геохимический режим формирования месторождения Мурунтау», а в 2017 г. – докторскую диссертацию на тему «Генетические модели и критерии прогноза золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах». Последние 18 лет он руководит отделом минералогии и изотопной геохимии ФГБУ «ЦНИГРИ».

На объектах геологоразведочных работ, проводимых ФГБУ «ЦНИГРИ» в рамках Государственного задания за счёт средств федерального бюджета, С. Г. Кряжев руководит минералогическими, петрографическими, изотопно-геохимическими и термобарогеохимическими исследованиями с применением комплекса современных инструментальных методов анализа пород, руд и минералов. Основная цель этих исследований – уточнение генетических аспектов рудогенеза, минерального состава и параметров зональности руд и метасоматитов, а также других вещественных характеристик, влияющих на результативность поисков. За достижения в данном направлении работ Сергею Гавриловичу Кряжеву в 2017 г. присуждено звание «Почётный разведчик недр».

Результаты исследований С. Г. Кряжева представлены в 170 отчётах по НИР и опубликованы в более чем 100 научных работах, в числе которых две монографии и 60 статей в ведущих зарубежных и российских журналах.

Поздравляем Сергея Гавриловича с юбилеем и желаем дальнейших успехов в его плодотворной научной работе!

*Учёный совет ЦНИГРИ
Редколлегия журнала*

ПОЗДРАВЛЯЕМ С ЮБИЛЕЕМ



13 марта 2021 г. исполнилось 85 лет заслуженному деятелю науки Российской Федерации, почётному разведчику недр, доктору геолого-минералогических наук **Борису Игоревичу Беневольскому**.

Борис Игоревич Беневольский – крупный специалист, совмещающий значительный опыт полевых исследований и многолетней аналитической работы в Министерстве геологии СССР, эксперт высокого уровня в области геолого-экономического мониторинга и конъюнктуры минерального сырья. В числе его важнейших проектов – создание на рубеже XX и XXI веков информационно-аналитической системы прогноза и воспроизводства минерально-сырьевой базы РФ, ставшей основой оценки сбалансированного развития, и долгосрочных государственных программ изучения недр и воспроизводства минерально-сырьевой базы ТПИ.

Борис Игоревич в 1958 г. окончил геологический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Трудовую деятельность он начал в Геологическом управлении «Севостгеология» в Центрально-Колымском районе и за одиннадцать лет прошёл путь от горного мастера круглогодичной партии до главного инженера крупной экспедиции, которая вела поиски коренных и разведку россыпных месторождений золота. При непосредственном участии Б. И. Беневольского разведаны крупные россыпи верховья р. Колыма (Валунный, Болотный и др.). В 1958–1969 гг. он занимался оценкой ресурсного потенциала коренного и россыпного золота этой перспективной территории, укрепляя сырьевую базу золотодобывающих предприятий региона. В дальнейшем Борис Игоревич участвовал в исследованиях золотоносных территорий Монголии и работе геолого-экономической экспедиции Министерства геологии СССР, а в 1972 г. он был назначен главным геологом управления благородных металлов Мингео СССР и проработал в этой должности семнадцать лет.

Борис Игоревич Беневольский внёс огромный вклад в открытие и промышленную оценку знаменитых ныне коренных и россыпных месторождений золота (Олимпиадинского, Дукатского, Кубакинского, Покровского, Мужиеского, Большой Канимансур и др.), в создание сырьевой базы золота в Камчатской области, Корякском автономном округе, Республике Коми и других регионах России. При его участии разработаны эффективные государственные программы геологоразведочных работ, в результате которых создана одна из крупнейших в мире минерально-сырьевых баз золото- и серебродобывающей промышленности России и стран СНГ. В первые десятилетия XXI века этот сырьевой фундамент обеспечил стабильно высокую добычу благородных металлов.

В период работы в Мингео СССР Борис Игоревич активно участвовал в создании современных методических руководств по поискам, разведке и геолого-экономической оценке коренных и россыпных месторождений, что способствовало развитию сырьевой базы страны и формированию отечественной школы геологоразведчиков.

В 1989 г. с переходом в ЦНИГРИ начался следующий плодотворный этап исследований Бориса Игоревича Беневольского. Его научно-аналитические и прикладные разработки имеют большое научное и практическое значение для эффективного недропользования в новых условиях рыночной экономики. Совместно с другими учёными ЦНИГРИ им разработаны средне-долгосрочная (до 2020 г.) государственная программа развития минерально-сырьевой базы золотодобывающей промышленности и концепция национальной минерально-сырьевой



безопасности в условиях динамично развивающихся процессов глобализации минерально-сырьевого комплекса. В 2002 г. за эту работу Борис Игоревич Беневольский был удостоен звания лауреата премии им. А. Н. Косыгина. На рубеже XX и XXI веков вышли монографии «Минерально-сырьевая база благородных и цветных металлов к 2025 году. Мир и Россия», «Золото России», «Проблемы использования и воспроизводства МСБ», издан комплект карт золотоносности федеральных округов и субъектов Российской Федерации. В этих и других трудах Б. И. Беневольский и его соавторы обосновали идеологию государственной стратегии в развитии сырьевой базы золотодобычи, её использовании и воспроизводстве в новой системе недропользования и свободного рынка.

В начале 1990-х гг. Б. И. Беневольский совместно с другими учёными ЦНИГРИ разработал и внедрил систему мониторинга использования и воспроизводства минерально-сырьевой базы твёрдых полезных ископаемых, создал единую информационную систему «Минерально-сырьевые ресурсы России». Кроме того, он продолжил исследования по переоценке прогнозных ресурсов благородных и цветных металлов и подготовке соответствующих методических руководств. В этот период он многое сделал для создания правовой основы системы недропользования в условиях экономических преобразований: участвовал в экспертных группах Государственной Думы, занимавшихся разработкой проектов законов о недрах, соглашений о разделе продукции, о драгоценных металлах и драгоценных камнях и других, направленных на развитие и рациональное использование сырьевой базы, привлечение отечественных и зарубежных инвесторов.

Под высококвалифицированным руководством и при непосредственном участии Б. И. Беневольского проведена геолого-экономическая оценка и разработаны технико-экономические обоснования промышленного освоения в новых условиях недропользования месторождений цветных и благородных металлов (Озерновского, Каменского, Покровского, Павловского, Сейнавского узла и Федоровой тундры и др.).

Вместе с коллегами он актуализировал методические рекомендации по оценке прогнозных ресурсов ТПИ и классификации запасов и прогнозных ресурсов ТПИ и стадийности геологоразведочных работ в соответствии с современным международным регламентом. Впервые в отечественной геологии им разработана и успешно внедрена не знающая аналогов система кадастрового учёта прогнозных ресурсов ТПИ.

В течение многих лет Борис Игоревич Беневольский выполнял большую научно-организационную работу как заместитель председателя секции Учёного совета ЦНИГРИ, председатель секции конъюнктуры минерального сырья Межведомственного экспертного научно-методического совета МПР России по геологии алмазов, благородных и цветных металлов, член секции россыпей Межведомственного комитета по рудообразованию и металлогении РАН, главный научный эксперт МПР России по благородным металлам, эксперт ГКЗ.

Борис Игоревич Беневольский – автор 150 научных трудов, в том числе десяти монографий. Он действительный член Академии горных наук и Международной академии информатизации. Его многолетняя и плодотворная деятельность высоко оценена государством и профессиональным сообществом.

Поздравляем Бориса Игоревича с 85-летием и желаем ему здоровья, семейного благополучия!

*Учёный совет ЦНИГРИ
Редколлегия журнала*

ПОСВЯЩАЕТСЯ ПАМЯТИ



1939 – 2021

27 февраля 2021 г. ушёл из жизни крупный специалист в области геологии, поисков, разведки и геолого-экономической оценки россыпных месторождений, кандидат геолого-минералогических наук, лауреат Государственной премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники **Владимир Ильич Куторгин**.

Владимир Ильич Куторгин участвовал в изучении экзогенных месторождений России, Монголии, Болгарии, Турции, Анголы, США (Аляска), Боливии. Свой путь в профессии он начал в геологоразведке: в 1959 г. после окончания с отличием Магаданского горно-геологического техникума был принят на должность техника во Всесоюзный научно-исследовательский институт золота и редких металлов (ВНИИ-1). В 1970 г. Владимир Ильич окончил Всесоюзный заочный политехнический институт, в 1982 г. защитил кандидатскую диссертацию. В середине 1980-х годов Владимир Ильич Куторгин обладал уже значительным

опытом изучения золотых россыпей на северо-востоке и Дальнем Востоке СССР и в 1984 г. был приглашён работать в многопрофильный головной институт Министерства геологии СССР ЦНИГРИ на должность заведующего сектором в подразделении, объединившем методистов по разведке и оценке месторождений благородных, цветных металлов и алмазов. В ЦНИГРИ Владимир Ильич трудился более 30 лет.

Важной задачей Владимира Ильича Куторгина и его коллег стала характеристика неоднородности строения аллювиальных россыпей золота. Методические разработки В. И. Куторгина, основанные на результатах его дальневосточных исследований, были апробированы в разных районах страны, и это помогло специалистам ЦНИГРИ определить весь диапазон дальнейших исследований объектов, включая поисковые, поисково-оценочные, а также разведочные работы на предварительной, детальной и эксплуатационной стадиях разведки. Разработанная Владимиром Ильичом Куторгиным и его соавторами «Методика разведки золота и платиноидов» (1992) до сегодняшнего дня – основное практическое пособие для недропользователей при разведочных работах и подсчёте запасов россыпных месторождений.

В начале 1990-х годов Владимир Ильич Куторгин принял активное участие в создании многофакторных моделей основных геолого-промышленных типов месторождений золота для разработки эффективных методик разведки. Эти пионерные исследования имели большое значение, в частности, для дополнительного изучения известных золотоносных районов страны, где запасы россыпей были исчерпаны, а новые найти не удавалось. В 1991 г. В. И. Куторгин с коллегами впервые успешно применили многофакторные модели при составлении «Методического руководства по разведке и оценке аллювиальных россыпей золота Кузнецкого Алатау и Салаира».

В 1992 г. Владимир Ильич Куторгин возглавил отдел методики разведки ЦНИГРИ. На основе созданных им многофакторных моделей россыпных месторождений благородных металлов разработана классификация россыпей, залегающих в различных геолого-геоморфологических обстановках. В 2002 г. под его редакцией вышла книга «Системы оценки и разведки россыпных месторождений золота и платиноидов на основе многофакторных моделей».

Владимир Ильич Куторгин внёс большой вклад в наращивание минерально-сырьевой базы платиноидов Дальнего Востока, разработав рекомендации по промышленной оценке их запасов в россыпях Корякии, создавая концентрационные модели платиноидов, непосредственно участвуя в разведке и подсчёте запасов крупнейших россыпей платиноидов региона. Его заслу-



ги отмечены Правительством Корякского автономного округа: Владимиру Ильичу было вручено свидетельство об открытии новых россыпей.

С самого начала поисков и предварительной разведки на массиве Кондёр в Хабаровском крае Владимир Ильич осуществлял методическое сопровождение этих работ. Им совместно с коллегами были впервые оценены техногенные запасы отвального комплекса месторождения Кондёр и разработано ТЭО кондиций техногенного комплекса. В 2004 г. под руководством Владимира Ильича в ЦНИГРИ разработаны методические рекомендации по применению разведочных технологий к нетрадиционным геолого-промышленным типам россыпей, в том числе техногенным и золотосодержащим корам химического выветривания. В современных условиях предложенные подходы приобретают всё большую актуальность. Подготовку этого методического пособия к изданию Владимир Ильич завершил относительно недавно, и его последний труд ожидает публикации.

Владимир Ильич Куторгин – автор около 50 опубликованных и 70 рукописных научно-исследовательских работ. Многие годы он был членом Учёного совета ЦНИГРИ, заместителем председателя научно-методического совета отдела конъюнктуры минерального сырья. С 1988 г. он являлся экспертом ГКЗ. Работал в составе ряда экспертных комиссий ЦНИГРИ и МПР РФ, в частности, анализировал материалы по нормативам потерь ТПИ при добыче, возглавлял комиссию, проводившую экологическую экспертизу при промышленном освоении россыпей золота и платиноидов.

За большой вклад в разработку моделей россыпей благородных металлов и методических принципов их оценки Владимир Ильич Куторгин в 2007 г. удостоен Государственной премии Правительства Российской Федерации.

Владимир Ильич был увлечён своей работой и, даже уйдя на пенсию, продолжал консультировать коллег, помогал молодым специалистам, аспирантам и сотрудникам ЦНИГРИ, выезжал на объекты. Он чувствовал ответственность за результат исследований, которыми занимался всю жизнь. Был большим патриотом ВНИИ-1 и ЦНИГРИ, в которых трудился долгие годы – в общей сложности 60 лет. Вёл общественную работу в совете ветеранов Магаданского землячества, добивался присвоения геологическому музею СВКНИИ имени его организатора и первого директора Г. Ф. Павлова. Владимир Ильич воплотил в жизнь мечту Г. Ф. Павлова – издал его мемуары «Что было, то было», взяв на себя заботы о финансировании, редактировании и оформлении книги после кончины её автора. Эту книгу он дарил людям, которым небезразлична история развития науки, история Магаданской области и нашей страны.

Уже многого добившись в профессии, Владимир Ильич Куторгин продолжал серьёзно заниматься вольной борьбой, стал мастером спорта, чемпионом Магаданской области – его потенциал в профессиональном спорте оценивали настолько высоко, что в конце 1970-х годов Владимира Ильича пригласили войти в сборную СССР по вольной борьбе. Это означало бы крутую переменную в его судьбе, новые возможности. Но он, конечно, выбрал геологию. Впоследствии Владимир Ильич Куторгин достиг высочайшего уровня как специалист в области геологической разведки россыпных месторождений благородных металлов. И лишь жизненные обстоятельства не позволили ему оформить свой профессиональный статус защитой докторской диссертации.

Работы Владимира Ильича Куторгина востребованы практикой. Его исследования продолжают ученики и последователи. Память о нём хранят в нашем институте и во многих организациях геологоразведочной отрасли России.

*Учёный совет ЦНИГРИ
Редколлегия журнала
Коллеги и друзья*

ПОСВЯЩАЕТСЯ ПАМЯТИ



1939–2021

Федеральное агентство по недропользованию с глубоким прискорбием сообщает, что 13 мая 2021 года ушёл из жизни научный руководитель АО «ПМГРЭ» **Владимир Дмитриевич Крюков**.

Крюков.

В. Д. Крюков родился в 1939 г. в пригороде Ленинграда – Петергофе. В 1956 году поступил на вечернее отделение Ленинградского государственного университета на географический факультет. Одновременно работал в Тресте геодезических работ и инженерных изысканий. В марте 1959 г. перешёл в Научно-исследовательский институт геологии Арктики (НИИГА), где работал коллектором, техником, участвовал в полевых работах на Таймыре и в районе Нижней Тунгуски.

В 1963 г. В. Д. Крюков переехал в г. Норильск, где по инициативе выдающегося полярного исследователя Н. Н. Урванцева была создана постоянно действующая научно-исследовательская экспедиция НИИГА. В 1969 г. во ВСЕГЕИ Владимир Дмитриевич

успешно защитил кандидатскую диссертацию, а в 1971 г. был назначен начальником Норильской опытно-методической экспедиции. В эти годы проводилась большая работа по укреплению производственной базы экспедиции и одновременно расширилась география геологических работ с выходом на Таймыр и Северную Землю.

В 1976 г. В. Д. Крюков вернулся в Ленинград, где организовал Арктическую комплексную геолого-геофизическую экспедицию, в задачи которой входило продолжение поисковых работ на о. Большевик, а также изучение россыпной оловоносности и золотоносности шельфовой зоны Восточно-Сибирского, Чукотского и Берингова морей. Под его руководством были открыты крупные месторождения россыпного олова на шельфе Новосибирских островов, прогнозная оценка ресурсов которых превышает 100 тыс. т металла. В Якутии открыта и дана предварительная оценка крупнейшего редкометалльного месторождения Томтор.

В 1987 г. после объединения Арктической и Полярной экспедиций В. Д. Крюков был назначен директором Полярной морской геологоразведочной экспедиции, единственной в России специализированной организации, выполняющей комплексные геологические исследования в наиболее труднодоступных районах Земли: Арктике, Антарктике и Мировом океане.

В. Д. Крюков как бессменный директор ПМГРЭ на протяжении более 40 лет определял основные планы и направления производственных и тематических исследований Полярной экспедиции в Арктике, Антарктике и Мировом океане.

Владимир Дмитриевич участвовал в составлении планов работ и их выполнении в Советской и Российской антарктических экспедициях. Он добивался осуществления ежегодных экспедиций в Антарктику даже в сложные 90-е годы, когда резко сократилось выделение средств из федерального бюджета. За это время не было пропущено ни одной экспедиции. Лично принимал участие в двух антарктических экспедициях, в том числе на станции «Восток», где были организованы работы по изучению уникального подледникового одноимённого озера. Принимал участие в создании геологической базы «Прогресс», ставшей центром российских антарктических исследований.

Большой вклад Владимир Дмитриевич внёс в создание целевого геолого-геофизического судна «Академик Александр Карпинский». В результате произведённого переоборудования, в основном за счёт внебюджетных источников, судно способно выполнять региональные, геофизические, сейсмические работы на современном мировом уровне.



В 2000–2005 гг. В. Д. Крюков возглавлял и принимал личное участие в организации и проведении поисково-разведочных работах на Новой Земле. В результате этих работ было открыто крупное Павловское месторождение серебросодержащих свинцово-цинковых руд, запасы по которому были утверждены в 2004 г. в Государственной комиссии по запасам Российской Федерации в объёме 2400 тыс. т свинца и цинка. Месторождение отнесено к разряду крупных.

По геологическим материалам, полученным Полярной экспедицией, в 2001 г. совместно с ВНИИОкеангеологией, было подготовлено обоснование заявки в Комиссию по границам континентального шельфа по установлению внешней границы континентального шельфа РФ, позволяющее претендовать на существенный, площадью 1,2 млн кв. км, прирост континентального шельфа России за пределами 200 морских миль с углеводородным потенциалом не менее 10 млрд т.т.

За большой вклад в развитие минерально-сырьевой базы, обоснование внешней границы континентального шельфа России в Северном Ледовитом океане, защите геополитических интересов России в Мировом океане и Антарктике В. Д. Крюков награждён орденами «За заслуги перед Отечеством» IV степени, «За морские заслуги», «Знак Почёта», «Почёта», несколькими медалями Российской Федерации. Он лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, заслуженный геолог Российской Федерации, почётный разведчик недр, почётный полярник, почётный ветеран-геологоразведчик. За свою активную благотворительную деятельность награждён орденом «Меценат» и знаком «Благотворитель». В 2004 г. ему присвоено звание «Почётный гражданин г. Петергофа», он также награждён медалью «За заслуги перед Петродворцовым районом».

Владимира Дмитриевича отличали безусловная преданность геологии, умение мыслить стратегически, по государственному, ставя главным приоритетом интересы России.

Все, кто знал Владимира Дмитриевича Крюкова, всегда будут помнить его как человека, преданного Родине, легендарного геолога, внёсшего значительный вклад в экономическое могущество страны.

Коллектив Роснедр выражает глубокие соболезнования родным, коллегам и друзьям покойного.

Редакция: *В. С. Жаркова, О. А. Грибовская*
Вёрстка и оригинал-макет: *А. С. Рязанцева, В. Ю. Козлова*
Фото на обложке (азурит, малахит): *С. Г. Епанчинцев, webmineral.ru*

Подписано в печать 17.05.21 г. Формат 30×42 1/2. 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.tsnigri.ru/ru/informatsionnye-resursy/izdaniya/zhurnal-rudy-i-metally.html>