

ISSN 0869-5997

**и РУДЫ**   
**МЕТАЛЛЫ**  
**ORES AND METALS**

**4 / 2021**

# РУДЫ И МЕТАЛЛЫ 4/2021

## Учредитель

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

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

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

Москва, ЦНИГРИ, 2021

Журнал издаётся при поддержке Международной ассоциации по генезису рудных месторождений



## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

### **Черных Александр Иванович**

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

### **Иванов Анатолий Иннокентьевич**

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

### **Пирайно Франко**

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

### **Наумов Евгений Анатольевич**

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

### **Жаркова Вера Сергеевна**

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

### **Аракчеев Дмитрий Борисович**

генеральный директор ФГБУ «Росгеолфонд»  
кандидат технических наук

### **Волчков Алексей Гордеевич**

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

### **Вымазалова Анна**

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 Брунсуик, Канада

### **Мишенин Сергей Григорьевич**

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

### **Похиленко Николай Петрович**

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

### **Проскурнин Василий Фёдорович**

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

### **Зельтманн Реймар**

профессор, Музей естественной истории,  
г. Лондон, Великобритания

### **Толстов Александр Васильевич**

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

### **Третьякова Ирина Геннадьевна**

учёный секретарь ФГБУ «ЦНИГРИ»  
кандидат геолого-минералогических наук

### **Фридовский Валерий Юрьевич**

директор ИГАБМ СО РАН  
доктор геолого-минералогических наук, профессор

# ORES AND METALS 4/2021

Founded by FSBI «Central research institute of geological prospecting for base and precious metals» (TsNIGRI)  
Federal Agency for Subsoil Use

Mass media registration certificate No 01919 (21.12.1992).

Published since 1992

Moscow, TsNIGRI, 2021

The Journal is published with the support of the IAGOD  
(International association on the genesis of ore deposits)



## EDITORIAL BOARD

### **Alexander I. Chernykh**

Editor-in-chief  
FSBI TsNIGRI, General Director  
PhD

### **Anatoly I. Ivanov**

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

### **Franco Pirajno**

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

### **Evgeniy A. Naumov**

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

### **Vera S. Zharkova**

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

### **Dmitry B. Arakcheev**

FSBI Rosgeofond, General Director  
PhD

### **Alexey G. Volchkov**

Head of scientific and methodical department, FSBI TsNIGRI  
PhD

### **Anna Vymazalova**

Dr., Czech Geological Survey, Czech Republic

### **Yuri K. Golubev**

Head of diamond department, FSBI TsNIGRI  
PhD

### **Nikolay A. Goryachev**

Chief researcher, NEISRI FEB RAS  
Corr. Member of RAS

### **Vladimir E. Dementiev**

General Director, JSC Irgiredmet  
PhD

### **Vadim S. Zvezdov**

Head of metallogeny department, FSBI TsNIGRI  
PhD

### **Yuri A. Kalinin**

Chief researcher, IGM SB RAS  
PhD

### **Alexander A. Kremenetsky**

Advisor to General Director, FSBI IMGRE  
PhD

### **Sergey G. Kryazhev**

Head of mineralogy and isotope geochemistry  
department, FSBI TsNIGRI  
PhD

### **Vladimir V. Kuznetsov**

Head of base metals department, FSBI TsNIGRI  
PhD

### **David Lentz**

Dr., Professor, University of New Brunswick, Canada

### **Sergey G. Mishenin**

Head of geophysics department, FSBI TsNIGRI  
PhD

### **Nikolay P. Pokhilenko**

Scientific Director, IGM SB RAS  
Academician of RAS

### **Vasily F. Proskurin**

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

### **Reimar Seltmann**

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

### **Alexander V. Tolstov**

Director, JSC ALROSA (PJSC)  
PhD

### **Irina G. Tretiakova**

Science secretary, FSBI TsNIGRI  
PhD

### **Valery Yu. Fridovskiy**

Director, IGABM SB RAS  
PhD, Professor



# СОДЕРЖАНИЕ CONTENTS

## НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

**Егорова И. В., Михайлов Б. К.**

Объектный метод анализа обеспеченности запасами полезных ископаемых на примере России

06

## SUBSOIL USE

**Egorova I. V., Mikhailov B. K.**

Objective method for analysis of mineral resources supply on the example of Russia

## ПРИКЛАДНАЯ МЕТАЛЛОГЕНИЯ

**Сердюк С. С., Макаров В. А.,  
Кириленко В. А., Макаров И. В.,  
Муромцев Е. А., Шведов Г. И.**

Геология и колчеданно-полиметаллическое оруденение прогнозируемого Лимонитового месторождения Рассохинского рудного узла (Енисейский кряж)

22

## APPLIED METALLOGENY

**Serdyuk S. S., Makarov V. A.,  
Kirilenko V. A., Makarov I. V.,  
Muromtsev E. A., Shvedov G. I.**

Geology and pyrite-polymetallic mineralization of the forecasted Limonite deposit, Rassokhinsky ore cluster (Yenisei ridge)

## МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА, ПОИСКОВ, ОЦЕНКИ И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

**Чикатуева В. Ю., Степанов Н. В.,  
Читалин А. Ф., Корост Д. В.**

Методика изучения керн объектов золото-кварцевой формации с применением рентгеновской компьютерной томографии на примере месторождения Дразное (Республика Саха (Якутия))

43

## PROGNOSIS, PROSPECTING AND EXPLORATION: TECHNIQUES AND METHODS

**Chikatueva V. Yu., Stepanov N. V.,  
Chitalin A. F., Korost D. V.**

X-ray computed tomography study for drill core of the Drazhnoye orogenic-type gold deposit (Sakha (Yakutia), Russian Federation)

## СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

**Ежков Ю. Б., Рахимов Р. Р.,  
Холиёров А. Т., Тошметов У. Х.**

Редкометалльно-полиметаллическое оруденение Кошмансайского рудного поля (Восточный Узбекистан)

60

## GEOLOGY OF ORE DEPOSITS

**Ezhkov Y. B., Rahimov R. R.,  
Holiyorov A. T., Toshmetov U. H.**

Rare metal-polymetallic mineralization of Koshmansai ore field (Eastern Uzbekistan)



**Зайцева М. Н.**

Особенности геологического строения  
и локализации оруденения Морянихо-  
Меркурихинского рудного поля

75

**Zaitseva M. N.**

Geological structure and localization  
of mineralization at the Moryanikho-  
Merkurikhinskoye ore field

СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АЛМАЗОВ

**Черенков В. Г., Корнилова В. П.,  
Голубева Ю. Ю., Герасимова М. В.**

Базиты Вилуюско-Мархинского дайкового  
пояса (Вилуюский палеорифт)  
и их соотношения с кимберлитами  
Накынского поля

85

GEOLOGY OF DIAMOND DEPOSITS

**Cherenkov V. G., Kornilova V. P.,  
Golubeva Yu. Yu., Gerasimova M. V.**

Basites of Vilyui-Markhinsky dike belt  
(Vilyui paleorift) and their relations  
with Nakyn field kimberlites

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ  
И СВОЙСТВА ПОРОД И РУД

**Юричев А. Н.**

Акцессорные минералы золота  
и серебра в ультрамафитах  
Кызыр-Бурлюкского массива  
(Западный Саян)

109

COMPOSITION AND PROPERTIES  
OF ROCKS AND ORES

**Yurichev A. N.**

Gold and silver accessory minerals  
in ultramafites of the Kyzyr-Burlyuisky  
ultramafic massif (Western Sayan)

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ  
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

**Морозов В. В., Поливанская В. В.**

Повышение эффективности  
флотации апатит-штаффелитовых  
руд с применением режима  
двухстадиального сгущения шламов

121

COMPREHENSIVE USE  
OF MINERALS

**Morozov V. V., Polivanskaya V. V.**

Apatite-staffelite ore flotation  
efficiency improvement using  
two-stage slurry thickening

ПОЗДРАВЛЯЕМ С ЮБИЛЕЕМ

Кременецкого А. А.

132

OUR CONGRATULATIONS

Kremenetsky A. A.

ПОСВЯЩАЕТСЯ ПАМЯТИ

Новикова В. П.  
Лихачёва А. П.  
Голенева В. Б.

134

IN MEMORIAM

Novikov V. P.  
Likhachev A. P.  
Golenev V. B.

Список статей, опубликованных  
в журнале «Руды и металлы» в 2021 г.

138

«Ores and metals»  
list of publications 2021

## Объектный метод анализа обеспеченности запасами полезных ископаемых на примере России

### Objective method for analysis of mineral resources supply on the example of Russia

Егорова И. В., Михайлов Б. К.

Egorova I. V., Mikhailov B. K.

Рассматривается прогноз добычи твёрдых полезных ископаемых в России, базирующийся на интеграции ожидаемых сроков эксплуатации конкретных разрабатываемых и осваиваемых месторождений. Показано, что минерально-сырьевая безопасность в полной мере обеспечена для меди, никеля, свинца, вольфрама и олова, запасов которых достаточно для их добычи не менее чем на текущем уровне в течение 40–50 лет с реальными перспективами значительного роста. Обеспеченность запасами других видов минерального сырья существенно меньше, для молибдена и хрома она ограничивается примерно 30 годами, добыча цинка и урана может заметно сократиться уже через 20 лет. Ещё сложнее ситуация с золотом и алмазами. Ввод в строй добывающих предприятий на осваиваемых золоторудных объектах может в ближайшие годы обеспечить быстрый рост добычи. Однако в начале следующего десятилетия прогнозируется истощение ключевого на сегодняшний день Олимпиадинского месторождения и ряда других. Проекты освоения новых месторождений не компенсируют выпадающие мощности, что может стать причиной длительного спада российской добычи золота (может снизиться вдвое). Сокращение количества добываемых алмазов прогнозируется уже с 2025 г., и без новых месторождений добыча алмазов в 2040-х годах может оказаться вчетверо меньшей, чем сегодня.

Ключевые слова: Россия, прогноз, обеспеченность, запасы, добыча, минеральное сырье, месторождения, эксплуатируемые, осваиваемые, золото, алмазы, медь, никель, свинец, цинк, вольфрам, олово, молибден, уран, хром.

A forecast of nonfuel mineral production in Russia is considered, based on the integration of the expected life of specific deposits currently exploited and developed. It is shown that mineral safety is fully ensured for copper, nickel, lead, tungsten and tin, whose reserves are sufficient for their extraction, at least at the current level, for 40–50 years and there are real prospects for its significant growth. The sufficiency of other minerals is much lower: for molybdenum and chromium, it is limited to about 30 years, and the extraction of zinc and uranium in Russia may significantly decrease in 20 years. The situation is more difficult with the most liquid solid minerals, like gold and diamonds. The commissioning of mining enterprises at the developed gold deposits can ensure a rapid growth in the production of the precious metal in the coming years. However, at the beginning of the next decade, the resource base depletion of the Olimpiada field and a number of other exploited deposits is predicted. The projects currently implemented for the development of new fields do not compensate for the lost capacity. This may account for a long-term (until the beginning of the 2050s) decline in the Russian gold production, which may be halved against the current level by the end of this period. Such a scenario can only be avoided with the intensification of geological exploration in the coming years. The earlier decrease in the number of diamonds mined in Russia, associated with the depletion of reserves of exploited pipes, is predicted (since 2025). Unless new deposits are discovered and developed, the domestic production of precious stones will steadily decline and, in the 2040s, may be reduced fourfold.

Keywords: Russia, forecast, sufficiency, reserves, production, mineral raw materials, deposits, exploited, developed, gold, diamonds, copper, nickel, lead, zinc, tungsten, tin, molybdenum, uranium, chromium.

Для цитирования: Егорова И. В., Михайлов Б. К. Объектный метод анализа обеспеченности запасами полезных ископаемых на примере России. Руды и металлы. 2021. № 4. С. 6–21. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10025.

For citation: Egorova I. V., Mikhailov B. K. Objective method for analysis of mineral resources supply on the example of Russia. Ores and metals, 2021, № 4, pp. 6–21. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10025.

Человечество не может представить свою жизнь без потребления разнообразных полезных ископаемых. Но ресурсы минерального сырья в недрах конечны и в большинстве случаев невозобновляемы. Осознание этого факта вызывает желание оценить, на сколько же хватит имеющихся сегодня ресурсов того или иного вида сырья. Эта оценка имеет и практическую ценность, поскольку может служить основой для разработки стратегии поведения на ближайшую и более отдалённую перспективу. Это касается как отдельных недропользователей, так и органов, в сферу ответственности которых входит регулирование отрасли. Регулирующие организации интересуют, разумеется, *уровень обеспеченности запасами* в целом по стране. На этом показателе, наряду с другими параметрами, базируется разработка государственных программ воспроизводства отечественной минерально-сырьевой базы.

Наиболее очевидным способом подсчёта этого параметра для России в целом является деление запасов данного сырья (обычно категорий  $A + B + C_1 + C_2$ ), фигурирующих в Государственном балансе запасов полезных ископаемых (ГБЗ), на его суммарную добычу за конкретный год. В результате получается некий усреднённый период времени, в течение которого, как предполагается, добыча данного вида сырья обеспечена запасами, разведанными в стране. Такие оценки встречаются как в публикациях отдельных исследователей, так и в официальных документах [5, 7]. Однако в этом случае оценка обеспеченности оказывается, как правило, завышенной, поскольку в подсчёт включаются не только разрабатываемые и осваиваемые месторождения, но и объекты, находящиеся в государственном резерве, иначе говоря, неэксплуатируемые.

Предпринимались попытки решить эту проблему, используя для подсчёта только запасы, находящиеся в распределённом фонде. Для отдельных видов минерального сырья, например золота, лицензированные месторождения которого осваиваются достаточно быстро, такой способ работает. Но в целом ряде случаев пользоваться им нельзя, например, если в распределённом фонде недр находятся

запасы компонента, являющегося попутным, который добывается в составе руды вместе с другими полезными ископаемыми, но не извлекается в товарный продукт. Яркий пример – оценка обеспеченности запасами титана. Почти пятая их часть учтена в апатит-нефелиновых рудах Хибинской группы, в которых он концентрируется в сфене. Девять месторождений Хибинской группы находятся в распределённом фонде недр и разрабатываются на фосфор. Количество сфенового концентрата, производимого при этом, крайне мало, он применяется для производства сварочных электродов, извлечение титана не ведётся. Тем не менее добыча титана и запасы этих месторождений учитываются при оценке обеспеченности страны титановым сырьём, что совершенно искажает реальную картину – предполагается, что его хватит на сотни лет, в то время как потребности страны в титане удовлетворяются по большей части импортным сырьём.

С нашей точки зрения, это искажение не случайно, оно имеет принципиальный характер и связано с тем, что понятие «обеспеченность запасами» имеет смысл только применительно к конкретному разрабатываемому или подготавливаемому к эксплуатации месторождению. Любая добывающая компания, ведущая или планирующая разработку какого-либо объекта, оценивает его эксплуатационные запасы и ожидаемый период жизни своего предприятия. Безусловно, доразведка флангов и глубоких горизонтов и/или обнаружение поблизости новых рудных тел промышленного качества может увеличить срок, в течение которого рудник будет продолжать деятельность, но конкретные планы компании базируются на имеющейся в данный момент сырьевой базе, исходя из которой и оценивается обеспеченность горнодобывающего предприятия запасами.

Величина этого параметра для страны в целом может быть получена путём интеграции сроков жизни каждого действующего или проектируемого предприятия. Результат интеграции обычно заметно отличается от данных, полученных способами, описанными выше.

Инструментарий, позволяющий проводить интегрированную оценку обеспеченности запасами минерального сырья, разработан в компании ООО «Минерал-Инфо» в ходе исследования обеспеченности мировой экономики ресурсами важнейших видов твёрдых полезных ископаемых с учётом вновь осваиваемых месторождений, предпринятого в рамках контракта, заключенного в 2010 г. с Федеральным агентством по недропользованию. Результат этих исследований – изданная в 2019 г. коллективом авторов под редакцией И. В. Егоровой монография «Добычные возможности недр» [4], а также ряд публикаций.

Для выполнения исследования специалистами отдела информационных технологий ООО «Минерал-Инфо» создана информационная система «Минерально-сырьевой комплекс мира» (БД ИС МСК мира), оснащённая инструментами автоматического анализа массивов структурированных данных. Технологическая база исследования – технология OnLine Analytical Processing (куб OLAP) на платформе Microsoft Analysis Services. Этот инструмент, как было выяснено в ходе исследования, вполне пригоден для оценки обеспеченности ресурсами и запасами минерального сырья мира в целом и отдельных стран, в том числе и России.

Собственно механизм подсчёта заключается в следующем. Для эксплуатируемых объектов используются запасы\* данного полезного ископаемого на начало определённого года и его добыча за тот же год, она рассматривается как базовая. При допущении, что в дальнейшем добыча на месторождении сохранится на том же уровне, запасы полезного компонента в каждом последующем году будут сокращаться на объём добытого плюс потери при добыче. Исходя из этого, для каждого следующего года последовательно рассчитывается объём остаточных запасов месторождения до тех пор,

пока они не будут исчерпаны. Эта процедура позволяет определить срок, в течение которого может продолжаться деятельность каждого добывающего предприятия.

Для осваиваемых объектов может быть доступна проектная документация, в которой недропользователь сам определяет срок начала и завершения эксплуатации. В этом случае для расчёта используются эксплуатационные запасы и показатели горного плана. Если проектная документация недоступна, берутся данные о начальных запасах, находящихся в распределённом фонде недр, проектной мощности по добыче и предполагаемой дате ввода добычного предприятия в строй; расчёт ведётся с этой даты. Возможности информационной системы позволяют учитывать в расчётах период выхода добывающего предприятия на проектную мощность, планируемое расширение или сокращение добычи на конкретных объектах, наличие нескольких очередей освоения, периоды консервации предприятия.

Полученные данные о добыче и остаточных запасах в каждом году вводятся в автоматически генерируемую таблицу формата Excel, которая затем программными средствами может быть трансформирована в диаграмму. Наиболее представительной, по нашему мнению, является диаграмма типа «поле с накоплением», где по оси X откладываются годы, а по оси Y – базовая (для эксплуатируемых объектов) или проектная (для осваиваемых) добыча полезного компонента на каждом конкретном месторождении. Полученная диаграмма даёт отчётливое визуальное представление о том, в течение какого периода на каждом месторождении может идти добыча и когда закончатся его запасы, а также как это повлияет на производственные показатели страны в целом. Интегрирование таких данных по всем имеющимся в стране эксплуатируемым и осваиваемым объектам позволяет прогнозировать динамику количества полезного ископаемого, которое может быть извлечено из недр в целом, в том числе на достаточно отдалённую перспективу.

На рис. 1 представлена такая диаграмма, построенная для российских месторождений

\* Для подсчёта в зависимости от целей исследования могут использоваться как запасы категорий  $A + B + C_1$ , так и запасы категорий  $A + B + C_1 + C_2$ . В настоящей работе во всех случаях, когда подсчёт производился по данным ГБЗ, использовались запасы категорий  $A + B + C_1 + C_2$ .

**меди**, отсортированная по убыванию объёма добычи в 2018 г. Для анализа использованы все разрабатываемые объекты и все значимые проекты освоения. Ряд месторождений объединён в группы по их принадлежности к крупнейшим компаниям, ведущим в России добычу меди, – ПАО «ГМК «Норильский никель»» (на диаграмме – Норникель), ОАО «Уральская горно-металлургическая компания» (УГМК) и АО «Русская медная компания» (РМК).

На диаграмме отчётливо видно, что добыча меди на эксплуатируемых сегодня месторождениях может продолжаться на текущем уровне, по крайней мере, до 2056 г. В дальнейшем истощение запасов Быстринского месторождения несколько её снизит, но резкий спад ожидается не ранее конца 60-х годов, когда может быть исчерпана сырьевая база сульфидных медно-никелевых объектов компании ПАО «ГМК «Норильский никель»».

При этом ввод в строй добывающих предприятий на осваиваемых месторождениях (Томинское, Малмыжское, Удоканское, Песчанка и др.) может обеспечить быстрое увеличение добычи меди в стране в ближайшие 15 лет. В случае успешной реализации этих проектов в запланированные сроки средний темп её роста превысит 5 % в год. Это позволит в середине следующего десятилетия увеличить совокупный показатель количества извлекаемой из недр меди почти в два с половиной раза по сравнению в 2018 г. В дальнейшем по мере истощения запасов эксплуатируемых, а затем и осваиваемых в настоящее время объектов количество добываемого металла начнёт постепенно снижаться, но ниже сегодняшнего уровня оно упадёт только к 2070 г. Это позволяет считать, что обеспеченность потребностей России медью, добываемой из недр, находится на очень высоком уровне. Следует также иметь в виду, что данный прогноз не учитывает возможного наращивания сырьевой базы известных месторождений за счёт доразведки и новых открытий.

Оптимистичной выглядит и картина обеспеченности российской добывающей промышленности **никелем** – ещё одним высоколиквидным видом минерального сырья, разработ-

ка месторождений которого обеспечивает России прочное положение в рейтинге ведущих поставщиков металла на мировой рынок. Главный его производитель компания ПАО «ГМК «Норильский никель»» регулярно проводит аудит своих ресурсов и запасов по международным стандартам. Согласно данным аудита на начало 2018 г. [6], добывающие предприятия её филиала, Кольской ГМК, могут работать с текущей производительностью до 2066 г., а Заполярного филиала – до 2071 г. (рис. 2).

Кроме того, в стране реализуется несколько проектов освоения месторождений с запасами никеля, ввод которых в основном ожидается в 2020–2023 гг. В случае их успеха количество металла, извлекаемого из российских недр, может после 2030 г. вырасти в полтора раза, с текущих 290–300 до 450 тыс. т в год.

Близкая картина вырисовывается при анализе сырьевой обеспеченности **свинца** (рис. 3). Ожидаемое в период 2035–2055 гг. истощение запасов целого ряда месторождений (Верхне-Менкече, Новоширокинское, Кызыл-Таштыгское и Николаевское) не окажет существенного влияния на производственные результаты отрасли, поскольку основной объём металла в России извлекается на Горевском месторождении, сырьевая база которого, как предполагается, будет исчерпана лишь к 2060 г. В случае успешного завершения четырёх реализуемых в стране проектов освоения (Озёрное, Павловское, Прогноз и Таловское месторождения) уже в ближайшие годы количество добываемого в стране свинца может вырасти более чем в полтора раза. При этом запасов самого крупного из осваиваемых месторождений, Озёрного, хватит всего на 15 лет, по прошествии которых добыча вернётся к уровню, сопоставимому с сегодняшним. Основные проблемы могут возникнуть после 2060 г., когда прекратит функционировать рудник на Горевском месторождении, самый крупный в стране и один из самых мощных в мире. Чем его можно будет заменить, пока неясно.

Далеко не столь благоприятны перспективы добычи **цинка** в России. Если судить по обеспеченности его добычи запасами крупнейших разрабатываемых месторождений, на

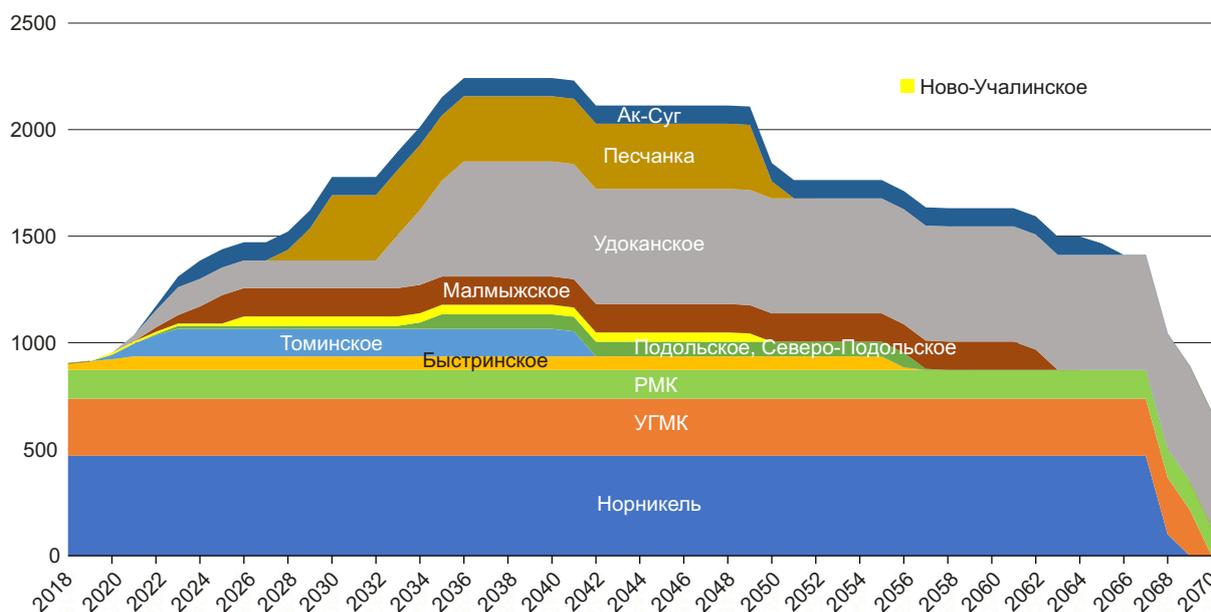


Рис. 1. Прогноз добычи меди на основных эксплуатируемых и осваиваемых месторождениях России на период 2018–2070 гг., тыс. т

Fig. 1. Forecasted copper production at the main Russian exploited and developed deposits in the period 2018–2070, kt

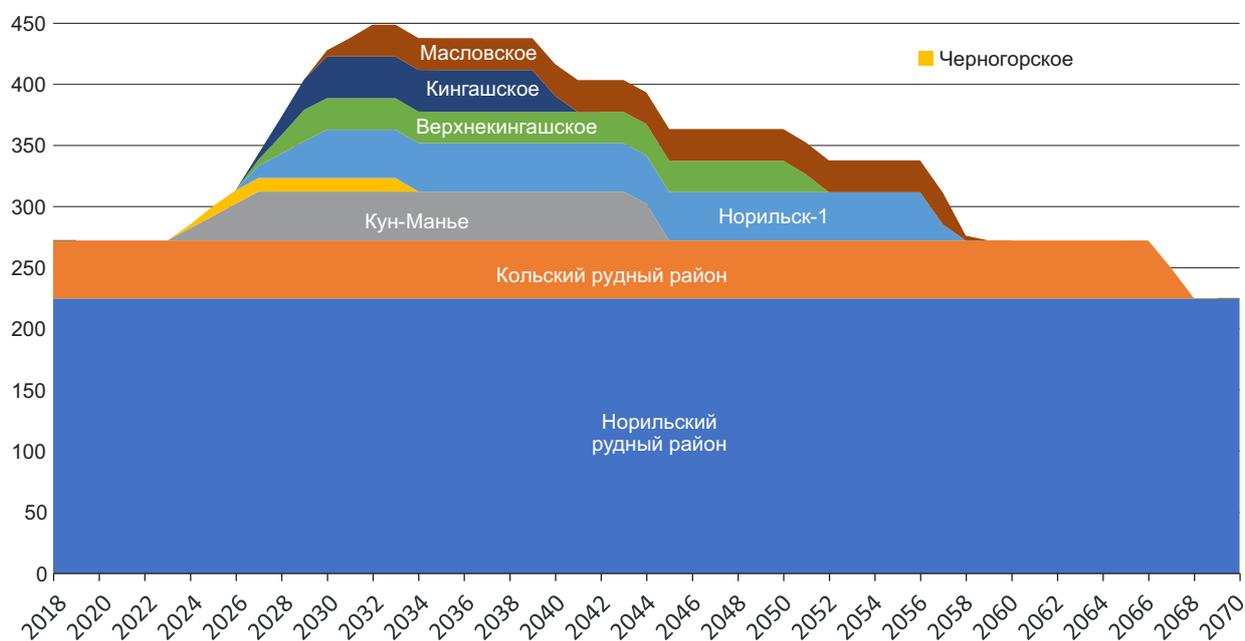
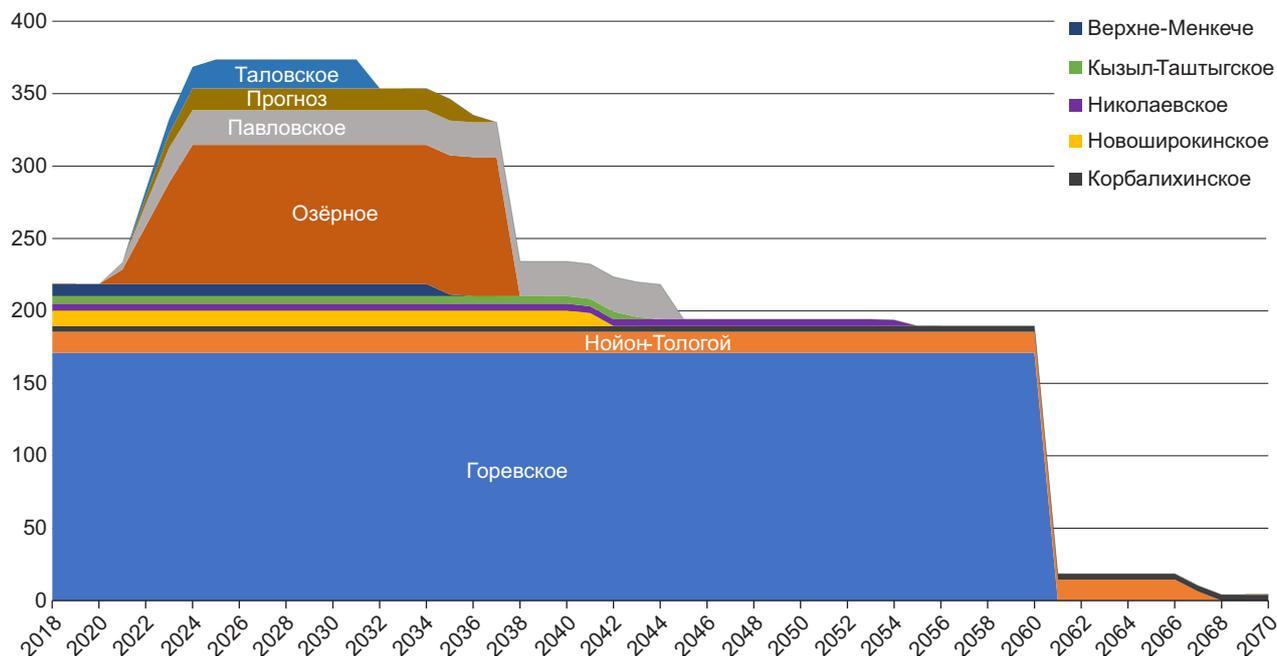


Рис. 2. Прогноз добычи никеля на основных эксплуатируемых и осваиваемых месторождениях России на базе ресурсов, подсчитанных по стандарту JORC по состоянию на начало 2018 г., тыс. т [6]

Fig. 2. Forecasted nickel production at the main Russian exploited and developed nickel deposits, based on JORC-compliant resource estimate as of the beginning of 2018, kt [6]



**Рис. 3. Прогноз добычи свинца на основных эксплуатируемых и осваиваемых месторождениях России на период 2018–2070 гг., тыс. т [2, 3]**

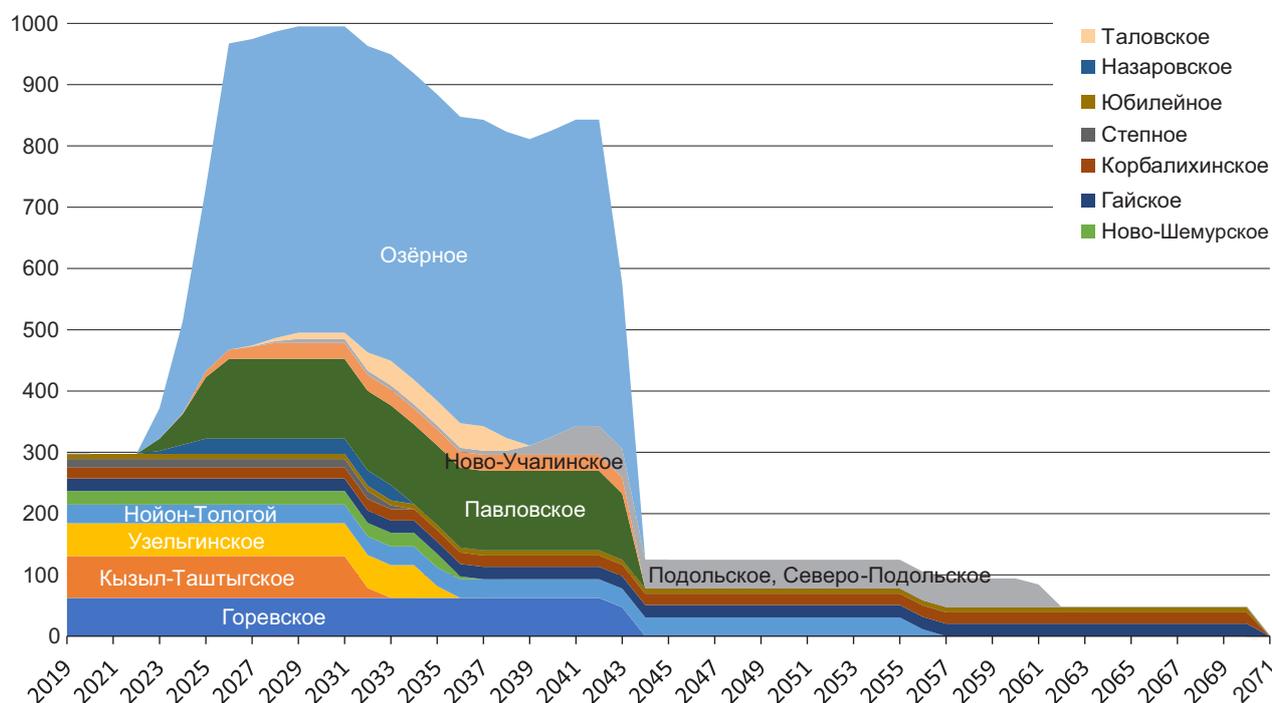
**Fig. 3. Forecasted lead production at the main Russian exploited and developed deposits in the period 2018–2070, kt [2, 3]**

текущем уровне она может продолжаться ещё в течение десяти лет. Позже истощение сырьевой базы Кызыл-Таштыгского, затем Узельгинского месторождений может снизить количество извлекаемого из недр металла более чем на 100 тыс. т в год (рис. 4). Эти потери могут быть с избытком компенсированы вводом в эксплуатацию серии новых объектов, которые уже к середине текущего десятилетия способны дать до 700 тыс. т цинка дополнительно к 400–450 тыс. т металла, добываемым в России сегодня; основной вклад в этот рост внесут Озёрное и Павловское месторождения. Однако сырьевая продукция, которую предполагается производить из их руд, предназначена на экспорт, и последний может вырасти в этом случае втрое.

Внутренний спрос на цинковые концентраты в настоящее время снизился с закрытием в 2018 г. одного из двух российских предприятий, выпускающих металлический цинк, – завода «Электроцинк» компании ОАО «УГМК»

в г. Владикавказ. Компенсировать потери предполагается за счёт ввода в эксплуатацию в 2022 г. строящегося компанией ООО «Полимет Инжиниринг» цинкового завода производительностью 120 тыс. т металлического цинка в год в г. Верхний Уфалей (Челябинская область). Сырьё, вероятно, будет поступать на новое предприятие с осваиваемых месторождений. Действующий Челябинский цинковый завод, принадлежащий ОАО «УГМК», отчасти снабжается импортным сырьём, закупаемым в основном в Казахстане, так как это выгоднее, чем поставлять его с дальневосточных рудников.

Высокий уровень добычи цинка можно будет поддерживать в течение примерно 20 лет, после чего прогнозируется практически одновременное исчерпание запасов осваиваемых в настоящее время Павловского и Озёрного месторождений и разрабатываемого Горевского. Это может означать резкий спад количества добываемого в стране металла по сравнению



**Рис. 4. Прогноз добычи цинка на основных эксплуатируемых и осваиваемых месторождениях России на период 2019–2071 гг., тыс. т [2, 3]**

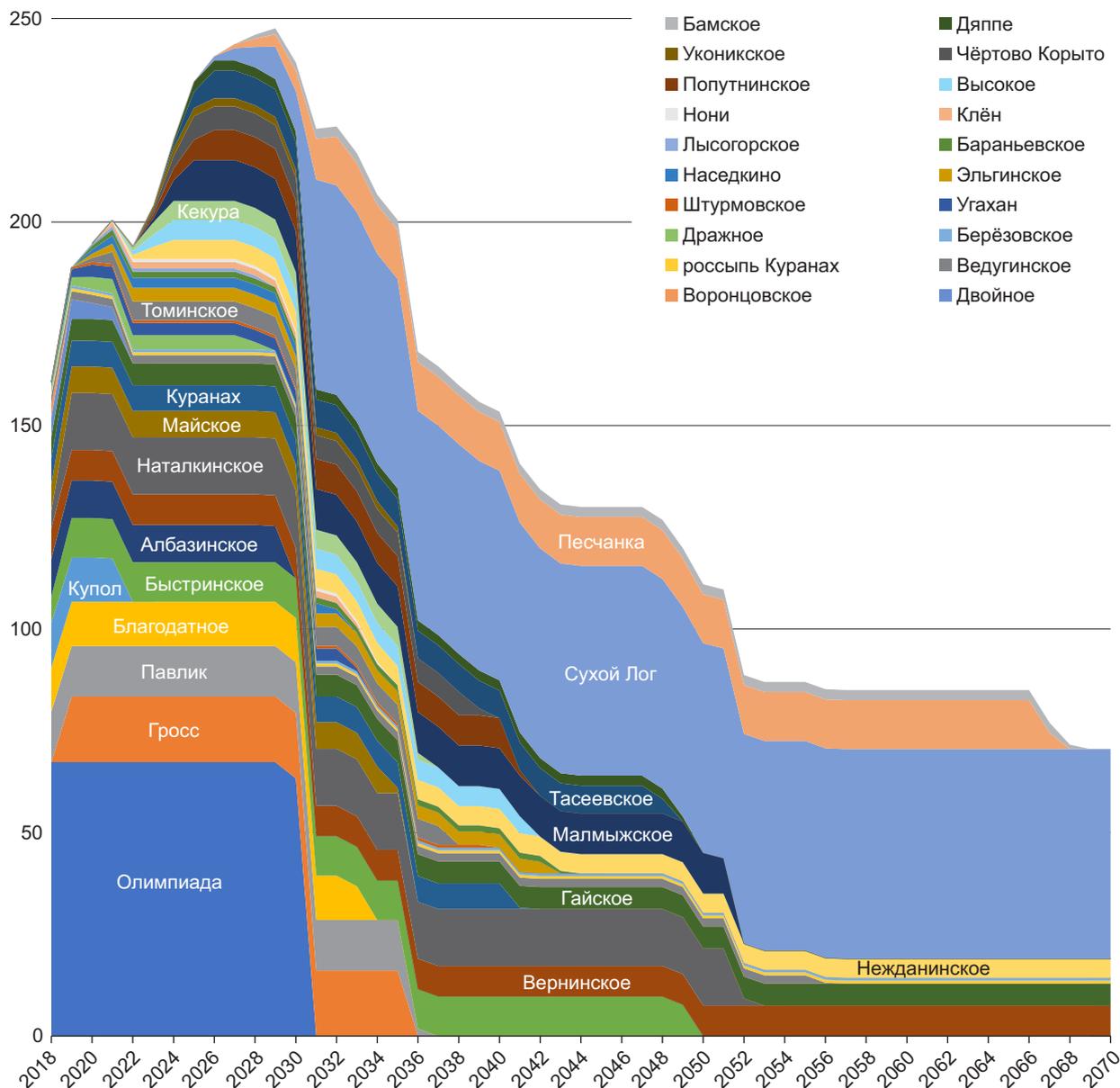
**Fig. 4. Forecasted zinc production at the main Russian exploited and developed deposits in the period 2019–2071, kt [2, 3]**

не только с пиковыми значениями второй половины 2020-х и 2030-х годов, но и с текущим уровнем. Чтобы избежать реализации такого сценария, уже сегодня требуются активные геологоразведочные работы, особенно с учётом того, что многие давно эксплуатируемые мелкие и средние по масштабам месторождения Урала также близки к исчерпанию. Однако вероятность открытия ещё одного объекта, сравнимого по масштабу с Озёрным или Горевским месторождениями, невелика, а ввод в эксплуатацию Холоднинского нанесёт невосполнимый вред уникальному природному объекту – озеру Байкал.

Сырьевая база **золота**, столь успешно развиваемая в последнее время, в ближайшие годы может обеспечить быстрый рост добычи драгоценного металла в среднем ежегодно почти на 5 %. Исчерпание запасов месторождений Воронцовское в 2019 г., Купол и Двойное в 2021 г. будет компенсировано выходом на про-

ектную мощность добычи на Наталкинском и Гросс и вводом в эксплуатацию месторождений Нежданинское, Эльгинское, Наседкино, Бараньевское и Клён (рис. 5). Позднее планируется запуск крупных предприятий на месторождениях Кекура, Высокое, Тасеевское, Чёртово Корыто и др. Значительную роль может сыграть ввод в эксплуатацию медно-порфировых Томинского, Малмыжского месторождений, чуть позднее – Песчанки, а в 2026 г. планируется начало добычи золота на уникальном по масштабу золоторудном объекте Сухой Лог. Прирост количества добываемого металла только на перечисленных объектах может составить 100 т, а в целом по стране добыча золота может достичь 500 т.

Но к началу 30-х годов, когда ожидается прекращение эксплуатации Олимпиадинского месторождения, важнейшего на сегодняшний день разрабатываемого объекта, тенденция может измениться. Полностью компенсировать



**Рис. 5. Прогноз добычи золота на основных эксплуатируемых и осваиваемых месторождениях России на период 2018–2070 гг., т [2, 3]**

**Fig. 5. Forecasted gold production at the main Russian exploited and developed deposits in the period 2018–2070, kt [2, 3]**

ровать выбывание этого месторождения вводом в строй предприятия на Сухом Лог не удастся, так как добыча на нём сегодня проектируется в меньшем объёме. А естественное истощение других разрабатываемых месторождений может обусловить дальнейшее падение добычи золота. Резкий спад может про-

изойти в 2032–2036 гг., когда прогнозируется завершение отработки Благодатного, Павлик, Гросс и Майского месторождений, и в 2051–2052 гг. в связи с исчерпанием запасов месторождений Быстринское, Малмыжское и Наталка. Из крупных объектов к этому времени в эксплуатации могут остаться только месторож-

дения Вернинское, Нежданинское, Гайское, Песчанка и Сухой Лог, в сумме они обеспечат лишь около 80 т драгоценного металла в год.

Реализация такого сценария может существенно ослабить позицию России как ведущего продуцента золота. Безусловно, полностью он реализован не будет, поскольку геологоразведочные работы на золото как на действующих объектах, так и на новых территориях ведутся в России активно и результативно. Тем не менее перспективы определённого спада добычи золота после завершения эксплуатации Олимпиадинского месторождения вполне реальны.

Не так уж хорошо обстоит в России дело и с обеспеченностью запасами урана (рис. 6). Сырьевая база эксплуатируемых ныне Далматовского и недавно запущенного Источного месторождений может быть исчерпана уже в 2022–2024 гг. Ввод в строй добывающего предприятия на крупнейшем в Стрельцовском рудном районе Аргунском месторождении позволит сохранить добычу урановых руд практически на текущем уровне вплоть до 2032 г. Но затем последовательное завершение эксплуатации объектов, находящихся сегодня в разработке, – Хагдинского в 2032 г., Мало-Тулукуевского в 2036 г., Стрельцовского в 2038 г. и

Антей в 2044 г. – может стать причиной более чем двукратного спада производства. Добыча на Жерловом месторождении, начало которой планируется в 2033 г., компенсирует лишь небольшую часть потерь, его эксплуатация продлится только до 2052 г., а к 2060 г. будут исчерпаны и запасы Аргунского месторождения.

Отечественные месторождения хромитов, находящиеся сегодня в разработке, обеспечивают лишь около трети необходимого для удовлетворения потребностей ферросплавного производства сырья. В ближайшие годы зависимость отрасли от импорта сырья может быть снижена, если в запланированные сроки состоится ввод в эксплуатацию Южно-Сарановского месторождения, благодаря чему совокупная добыча хромовых руд в стране может достичь 750 тыс. т в год (рис. 7), или более половины необходимого. Но такое положение сохранится только до 2028 г. К этому времени согласно прогнозу будет исчерпана сырьевая база Центрального месторождения, обеспечивающего сегодня около половины добываемого сырья, что обусловит резкий спад производства, а к 2033 г. может быть завершена разработка и Южно-Сарановского месторождения.

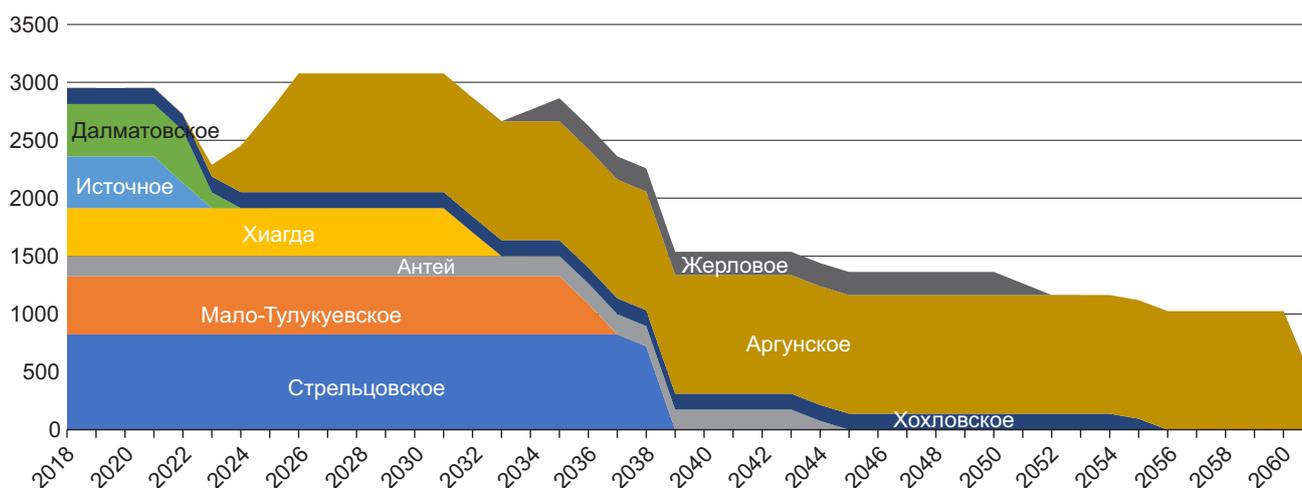


Рис. 6. Прогноз добычи урана на основных эксплуатируемых и осваиваемых месторождениях России на период 2018–2060 гг., т [2, 3]

Fig. 6. Forecasted uranium production at the main Russian exploited and developed deposits in the period 2018–2060, kt [2, 3]

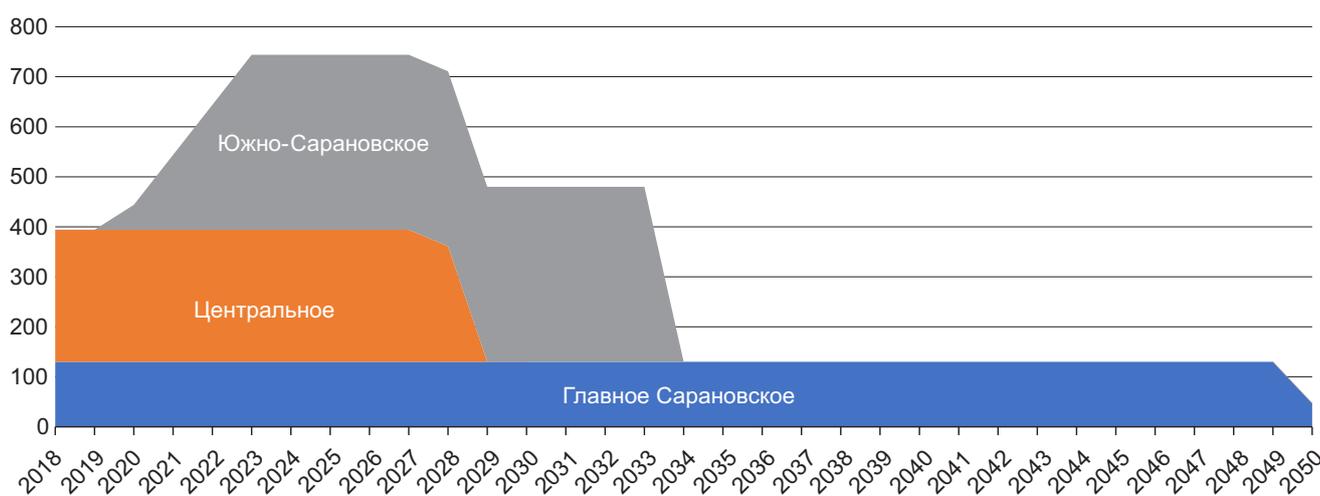
В значительной степени решить проблему мог бы ввод в эксплуатацию Аганозёрского месторождения, но промышленная технология получения кондиционных концентратов из его бедных руд отсутствует. Из такого сырья возможно получение чардж-хрома (сплав с пониженным содержанием хрома), этот продукт успешно производится и используется в Финляндии. Но переход на чардж-хром потребует строительства нового производства с другими технологическими схемами. В настоящее время проект практически законсервирован.

Добыча **олова** из российских недр в период 2014–2018 гг. активно росла, увеличившись за пять лет более чем в семь раз, так что начиная с 2017 г. небольшая часть произведённого концентрата стала экспортироваться. На этом уровне отрасль может продолжать работать в течение 40 лет (рис. 8). При этом отечественное сырьё сегодня удовлетворяет лишь около 40 % потребности в металле, хотя в России она очень мала – всего около 2–2,5 тыс. т в год. Ситуация может измениться с началом эксплуатации россыпи ручья Тирехтях, что вдвое увеличит российское производство оловянных концентратов. Его запасов хватит для работы горнодобывающего предприятия до 2045 г.

Ведутся работы по освоению ещё двух объектов, сложенных богатыми рудами, содержащими более 1 % олова, – Соболиного в Хабаровском крае и входящего в десятку крупнейших в мире Депутатского, однако ни по одному из них сроки ввода в строй ещё не определены.

Следует отметить, что в распределённом фонде недр находится в настоящее время лишь менее 30 % запасов олова, числящихся на учёте в Государственном балансе запасов полезных ископаемых. Не лицензированы в том числе крупные объекты, такие как Пыркакайский рудный узел в Чукотском АО, Тигриное и Одинокое в Республике Саха (Якутия) и др. Справедливости ради нужно сказать, что крупнейшие из них сложены небогатыми рудами и/или находятся в неблагоприятных инфраструктурных условиях.

Добыча **вольфрама** в России, напротив, в прошедшее пятилетие падала, уменьшившись за это время почти вдвое. Это обусловлено введением в 2013 г. вывозных таможенных пошлин на руды и концентраты. Тем не менее по результатам анализа видно, что даже при сокращении добычи до уровня 2018 года запасы трёх из четырёх эксплуатируемых в настоящее время месторождений будут исчерпаны в ближайшее десятилетие, а рудник на ведущем



**Рис. 7. Прогноз добычи хромовых руд на основных эксплуатируемых и осваиваемых месторождениях России на период 2018–2050 гг., тыс. т [2, 3]**

**Fig. 7. Forecasted chrome ore production at the main Russian exploited and developed deposits in the period 2018–2050, kt [2, 3]**

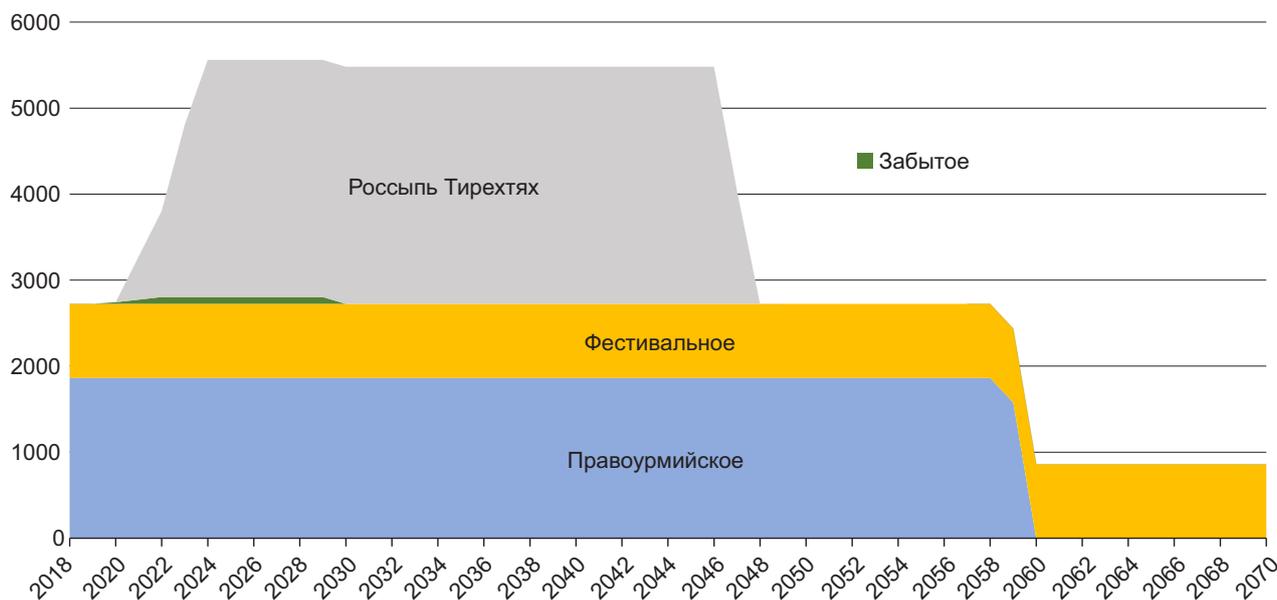


Рис. 8. Прогноз добычи олова на основных эксплуатируемых и осваиваемых месторождениях России на период 2018–2070 гг., тыс. т [2, 3]

Fig. 8. Forecasted tin production at the main Russian exploited and developed deposits in the period 2018–2070, kt [2, 3]

месторождении Восток-2 может прекратить работу уже в 2026 г.

В то же время перспективы наращивания производства вольфрама в стране значительны – на разных стадиях реализации находятся два крупных проекта освоения месторождений Скрытое и Кти-Теберда и проект возобновления эксплуатации Тырнаузского месторождения. Если все эти объекты, а также мелкое Забытое месторождение будут в соответствии с планами введены в строй, добыча вольфрама из недр в 2030 г. может превысить 12 тыс. т  $WO_3$  (рис. 9), что выведет Россию на второе место по выпуску вольфрамовых концентратов в мире после Китая. Однако составить серьёзную конкуренцию лидеру, производство вольфрамовых концентратов которого приближается к 100 тыс. т, и в этом случае не удастся. Внутренние потребности России в вольфраме не столь велики и максимально оцениваются в 7 тыс. т, частично они удовлетворяются за счёт вторичных источников [2, 3]. Это означает, что российским производителям придётся бороться за мировые рынки сбыта своей продукции, а это при безусловном

доминировании Китая может оказаться непростой задачей.

**Молибден** часто присутствует в рудах в качестве попутного компонента. В концентрат в России он извлекается в настоящее время только на Сорском месторождении, запасов которого достаточно для производства на текущем уровне более чем на тридцать лет (рис. 10). После того как из-за низких цен была приостановлена эксплуатация Жирекенского месторождения, внутреннее производство не удовлетворяет внутренний спрос на молибденовую продукцию, который оценивается не менее чем в 10 тыс. т в год; дефицит восполняется за счёт импорта. Возобновление разработки Жирекенского месторождения позволило бы в значительной мере снизить дефицит. В стадии подготовки к разработке в России находятся четыре объекта – Южно-Шамейское, Тырнаузское и крупные медно-порфировые месторождения Ак-Сугское и Песчанка, на которых молибденовый концентрат предполагается выпускать в качестве попутного продукта. Продукция новых предприятий, очевидно, предназначается в основном на экспорт либо

в виде концентрата (Песчанка), либо в виде молибденовых продуктов более высокой степени переработки. Однако мировой рынок молибдена в целом избыточен, поскольку разработка большинства медно-порфировых объектов в мире сопровождается выпуском молибденового концентрата крайне низкой себестоимости и в гораздо большем количестве, чем рынок может поглотить. Это обусловило длительный период крайне низких цен на этот металл [2, 3] и привело к консервации Жирекенского рудника и многих других добывающих предприятий во всём мире. В последние годы ситуация стала постепенно исправляться, но поступление дополнительных количеств молибденового сырья может вновь нарушить хрупкий баланс и привести к новому падению цен, что сделает нерентабельной работу молибдендобывающих предприятий, в том числе и в России.

Необходимо специально подчеркнуть, что результаты анализа обеспеченности существенно зависят от того, каким образом подсчитываются запасы полезного компонента. Во многих рассмотренных выше случаях анализ базируется на информации, содержащейся в Государственном балансе запасов полезных ископаемых. Иначе говоря, обеспеченность ви-

дами сырья, показанная на приведённых выше графиках, представляет собой максимально возможную на сегодняшний день. Однако хорошо известно, что эксплуатационные запасы, рассматриваемые недропользователем в качестве реально извлекаемых, обычно меньше учитываемых ГБЗ, иногда существенно.

Это хорошо видно на примере алмазодобывающей отрасли. Истощение сырьевой базы целой серии крупных эксплуатируемых объектов с завершением добычи алмазов на них ожидается уже в самом ближайшем будущем. Если анализ основывается на данных ГБЗ [2, 3], то позволяет прогнозировать, что в 2026 г. будет завершена эксплуатация Нюрбинской трубки, в 2027 г. – трубки им. Карпинского-1 и россыпи Эбелях, в 2031 г. – Нюрбинской россыпи, в 2033 г. – трубок Юбилейной и им. Гриба, в 2038 г. – Архангельской, в 2043 г. – Верхне-Мунского месторождения, в 2045 г. – трубки Айхал (рис. 11). Возобновление работы подземного рудника на трубке Мир планируется не ранее 2030 г. Из этого следует, что совокупная добыча алмазов в России начнёт снижаться уже с 2025 г., и данная тенденция сохранится вплоть до 2045 г., когда количество извлекаемых из недр алмазов упадёт с текущих 40 млн карат и более до примерно 8 млн карат. Из

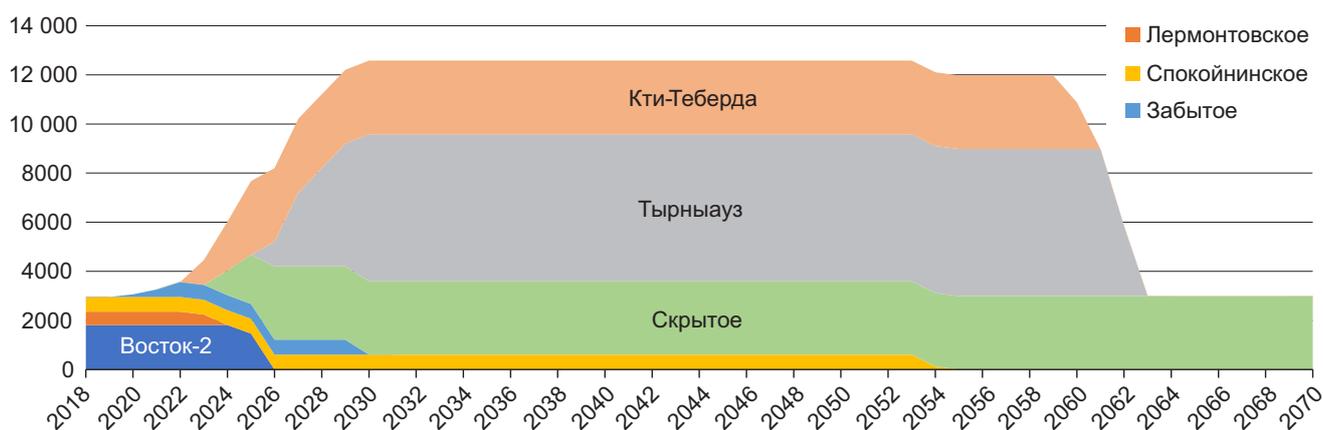
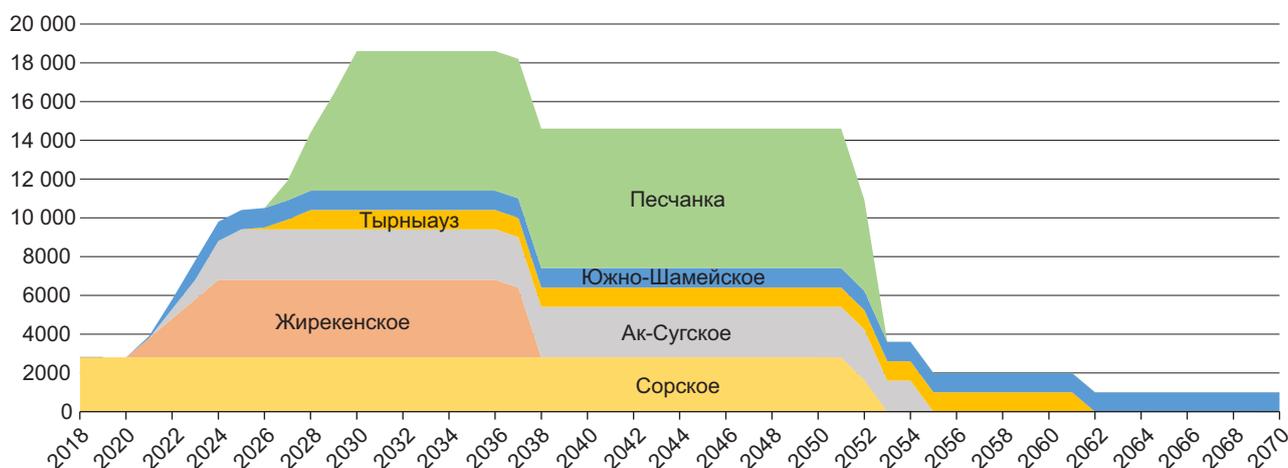


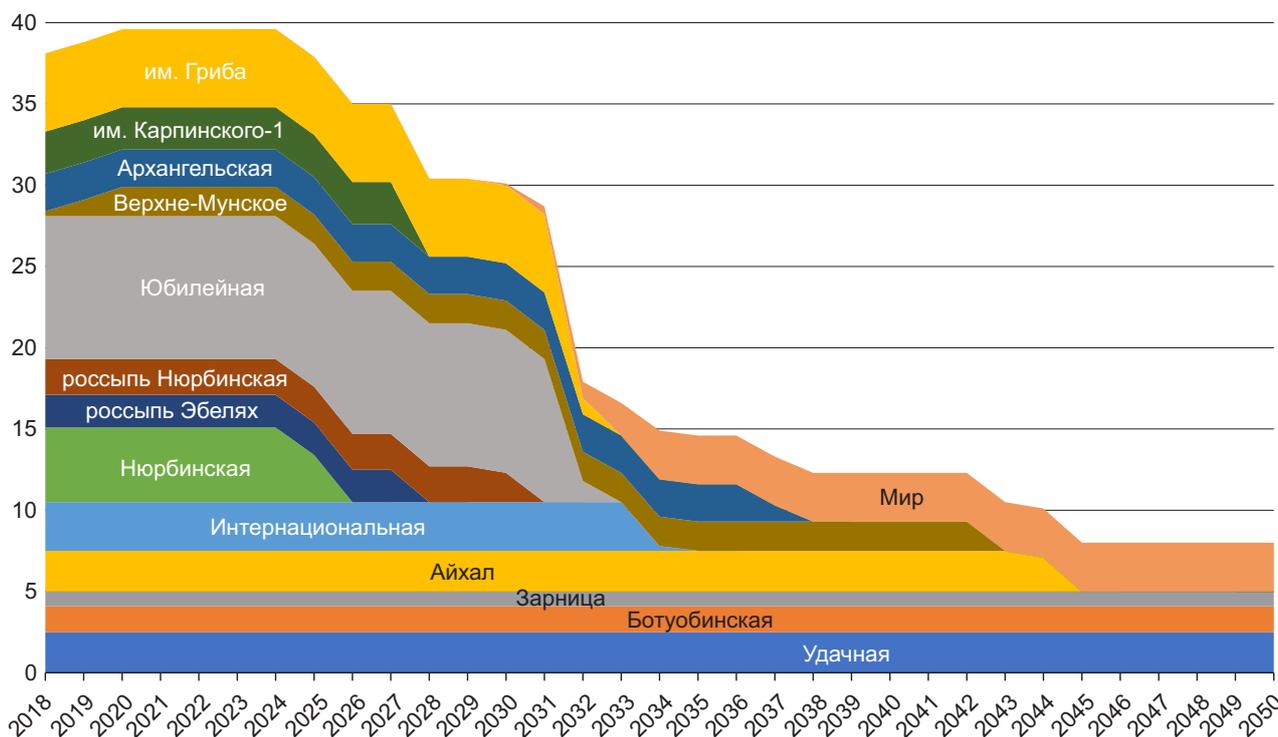
Рис. 9. Прогноз добычи вольфрама на основных эксплуатируемых и осваиваемых месторождениях России на период 2018–2070 гг., тыс. т WO<sub>3</sub> [2, 3]

Fig. 9. Forecasted tungsten production at the main Russian exploited and developed deposits in the period 2018–2070, kt [2, 3]



**Рис. 10. Прогноз добычи молибдена на основных эксплуатируемых и осваиваемых месторождениях России на период 2018–2070 гг., тыс. т [2, 3]**

Fig. 10. Forecasted molybdenum production at the main Russian exploited and developed deposits in the period 2018–2070, kt [2, 3]



**Рис. 11. Прогноз добычи алмазов на эксплуатируемых и осваиваемых месторождениях России на базе запасов, учитываемых Государственным балансом запасов полезных ископаемых на период 2018–2050 гг., млн карат [2, 3]**

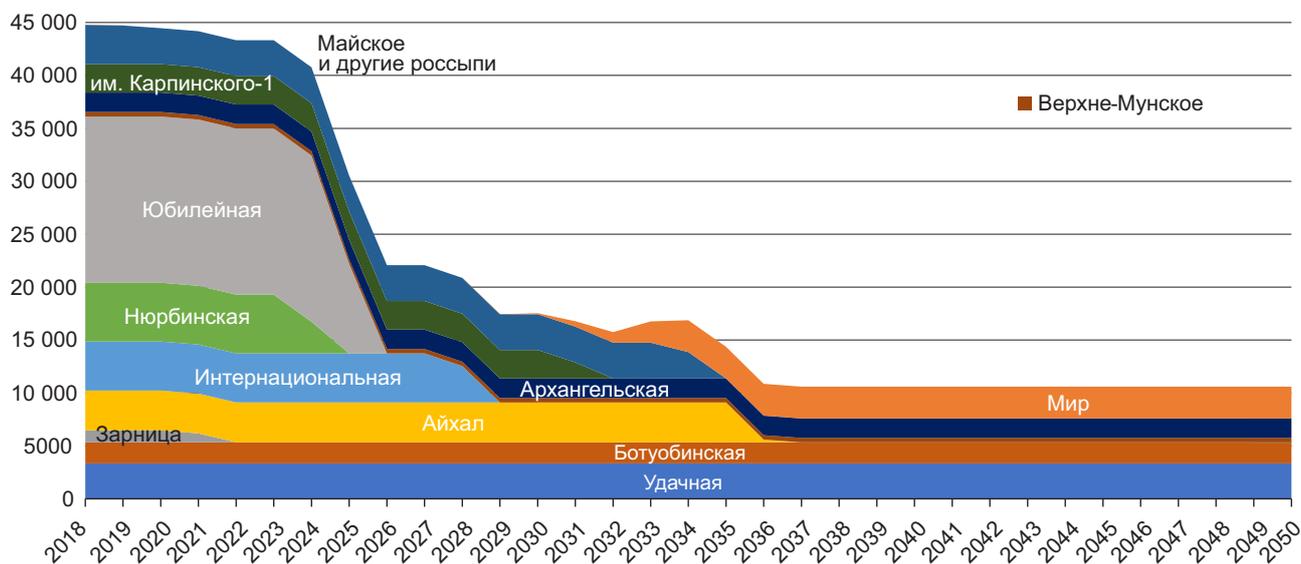
Fig. 11. Forecasted diamond production at the Russian exploited and developed deposits, based on reserves accounted by the State mineral reserve balance in the period 2018–2050, Mct [2, 3]

разрабатываемых сегодня месторождений работы продолжатся только на трубках Удачная, Ботуобинская и Зарница, которые смогут обеспечить лишь около 5 млн карат в год. Это означает, что группа «АЛРОСА», а вместе с ней и Россия могут потерять позицию лидера мировой алмазодобывающей отрасли.

Если же судить по информации группы «АЛРОСА» о её запасах и ресурсах, подсчитанных по стандарту JORC по состоянию на конец 2018 г. [1], то резкое – почти вдвое – снижение производственных показателей компании, связанное с выпадением её добывающих мощностей на трубках Нюрбинская и Юбилейная, произойдёт уже в 2025 г. Процесс продолжится, хотя и не такими высокими темпами, до 2036 г., после чего из ныне эксплуатируемых в разработке останутся только трубки Удачная, Ботуобинская и Архангельская, а также трубка Мир, если добычу на ней удастся возобновить согласно плану. Снижение количества добываемых компанией алмазов до уровня около 10 млн т в год произойдёт уже в 2036 г., т. е. на 10 лет раньше (рис. 12).

Тем не менее, на чём бы ни основывался анализ, он показывает, что в самой недалёкой перспективе количество драгоценных камней, извлекаемых группой «АЛРОСА», снизится примерно вчетверо. Очевидно, что только резкая интенсификация геологоразведочных работ, направленных на наращивание сырьевой базы, может в какой-то степени сгладить негативный эффект её истощения. При этом снижения добычи на определённый период избежать, скорее всего, не удастся, учитывая длительность геологоразведочного процесса от открытия нового скопления полезного ископаемого до ввода месторождения в эксплуатацию.

Таким образом, объектный метод анализа обеспеченности промышленности запасами минерального сырья демонстрирует, что российская сырьевая база большинства твёрдых полезных ископаемых в состоянии обеспечить добычу не менее чем на текущем уровне в течение 20 лет и более, а с учётом реализуемых проектов освоения новых месторождений этот уровень может быть существенно превышен. В то же время добыча некоторых наиболее



**Рис. 12. Прогноз добычи алмазов на эксплуатируемых и осваиваемых месторождениях России на базе ресурсов, подсчитанных по стандарту JORC в 2018 г., на период 2018–2050 гг., млн карат [1]**

**Fig. 12. Forecasted diamond production at the Russian exploited and developed deposits, based on 2018 JORC-compliant resource estimate, in the period 2018–2050, Mct [1]**

ликвидных видов сырья может сократиться уже в недалёком будущем. Если сокращение добычи золота будет, вероятно, не столь резким, как прогнозируется, благодаря тому, что геологоразведочные работы на этот вид сырья финансируются наиболее щедро и поэтому результативны, то кризис в алмазодобывающей отрасли представляется неизбежным – практически вся добыча алмазов ведётся на месторождениях, открытых ещё в годы существования СССР. За последнее 25-летие ни одного крупного объекта открыто не было.

Что касается остальных твёрдых полезных ископаемых, их сырьевая база также в основном базируется на открытиях советского периода. Далеко не все они к настоящему времени освоены, даже месторождения мирового уровня, такие как оловянное Депутатское, которое числится подготавливаемым к разработке, но практически работы на нём не ведутся.

Наибольшей обеспеченностью запасами в недрах, как показывает проведённый анализ, характеризуются сырьевые базы ликвидных полезных ископаемых, оказавшиеся в распоряжении крупных компаний, активно ведущих геологоразведочные работы, причём не только на флангах и периферии своих объектов, но и в других перспективных регионах. Это, к сожалению, свойственно не всем крупным игрокам, поскольку многие из них обеспечены запасами сырья на многие годы, а

средние и мелкие недропользователи не имеют средств для наращивания запасов.

Следует ещё отметить, что для некоторых видов минерального сырья оценивать обеспеченность запасами в России в настоящее время бессмысленно. Это те полезные ископаемые, сырьевая база которых велика (и также практически вся создана в советский период), а добыча по разным причинам настолько мала, что внутренние потребности удовлетворяются в основном за счёт импортных поставок. В различных документах обеспеченность запасами такими видами сырья оценивается в сотни и тысячи лет. К ним, по нашему мнению, относятся марганцевые руды, титан, цирконий и большинство редких и редкоземельных элементов. Отечественный спрос на них чаще невелик, месторождения не отличаются высоким качеством руд и/или находятся в инфраструктурно слабо развитых регионах и требуют для освоения крупных инвестиций. Со временем развитие отечественной экономики, прежде всего высокотехнологичных отраслей, транспортной и энергетической инфраструктуры, улучшение инвестиционного климата, либерализация законодательства, регулирующего недропользование в России, вероятно, могут сделать эти виды сырья более востребованными, а освоение их запасов рентабельным. Тогда и потребуются проанализировать, на какой срок хватит их запасов.

## Список литературы

1. АЛРОСА. Запасы и ресурсы. 1 июля 2018. – URL: [http://www.alrosa.ru/инвесторам и акционерам/запасы-и-ресурсы](http://www.alrosa.ru/инвесторам%20и%20акционерам/запасы-и-ресурсы) (дата обращения 11.11.2021).
2. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2018 году» / Минприроды РФ. – М., 2019.
3. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2019 году» / Минприроды РФ. – М., 2020.
4. Добычные возможности недр / отв. ред. И. В. Егорова. – М. : ФГБУ «ВИМС», 2019. – 544 с.
5. Козловский Е. А. Минерально-сырьевые ресурсы в экономике России и других стран // Промышленные ведомости. – 2014. – № 4. – URL: <https://www.promved.ru/articles/article.phtml?id=2723&nomer=90> (дата обращения 11.11.2021).
6. ЛАО «ГМК «Норильский никель»». Годовой отчёт 2018. – URL: <https://www.nornickel.ru/files/ru/gsm/agm2019/materials/godovoj-otchet-za-2018-god-100619.pdf> (дата обращения 27.10.2021).
7. Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года, утверждённая Правительством РФ 22 декабря 2018 г. (распоряжение № 2914-р).

## References

1. ALROSA. Zapasy i resursy. 1 iyulya 2018 [ALROSA. Reserves and resources. July 1, 2018], available at: <http://www.alrosa.ru/инвесторам и акционерам/запасы-и-ресурсы> (Accessed: 11.11.2021).
2. Gosudarstvennyi doklad «O sostoyanii i ispol'zovaniy mineral'no-syr'evykh resursov Rossiiskoi Federatsii v 2018 godu» [State Report «On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2018»], Moscow, 2019.
3. Gosudarstvennyi doklad «O sostoyanii i ispol'zovaniy mineral'no-syr'evykh resursov Rossiiskoi Federatsii v 2019 godu» [State Report «On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2019»], Moscow, 2020.
4. Dobychnye vozmozhnosti neдр [Mining opportunities of the subsoil], Moscow, VIMS Publ., 2019, 544 p.
5. Kozlovskii E. A. Mineral'no-syr'evye resursy v ekonomike Rossii i drugikh stran [Mineral resources in the economy of Russia and other countries], Promyshlennyye vedomosti [Industrial statements], 2014, No 4. URL: <https://www.promved.ru/articles/article.phtml?id=2723&nomer=90> (Accessed: 11.11.2021).
6. PAO «GMK “Noril'skii nikel”». Godovoi otchet 2018 [PJSC MMC Norilsk Nickel. Annual Report 2018], available at: <https://www.nornickel.ru/files/ru/gsm/agm2019/materials/godovoj-otchet-za-2018-god-100619.pdf> (Accessed: 27.10.2021).
7. Strategiya razvitiya mineral'no-syr'evoi bazy Rossiiskoi Federatsii do 2035 goda, utverzhennaya Pravitel'stvom RF 22 dekabrya 2018 g. (rasporyazhenie № 2914-r) [The Strategy for the development of the mineral resource base of the Russian Federation until 2035, approved by the Government of the Russian Federation on December 22, 2018 (Order No. 2914-r)].

## Авторы

### Егорова Ирина Валентиновна

доцент кафедры геологии полезных ископаемых  
ФГБОУ ВО «Российский государственный  
геологоразведочный университет  
имени Серго Орджоникидзе», г. Москва  
[irinaegorova31@gmail.com](mailto:irinaegorova31@gmail.com)

### Михайлов Борис Константинович

кандидат экономических наук  
до 21.05.2020 г. заместитель генерального директора  
АО «Росгеология», руководитель блока геологии  
твёрдых полезных ископаемых

## Authors

### Irina V. Egorova

Associate Professor of mineral geology  
S. Ordzhonikidze Russian State  
Geological Prospecting University,  
Moscow  
[irinaegorova31@gmail.com](mailto:irinaegorova31@gmail.com)

### Boris K. Mikhailov

PhD  
Deputy General Director of JSC Rosgeology,  
Head of Nonfuel Mineral Geology Department  
(until May 21, 2020)

## Геология и колчеданно-полиметаллическое оруденение прогнозируемого Лимонитового месторождения Рассохинского рудного узла (Енисейский кряж)

### Geology and pyrite-polymetallic mineralization of the forecasted Limonite deposit, Rassokhinsky ore cluster (Yenisei ridge)

Сердюк С. С., Макаров В. А., Кириленко В. А., Макаров И. В., Муромцев Е. А., Шведов Г. И.

Serdyuk S. S., Makarov V. A., Kirilenko V. A., Makarov I. V., Muromtsev E. A., Shvedov G. I.

Развитие и освоение крупнейшего в России Гореvского месторождения свинцово-цинковых руд (Гореvский ГОК, Новоангарский ОК) в значительной мере будет определяться перспективными объектами Ангарского полиметаллического рудного района, в частности месторождениями Рассохинского рудного узла. В его пределах по данным анализа геолого-геофизической информации предшествующих и современных работ прогнозируется наличие крупного Лимонитового месторождения колчеданно-полиметаллических руд. Основной литолого-стратиграфический критерий локализации руд определяется их приуроченностью к пачке высокоуглеродистых чёрных кварц-серицитовых сланцев верхней подсвиты потоскуйской свиты верхнего рифея. В кровле этой пачки локализуются слоистые и массивные колчеданно-полиметаллические руды стволовой мощностью 70–140 м. Содержание свинца и цинка по данным рентгенофлуоресцентного анализа по керну составляет от долей процента до первых процентов, по методу ICP-AES Pb – 0,1–3,7 %, Zn – 0,1–6,4 %, отношение Pb : Zn 1 : (1–10).

Ключевые слова: прогнозируемое Лимонитовое месторождение колчеданно-полиметаллических руд, геологическое строение, критерии локализации, вещественный состав руд, Рассохинский рудный узел, Енисейский кряж.

The development of Russia's largest Gorevskoye lead-zinc deposit (Gorevsky GOK, Novoangarsky OK) will depend on promising deposits of the Angara polymetallic ore region, in particular, those of the Rassokhinsky ore cluster. Based on the analysis of geological and geophysical information of previous and current studies, a major Limonite pyrite-polymetallic (massive sulfide) deposit is forecasted within it. The main lithological and stratigraphic criterion for the localization of ores is determined by their confinement to high-carbon black quartz-sericite schists of the upper subformation of the Potoskuy suite of the Upper Riphean. In the top of this pack, layered and massive pyrite-polymetallic ores, 70–140 m thick, are localized. Based on PPA data, lead and zinc content in core varies from fractions of a percent to several percent, based on the ICP-AES method: 0,1–3,7 % Pb, 0,1–6,4 % Zn, Pb : Zn ratio is 1 : (1–10).

Keywords: forecasted Limonite pyrite-polymetallic deposit, geological structure, localization criteria, ore composition, Rassokhinsky ore cluster, Yenisei ridge.

Для цитирования: Сердюк С. С., Макаров В. А., Кириленко В. А., Макаров И. В., Муромцев Е. А., Шведов Г. И. Геология и колчеданно-полиметаллическое оруденение прогнозируемого Лимонитового месторождения Рассохинского рудного узла (Енисейский кряж). Руды и металлы. 2021. № 4. С. 22–42. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10026.

For citation: Serdyuk S. S., Makarov V. A., Kirilenko V. A., Makarov I. V., Muromtsev E. A., Shvedov G. I. Geology and pyrite-polymetallic mineralization of the forecasted Limonite deposit, Rassokhinsky ore cluster (Yenisei ridge). Ores and metals, 2021, № 4, pp. 22–42. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10026.



В результате проведения в 1960–1990 гг. многолетних планомерных геологических и геофизических съёмок, поисковых и разведочных работ на Енисейском кряже было выявлено и в разной степени изучено свинцово-цинковое оруденение Ангарского рудного района. Результаты этих работ нашли отражение в материалах ГГС-200 первого поколения. В это же время начались геологические и геофизические съёмки, геологическое доизучение (ГДП) масштаба 1 : 50 000 на перспективных площадях, одновременно на них проводились поисковые и разведочные работы, которые продолжались до конца 1990-х годов (Л. Г. Прожогин, 1960; К. В. Боголепов, 1961; М. Л. Шерман, 1964; Л. Г. Саванович, 1970; А. Е. Березий, 1973; С. В. Горбунов, 1973; А. П. Четвергов, В. А. Одегов, 1965; Г. П. Валента, 1965; М. М. Лапшин, 1990; А. Ф. Целыковский, 2000). Результаты данных работ позволили создать современную геологическую основу, провести металлогеническое районирование и выработать эффективный комплекс поисковых работ и геолого-геофизических признаков локализации разных типов свинцово-цинковых руд.

Ангарский свинцово-цинковый рудный район характеризует развитие трёх основных рудных формаций стратиформного типа, выявленных и изученных в процессе многолетних геолого-съёмочных, поисковых, разведочных и научно-исследовательских работ [1]. Это свинцово-цинковая формация в кремнисто-карбонатных породах – горевский геолого-промышленный тип (Горевское месторождение), свинцово-цинковая в карбонатных породах – миргалимсайский тип (Морянихинская группа проявлений), колчеданно-полиметаллическая в углеродистых породах (Рассохинская группа проявлений).

*Свинцово-цинковая формация в кремнисто-карбонатных породах* проявлена в Горевском, Долгинском и Блохинском рудных узлах. Наиболее изученный и крупный объект – Горевский рудный узел (площадь 120 км<sup>2</sup>). В его пределах, кроме Горевского месторождения, установлены группа проявлений участка Картичный и проявление Рудиковское. Запасы Горевского месторождения на 01.01.2000 г. со-

ставляют: Pb – 7950 тыс. т; Zn – 1950 тыс. т. Проявление Картичное, как и Горевское месторождение, приурочено к ядру Горевской синклинали. Рудовмещающая толща, вскрытая буровыми скважинами, представлена доломитовыми известняками, доломитами, кремнистыми доломитами верхнегоревской подсвиты, смятыми в мелкие складки. Руды проявления по минеральному составу и типу аналогичны рудам Горевского месторождения. Прогнозные ресурсы проявления оцениваются (тыс. т): по кат. P<sub>1</sub> Pb – 200, Zn – 100; по кат. P<sub>2</sub> – 550 и 800 соответственно. Рудиковская группа проявлений изучена штольной и буровыми скважинами. Оруденение представлено рудными телами с галенит-сфалеритовой минерализацией (мощность 0,2–0,7 м), локализованными в известняках, магнетитсодержащих известняках и известково-глинистых сланцах нижнегоревской подсвиты. Рудовмещающие породы смяты в синклиналиную складку. Содержание Pb в рудах изменяется от 1 до 2–5 %, Zn – 0,1–1,0 %. Прогнозные ресурсы проявления по кат. P<sub>2</sub> оцениваются (тыс. т): Pb – 160, Zn – 60.

*Свинцово-цинковая формация в карбонатных (рифогенных) породах* развита в Меркурихо-Морянихинском и Петрищевском предполагаемых рудных узлах. Меркурихо-Морянихинский рудный узел включает Меркурихинское и Морянихинское рудные поля.

В Меркурихинском рудном поле наиболее изучены Меркурихинское и Анатольевское проявления. Первое изучено горными и буровыми работами. Рудовмещающие образования представлены доломитами, водорослевыми доломитами с оползневыми брекчиями карбонатных пород и серицит-хлоритовыми сланцами третьей пачки верхнепотоскуйской подсвиты, моноклинально залегающими в тектоническом блоке размером до 6 км<sup>2</sup>, ограниченном разломами. Оруденение, прослеженное скважинами на глубину до 400 м, локализовано в двух крутопадающих линзообразных телах, согласно залегающих с вмещающими породами. Размеры рудных тел 1,5 × 100 × 100 и 6,0 × 300 × 500 м. Основные рудные минералы – галенит и сфалерит, встречаются пирит

и халькопирит. Содержание Pb в одном рудном теле составляет 0,62 %, Zn – 1,96 %, в другом 7,11 и 1,73 % соответственно. Прогнозные ресурсы проявления по категориям P<sub>1</sub> и P<sub>2</sub> составляют: Pb – 130,7 тыс. т, Zn – 32,5 тыс. т (А. Е. Березий, 1973; М. М. Лапшин, 1990).

Анатолевское проявление приурочено к ядру антиклинальной складки. Рудовмещающие породы – доломитистые, глинистые и водорослевые известняки шунтарской свиты. Свинцово-цинковое оруденение локализовано в пяти линзовидных телах мощностью от 2 до 14 м. Основные рудные минералы – сфалерит и галенит. Постоянно присутствует пирит, иногда отмечаются халькопирит и пирротин. Содержание Pb изменяется от 0,1 до 3,95 %, Zn – от 0,15 до 3,69 %, Ag – от 2 до 50 г/т. До глубины 100 м на проявлении развита зона окисления, представленная кварц-лимонитовой сыпучкой и охристыми глинами каолинового и гидрослюдистого составов. В окисленных рудах выявлены англезит, церуссит, смитсонит, пиролюзит. Прогнозные ресурсы проявления по категориям P<sub>1</sub> и P<sub>2</sub> оцениваются (тыс. т): Pb – 495, Zn – 186,4.

Морянихинское рудное поле охватывает Морянихинское проявление и ряд пунктов минерализации. Морянихинское проявление – наиболее типичный объект свинцово-цинковой формации в карбонатных (рифогенных) породах. Оно представляет собой залежь, состоящую из пяти линзообразных рудных тел, локализованных в водорослевых доломитах третьей пачки верхнепотоскуйской подсвиты. Мощность рудных тел изменяется от 2 до 21 м, в среднем составляет 10 м. Руды представлены галенитом (80–85 %) и сфалеритом (15–20 %). Существенно галенитовые руды тяготеют к верхним и средним частям крутопадающих рудных тел, сфалеритовые – к нижним. Среднее содержание Pb и Zn в рудах составляет 3 %. Кроме того, в рудах установлены серебро (до 80 г/т), Ge (до 100 г/т), Cd (до 0,1 %), присутствуют Cu, Co, Ni, Sb. Прогнозные ресурсы Pb и Zn Морянихинского рудного поля по кат. P<sub>2</sub> оцениваются в 650 и 500 тыс. т соответственно.

*Колчеданно-полиметаллическая формация в углеродистых породах* представлена рас-

сохинским типом оруденения в терригенно-карбонатных отложениях тунгусикского и широкского стратиграфических уровней. Проявления и пункты минерализации этого формационного типа свинцово-цинкового оруденения приурочены к обрамлению Сухопитского горста. По комплексным Pb-Zn, Pb-Zn-Cu аномалиям, обнаруженным рудопрооявлениям полиметаллов выделяются три предполагаемых рудных узла – Рассохинский, Пихтово-Дауглинский и Рудиковский.

Рассохинский рудный узел (площадь около 50 км<sup>2</sup>) выделяется на юго-восточном замыкании Сухопитского горста в контуре гидрохимической аномалии с повышенными (до 50–100 мкг/л) содержаниями Pb, Zn и Cu. В пределах рудного узла оконтуривается Верхне-Рассохинское рудное поле площадью до 35 км<sup>2</sup>, включающее два крупных проявления – Линейное и Лимонитовое и два мелких – Правобережное и Климовское.

Проявление Линейное приурочено к ядру антиклинали, сложенной углеродистыми и карбонатно-углеродистыми сланцами первой пачки верхнепотоскуйской свиты. Рудное тело прослежено до глубины 300–350 м, имеет мощность до 30,0 м и протяжённость до 1200 м. Минеральный состав колчеданных руд представлен пиритом (80–90 %), галенитом, сфалеритом, реже встречаются халькопирит, арсенопирит, марказит, бурнонит, магнетит, пирротин, вюртцит, ильменит. Среднее содержание Pb в рудах составляет 1,09 %, Zn – 4,23 %. До глубины 120–130 м руды проявления интенсивно окислены. Прогнозные ресурсы по кат. P<sub>2</sub> (тыс. т.) оцениваются: Pb – 200, Zn – 1300 (С. В. Горбунов, 1973; М. М. Лапшин, 1990).

Проявление Лимонитовое имеет сходные геологическое строение и состав руд. Рудная залежь прослежена на 1800 м по простиранию и 500 м по падению, мощность залежи достигает 50 м. Среднее содержание Pb 0,74 %, Zn 1,98 %. Прогнозные ресурсы по кат. P<sub>1</sub> составляют (тыс. т): Pb – 493, Zn – 1259, по кат. P<sub>2</sub> – 308 и 787 соответственно.

**Рассохинский свинцово-цинковый рудный узел. Стратиграфия.** Стратиграфическое расчленение образований, участвующих в стро-

ении узла, приведено по легенде Енисейской серии ГГС-200 второго поколения (Л. К. Качевский, 1990; А. Ф. Целыковский, 2000) (рис. 1).

**Средний рифей. Сухопитская серия.** Образование среднего рифея в структурно-тектоническом плане приурочены к Рудиковскому тектоническому шву, Сухопитскому горсту и центральной части Каменского грабена, где представлены отложениями сухопитской серии, которая по особенностям литологического состава расчленяется на горбилоскую и удерейскую свиты.

Горбилоская свита ( $RF_2gr$ ) с постепенным переходом залегает на породах кординской свиты. Разрез представлен неравномерным переслаиванием зеленовато-серых, темно-серых кварц-хлорит-серицитовых, серицит-хлоритовых сланцев, филлитизированных сланцев с прослоями эпидот-хлоритовых туффитовых сланцев и песчаников, серого, зеленовато-серого цвета. Мощность свиты изменяется от 600 до 800 м.

Удерейская свита ( $RF_2ud$ ) согласно залегает на породах горбилоской свиты. По особенностям литологического состава подразделяется на три подсвиты: нижняя сложена филлитовидными серицитовыми и кварц-хлорит-серицитовыми сланцами темно-серого, черного цвета, средняя – хлоритовыми, кварц-хлорит-серицитовыми зеленовато-серыми, темно-серыми ритмично-слоистыми сланцами; верхняя представлена флишвидным переслаиванием темно-серых, черных кварц-серицитовых филлитовидных сланцев и светло-серых слабокарбонатных линзовидных метаалевролитов. Радиологический возраст свиты по глаукониту, по данным Л. К. Качевского, составляет 1125 Ма. Общая мощность отложений свиты оценивается в 1500–1700 м.

**Верхний рифей. Тунгусикская, киргитейская, широкинская серии.**

Тунгусикская серия с угловым и стратиграфическим несогласием залегает на образованиях сухопитской серии. Стратиграфический объем тунгусикской серии представлен потоскуйской и шунтарской свитами.

Потоскуйская свита ( $RF_3pt$ ) по особенностям литологического состава подразделяется на

три подсвиты: нижнюю – карбонатно-сланцевую, среднюю – хлоритоидных сланцев и верхнюю – терригенно-сланцевую с гравелитами.

Нижняя подсвита ( $RF_3pt_1$ ) по особенностям литологического состава подразделяется на три пачки: первая – черные серицитовые филлиты, светло-серые серицит-хлоритовые сланцы, в средней её части – тонкокристаллические серые брекчированные доломиты с полиметаллическим оруденением; вторая – темно-серые, реже зеленовато-серые серицитовые филлиты, хлоритоидные сланцы; третья пачка – черные серицитовые с прослоями белых линзовидно-волнисто-слоистых металаевролитов филлиты, серицит-хлоритовые сланцы.

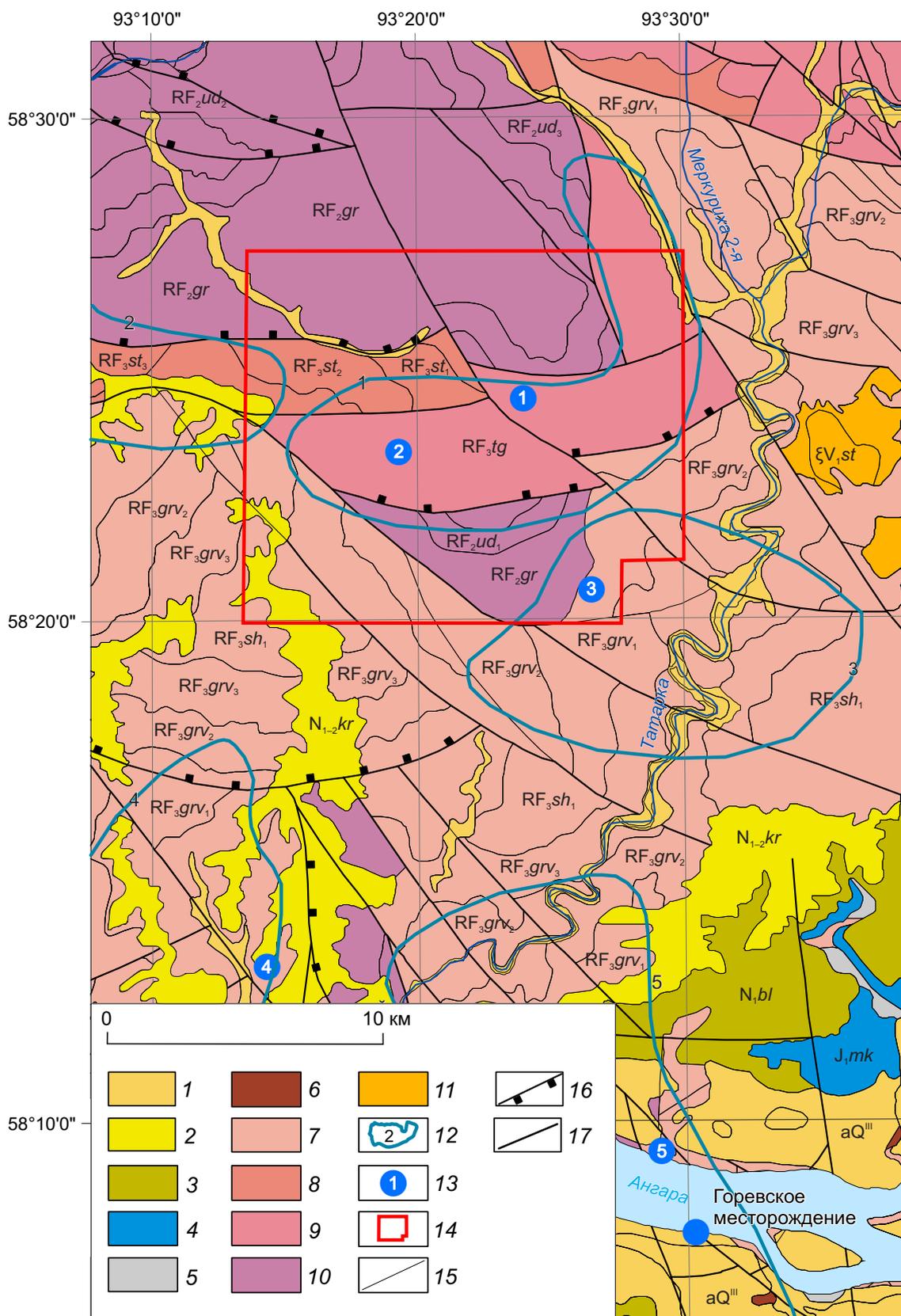
Минеральный состав серицитовых и серицит-кварцевых сланцев и алевропелитов представлен переменным количеством кварца (15–40 %), гидрослюд и серицита (30–45 %), хлорита (20–25 %), рудных минералов (до 10 %). Темноцветные разности пород содержат до 10 % углеродисто-глинистого вещества.

Общая мощность нижней подсвиты оценивается в 400–1500 м.

Верхняя подсвита ( $RF_3pt_2$ ) по особенностям литологического состава подразделяется на три пачки: первую – карбонатно-углеродисто-сланцевую, вторую – сланцевую и третью – карбонатную.

Первая пачка ( $RF_3pt_2^1$ ) согласно залегает на породах третьей пачки нижнепотоскуйской подсвиты. Она сложена высокоуглеродистыми филлитами серицитовыми, серицит-кварцевыми и хлоритоидными черными, серыми и темно-серыми с прослоями бурых известково-серицитовых сланцев, известняками глинисто-серицитовыми. Отложения пачки вмещают промышленное колчеданно-полиметаллическое оруденение. Мощность пачки оценивается в 550–650 м.

Вторая пачка ( $RF_3pt_2^2$ ) представлена серицитовыми филлитами, серицит-кварцевыми алевритовыми сланцами, кварцевыми металаевролитами, хлоритоидными градационно-слоистыми темно-серыми сланцами. Встречаются редкие линзы доломитовых известняков. Мощность пачки составляет 650 м.



**Рис. 1. Геологическая карта района Рассохинского рудного узла (А. Ф. Целыковский, 2000, с дополнениями):**

1 – четвертичные отложения ( $aQ^{III}$ ); 2 – кирнаевская свита ( $N_{1-2}kr$ ); 3 – бельская свита ( $N_1bl$ ); 4 – макаровская свита ( $J_1mk$ ); 5 – каменноугольные отложения; 6 – девонские отложения; 7 – широкоинская серия: горевская ( $RF_3gv$ ), сухохребтинская ( $RF_3sh$ ) свиты; 8 – киргитейская серия (степановская толща,  $RF_3st$ ); 9 – тунгусикская серия ( $RF_3tg$ ); 10 – сухопитская серия: горбилоская ( $RF_2gr$ ), удерейская ( $RF_2ud$ ) свиты; 11 – среднетатарский нефелин-сиенитовый комплекс ( $V_1st$ ); 12 – свинцово-цинковые рудные узлы Ангарского рудного района (установленные и прогнозируемые): Рассохинский (1), Верхне-Рудиковский (2), Долгинский (3), Блохинский (4), Горевский (5); 13 – проявления свинца и цинка: Лимонитовое (1), Линеинное (2), Долгое (3), Анатолевское (4), Рудаковское (5); 14 – контур лицензии КПП 03357 ТП; 15 – геологические границы; 16 – разломы; 17 – надвиги

**Fig. 1. Geological map of the Rassokhinsky ore cluster area (after A. F. Tselykovsky, 2000, updated):**

1 – Quaternary deposits ( $aQ^{III}$ ); 2 – Kirnaevskaya suite ( $N_{1-2}kr$ ); 3 – Belskaya suite ( $N_1bl$ ); 4 – Makarovskaya suite ( $J_1mk$ ); 5 – Carboniferous deposits; 6 – Devonian deposits; 7 – Shirokinskaya series: Gorevskaya ( $RF_3gv$ ), Sukhokhrebtsinskaya ( $RF_3sh$ ) suites; 8 – Kirgiteiskaya series (Stepanovskaya sequence,  $RF_3st$ ); 9 – Tungusikskaya series ( $RF_3tg$ ); 10 – Sukhopitskaya series: Gorbilokskaya ( $RF_2gr$ ), Udereiskaya ( $RF_2ud$ ) suites; 11 – Middle Tatar nepheline-syenite complex ( $V_1st$ ); 12 – lead-zinc ore clusters of Angarsky ore district (identified and forecasted): Rassokhinsky (1), Verkhne-Rudikovskiy (2), Dolginsky (3), Blokhinsky (4), Gorevskiy (5); 13 – Pb and Zn occurrences: Limonite (1), Lineinoe (2), Dolgoe (3), Anatolievskoye (4), Rudakovskoye (5); 14 – lease contour КПП 03357 ТП; 15 – geological boundaries; 16 – faults; 17 – thrusts

Третья пачка ( $RF_3pt_2^3$ ) в разрезе верхней подсвиты представлена железистыми доломитами, доломитовыми известняками массивными, брекчиевидными тёмно-серого цвета с прослоями зеленовато-серых хлоритоидных, серицит-кварцевых сланцев. Мощность пачки 560–650 м.

Общая мощность верхней подсвиты составляет 1700–1900 м.

Общая мощность потоскуйской свиты оценивается в 2900–3200 м.

Породы потоскуйской свиты характеризуются повышенным содержанием Pb, Cu, Zn, V, Co, Cr, Ni, Mn, Ni, Ga, Ba, особенно в карбонатных породах верхней подсвиты, где количество  $Pb_2O_5$  по отдельным пробам достигает 0,76 %.

Позднерифейский возраст потоскуйской свиты устанавливается по её положению в основании тунгусикской серии, имеющей K/Ar датировку по глаукониту 955 Ма, подтверждается Rb/Sr определением возраста гранитов Татарско-Аяхтинского комплекса, прорывающих серию -943 Ма (Л. К. Качевский, 1990), а также наличием строматолитов *Conophyton confertus Semikh.* в известняках и доломитах в верхней части свиты (А. Ф. Целыковский, 2000).

Шунтарская свита ( $RF_3sn$ ) венчает разрез тунгусикской серии. Свита представлена переслаиванием хлоритовых и серицитовых филлитов, участками углеродистых с редкими прослоями серицит-кварцевых алевритовых сланцев, линзами и прослоями чёрных глинистых известняков, известково-серицитовых сланцев с прослоями доломитовых известняков в верхней части. Мощность свиты оценивается в 700 м.

Киргитейская серия объединяет карбонатно-сланцевые отложения, выделяемые в удоронгскую свиту и степановскую толщу.

Удоронгская свита ( $RF_3ur$ ) представлена переслаиванием пестроцветных кварцитовидных алевропесчаников с глинисто-серицитовыми алевритистыми тёмно-серыми и чёрными сланцами, в верхней части тёмно-серыми и чёрными глинисто-серицитовыми углеродистыми сланцами с зеленовато-серыми сланцами и кварцитовидными алевропесчаниками. Видимая мощность свиты 500 м.

Степановская толща ( $RF_3st$ ) согласно залегает на породах удоронгской свиты. По особенностям литологического состава подразделяется на три подтолщи: нижнюю – карбонатно-сланцевую пестроцветную, среднюю – алев-

ро-сланцевую и верхнюю – черносланцевую. Общая мощность толщи превышает 1400 м.

Широкинская серия по литологическому составу подразделяется на горевскую вулканогенно-карбонатную и сухохребтинскую вулканогенно-терригенную свиты.

Горевская свита (RF<sub>3</sub>gv) по особенностям литологического состава подразделяется на три подсвиты: нижнюю – углеродисто-сланцево-известковистую, среднюю – карбонатно-сланцевую флишоидную и верхнюю – сланцево-доломитовую.

Отложения верхней подсвиты вмещают промышленное полиметаллическое оруденение Горевского месторождения.

Микроэлементный состав горевской свиты во всех разрезах выделяется высокими концентрациями Pb, Zn, Cu, Mn, Cr, V, Co (в 2–4 раза выше кларка).

Позднерифейский возраст горевской свиты устанавливается по её положению в разрезе выше киргитейской серии и по определению радиологического возраста свинцово-цинкового оруденения. По данным В. Г. Пономарёва, возраст минералов свинца Ангарского рудного района составляет 850–950 Ма, Горевского месторождения – 850 Ма. Этому не противоречат определения возраста U-Th-Rb методом (по монациту) гранитоидов стрелковского комплекса 950 ± 115 Ма и долеритов степановского комплекса 915 Ма [1].

Сухохребтинская свита (RF<sub>3</sub>sh) согласно залегает на породах горевской свиты. По особенностям литологического состава подразделяется на две подсвиты: нижнюю вулканогенно-сланцевую и верхнюю терригенную.

Меловая и палеогеновая системы нерасчленённые. Коры выветривания (К–P<sub>2</sub>).

Мел-палеогеновые коры выветривания фрагментарно сохранились на приподнятых участках рельефа и вдоль зон тектонических нарушений.

Процессы корообразования наиболее активно проявились на участках распространения литологически неоднородных терригенных, карбонатных, вулканогенных пород тунгусикской, киргитейской, широкинской и сухохребтинской серий. Приуроченность кор

выветривания к зонам тектонических нарушений обусловила их линейно-площадной характер распространения. Выделяются открытые и погребённые коры под толщей палеоген-неогеновых и четвертичных отложений. В общем виде в профиле зрелой коры условно выделяются четыре зоны (снизу вверх):

1. Зона дезинтеграции – начального преобразования коренных пород с незначительным изменением их минерального состава (1–50 м).

2. Зона гидратации – промежуточного разложения пород с формированием пёстроокрашенных продуктов смешанного каолинит-монтмориллонитового состава (10–50 м).

3. Зона гидролиза – конечного разложения исходных пород и формирования глин каолинитового состава белой, серой, буровато-красной окраски (до 20 м).

4. Зона обогащения каолинит-гиббситовая (обычно размыта).

Наиболее интенсивное корообразование наблюдается по породам потоскуйской, горевской и сухохребтинской свит, особенно в зонах разрывных нарушений; процесс развивается до глубины 250–400 м.

Возраст кор выветривания – ранний мел – палеоген (А. Ф. Целыковский, 1997).

*Интрузивные образования* в пределах Рассохинского рудного узла установлены скважинами на уч. Линейный и представлены дайками диабазов токминского комплекса рифея.

*Тектоника.* Территория Рассохинского рудного узла приурочена к району Рассохинского грабена Приенисейского антиклинория байкалид Енисейского кряжа. Грабен имеет субширотное простирание, сложен терригенно-карбонатными формациями тунгусикской, киргитейской и широкинской серий, его борта осложнены Огневской системой разрывных нарушений.

В тектоническом строении рудного узла выделяются три мегакомплекса: рифейский, мезозойский и кайнозойский. Рифейский мегакомплекс образует основание Сибирской платформы. Мезозойский и кайнозойский мегакомплексы слагают платформенный комплекс (чехол) Сибирской платформы.

Рифейский мегакомплекс объединяет три структурных яруса: ранне-среднерифейский сухопитский и позднерифейские тунгусикский и ширококинский. В региональном плане между ярусами прослежены поверхности углового несогласия. На площади ярусы отличаются друг от друга характером и интенсивностью складчатости, типами структур, разделены между собой тектоническими контактами.

Сухопитский структурный ярус сложен карбонатно-алевритно-сланцевой и аспидной формациями. Породы яруса участвуют в строении Сухопитского горста, для которого характерно развитие хорошо выраженных линейных асимметричных складок с углами падения на крыльях  $60\text{--}80^\circ$ , размеры которых достигают  $6 \times 20$  км.

Тунгусикский структурный ярус сложен отложениями карбонатно-терригенной формации (потоскуйская свита). Главная структура яруса – Рассохинский грабен, в котором развиты мелкие линейные складки субширотного и северо-восточного простирания с углами падения крыльев  $60\text{--}70^\circ$ , реже до  $85^\circ$ .

Широкинский структурный ярус представлен породами вулканогенно-карбонатной (горевская свита) и вулканогенно-терригенной (сухохребтинская свита) формаций. В зоне выделяются антиклинальные и синклинали складки более высокого порядка: линейные, овальные, брахиформные, с ориентировкой осей складок на северо-северо-запад, восток-северо-восток и запад-северо-запад. Углы падения крыльев линейных складок  $60\text{--}80^\circ$ , овальных и брахиформных – от  $15\text{--}20$  до  $30\text{--}60^\circ$ .

Мезозойский мегакомплекс представлен угленосной терригенной формацией юрского и терригенной формацией мелового структурного яруса. Отложения мегакомплекса залегают субгоризонтально. С приближением к бортам впадин и в приразломных зонах осадки дислоцируются с появлением плейчатости с углами падения крыльев складок до  $70^\circ$ .

Кайнозойский мегакомплекс представлен палеоген-неогеновым и четвертичным структурными ярусами. Первый включает глинисто-песчано-грубообломочную (бельская свита)

и песчано-грубообломочную (кирнаевская свита) формации и коры выветривания в виде эрозионных останцов, развитые в наложенных впадинах.

Отложения рифея в пределах рудного узла смяты в относительно крупные складки с размахом крыльев до  $4\text{--}5$  км, которые осложнены более мелкими шириной от десятков до сотен метров. Наиболее крупными, по данным предшественников (С. В. Горбунов, 1973), являются две брахиформные синклинали складки. Одна из них с размахом крыльев  $2,0\text{--}2,5$  км и протяжённостью  $4,0\text{--}4,5$  км расположена на площади водораздела между верховьями рек Большая Рассоха и Долгая. Вторая складка занимает всю центральную часть рудного узла южнее участков Линейный и Правобережный. Размах крыльев  $5$  км, длина около  $7\text{--}8$  км.

Обе синклинали отделены друг от друга узкой ( $1,0\text{--}1,5$  км) антиклинальной складкой участков Линейный и Правобережный, которая вместе с аналогичной складкой участка Лимонитовый обрамляет первую из этих синклиналей с запада, востока и юга. Протяжённость антиклиналей участков Линейный и Правобережный  $8$  км, а участка Лимонитовый  $6$  км. В ядрах этих складок обнажаются чёрные серицит-кварцевые высокоуглеродистые сланцы с колчеданами (потоскуйская свита, пачка 1), а крылья сложены серицитовыми, серицит-кварцевыми тёмно-серыми градационно-слоистыми, хлоритоидными сланцами, известняками (потоскуйская свита, пачка 2).

Среди высокоуглеродистых сланцев в северных крыльях обеих антиклинальных складок на Линейном и Лимонитовом участках установлены залежи колчеданных свинцово-цинковых руд предположительно гидротермально-осадочного генезиса.

По данным предшественников (С. В. Горбунов, 1973), предполагается, что в мульде северной синклинали могли накапливаться конседиментационные залежи гидротермально-осадочных свинцово-цинковых руд, более крупные и богатые по сравнению с теми, которые известны в крыльях этой складки. Положение этих залежей, возможно, фиксирует известная здесь локальная аномалия силы тяжести

**Табл. 1. Характеристика рудных интервалов участка Линейный (С. В. Горбунов, 1973)**

Table 1. Characterization of Lineiny area ore intervals (Gorbunov, 1973)

Номера скважин	Интервал, м	Мощность по керну, м	Содержание, %		Отношение Pb : Zn
			Pb	Zn	
258	21–66,4	45,4	2,01	1,00	2 : 1
217a	228–286,8	58,8	0,20	1,12	1 : 5,5
219	177,5–350,0	177,5	0,75	2,10	1 : 3
910	237–511	274,0	0,64	2,02	1 : 3,5

интенсивностью 2,5–3,0 мгл при размере порядка 1,5 × 2,0 км (Мукомело, 1972, 1973).

Доминирующей разрывной структурой в пределах Рассохинского рудного узла является Огневская система дизъюнктивов сбросо- или сбросо-сдвигового характера. Разломы, как правило, сопровождаются образованием тектонитов, представляющих собой зоны интенсивно рассланцованных, окварцованных, хлоритизированных и карбонатизированных пород. Мощность зон тектонитов иногда достигает 1,0–1,5 км. Наиболее мощные из этих зон распространены в районе участков Линейный, Правобережный, Лимонитовый и Климовский.

**Геология и рудоносность участка Лимонитовый.** Участок расположен в верховьях рек Большая Рассоха, Малая Рассоха и Долгая в 3 км к северо-востоку от участка Линейный, в 30 км севернее Горевского месторождения. Рудопоявление выявлено в 1959 г. при геологической съёмке масштаба 1 : 200 000 по развалам бурых железняков (Л. Г. Саванович, 1961, 1962). В 1969 г. поверхность участка была изучена шурфами по сети от 100 × 100 до 200 × 200 м, а в 1972 г. проводились поиски рудных залежей с применением скважин колонкового бурения (С. В. Горбунов, 1973). В 1990 г. поиски были продолжены (М. М. Лапшин, 1990), была пробурена глубокая скважина 910, вскрывшая полиметаллическое оруденение.

Поисковыми работами предшественников по оценке масштабов свинцово-цинковых руд в пределах Рассохинского и Дауглинского рудных узлов на участках Линейный, Лимонитовый, Правобережный и других в первом

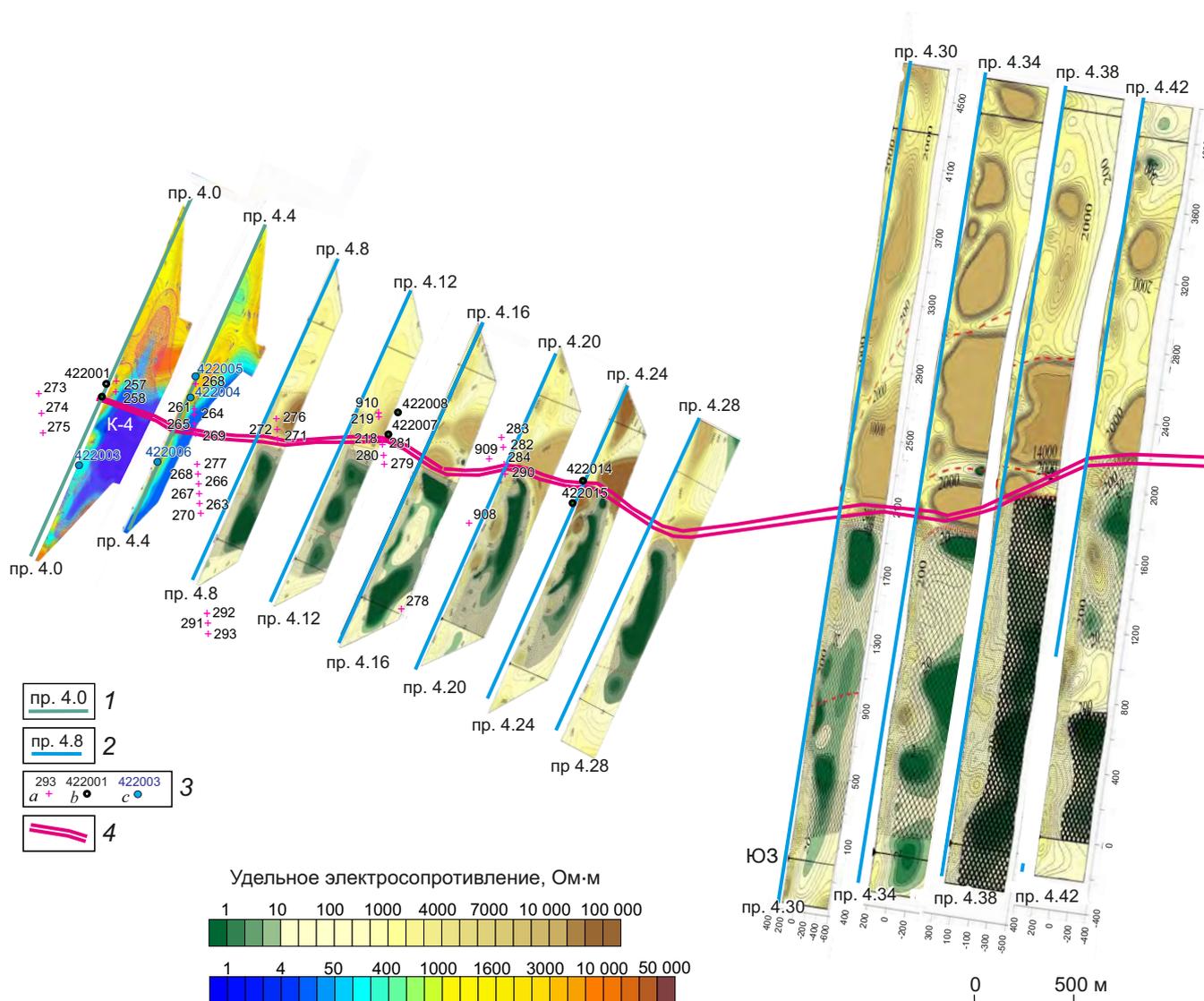
приближении установлено, что колчеданное свинцово-цинковое оруденение гидротермально-осадочного генезиса приурочено к толще углеродисто-глинистых сланцев (С. В. Горбунов, 1973).

В пределах участка были выделены перспективные геофизические аномалии, после завершения которых колонковыми скважинами получены два пересечения серно-колчеданных руд скважинами 258, 217a (ПЛ-3) и 910 (ПЛ-16). Большие мощности рудных интервалов по керну скважин получены вследствие крутого падения рудных залежей на северо-северо-восток и острого угла встречи (15–20°) скважинами с залежью (табл. 1).

По результатам бурения предшественников на участке Лимонитовый серно-колчеданные руды не прослеживаются по падению и представляют собой линзовидные тела. Морфология рудных тел недостаточно изучена. Предполагаемая протяжённость рудного тела 1,5–2,0 км. Восточная часть участка не изучена. Выявленные предшественниками геофизические аномалии требуют уточнения и заверки.

Главное значение для поисков таких руд имеют литолого-стратиграфические критерии, позволяющие установить местоположение стратифицированных рудоносных толщ (зон) в разрезе в верхней части пачки углеродистых сланцев.

Далее структурная и литолого-стратиграфическая приуроченность оруденения на участках Рассохинского узла была исследована профильными электроразведочными работами ООО «Тянь-Шань Лтд» (2018 г.) и ООО НПП «Прогнозгеофизика» (2020 г.) (рис. 2).



**Рис. 2. План размещения профилей электроразведочных работ ВП-2D с элементами геолого-геофизической интерпретации на участке Лимонитовый:**

профили геоэлектрических разрезов, выполненные силами: 1 – ООО «Тянь-Шань Лтд», 2 – ООО НПП «Прогнозгеофизика»; 3 – поисковые скважины: *a* – предшественников, *b* – бурящиеся, *c* – проектные; 4 – зона перехода от высокоомных (сланцы кварц-серицитовые, градационно-слоистые, тёмно-серые, слабоуглеродистые, вторая пачка) к низкоомным (сланцы кварц-серицитовые, хлорит-серицит-кварцевые, высокоуглеродистые, первая пачка) областям электрического сопротивления

**Fig. 2. Layout plan for electrical exploration profiles VP-2D with elements of geological and geophysical interpretation at the Limonite area:**

geoelectric section profiles by: 1 – LLC Tien-Shan, 2 – LLC SPE Prognozgeophysics; 3 – prospecting holes: *a* – previous, *b* – currently drilled, *c* – designed; 4 – transition zones from high-impedance (quartz-sericite, gradationally stratified, dark gray, low-carbon shales, second pack) to low-impedance (quartz-sericite, chlorite-sericite-quartz, high-carbon shale, first pack) electrical resistance fields

ООО «Тянь-Шань Лтд» проведены работы методом полюс-дипольной вызванной поляризации (П-Д ВП) на участках Линейный, Правобережный и Лимонитовый.

На участке Лимонитовый удельное электрическое сопротивление распределяется следующим образом:

- углисто-глинистые, углистые, графитизированные сланцы – 10–150 Ом-м;
- графитизированные и углистые известняки, выветрелые известково-глинистые сланцы – 20–150 Ом-м;
- трещиноватые известняки – 150–800 Ом-м;
- карбонатные породы – 1000–4500 Ом-м;
- алеврито-глинистые, кварц-серицитовые сланцы и кварциты – 1000–5000 Ом-м;
- сплошные руды – первые единицы Ом-м.

Поляризуемость распределяется следующим образом:

- известняки, алеврито-глинистые, глинистые и другие сланцы – 0,4–3,0 %;
- известняки с вкрапленностью сульфидов – 2–45 %;
- углистые сланцы – 7–15 %;
- графитизированные и пиритизированные углистые сланцы – 15–50 %;
- полиметаллические руды в зоне окисления – 12–18 %;
- сплошные полиметаллические руды – 20–50 %.

ООО НПП «Прогнозгеофизика» проведены работы на участке Лимонитовый на 11-ти профилях комбинированным методом измерения сопротивления и вызванной поляризации с трёхэлектродной установкой двухстороннего точечного зондирования на глубину 600 м и шагом 100 м по профилю.

Построенные по данным точечного зондирования модели геоэлектрических разрезов характеризуются высокой степенью латеральной и вертикальной неоднородности электрического сопротивления (изменяющегося от единиц до десятков тысяч Ом-м) и вызванной поляризации (изменяющейся в диапазоне от первых десятых долей до десятков процентов, включая отрицательные значения).

Латеральная неоднородность геоэлектрических разрезов связана с наличием в разре-

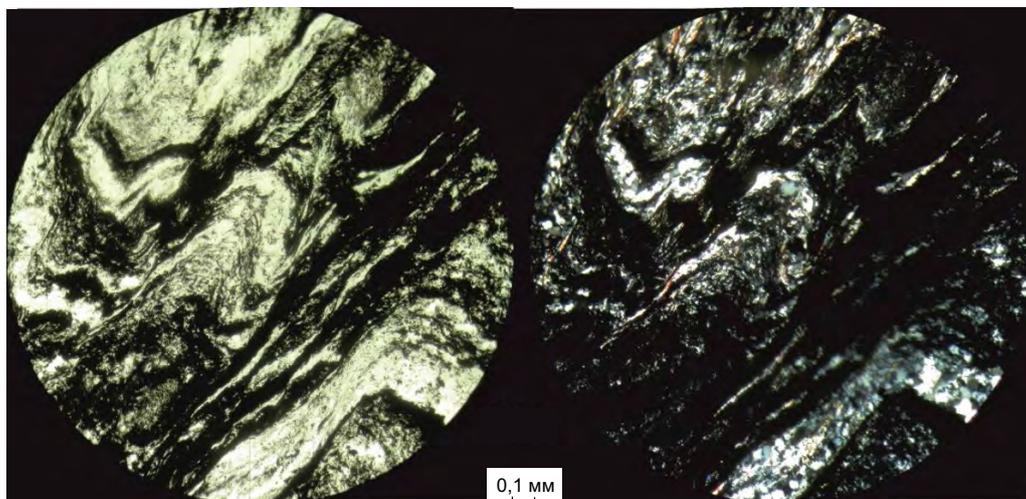
зах мощных толщ углеродистых пород и субвертикальных или сильнонаклонных границ, разделяющих существенно углеродистые и существенно силикатные породы.

В качестве рабочей поисковой модели полиметаллического оруденения рассохинского типа по данным Ангарской ГРЭ, ООО НПП «Прогнозгеофизика» и ООО «Тянь-Шань Лтд» принята модель оруденения, развитого на рудоконтролирующем контакте низкоомных углеродистых пород с экранирующими их со стороны висячего бока более высокоомными породами.

Такая модель в целом не противоречит и геологическим данным, согласно которым колчеданные свинцово-цинковые руды залегают среди высокоуглеродистых пиритизированных сланцев (рис. 3), подстилаются углеродсодержащими известковистыми сланцами и карбонатными породами и перекрываются градационно-слоистыми слабоуглеродистыми хлорит-серицит-кварцевыми, актинолит-хлоритовыми сланцами, так называемыми полосатиками (рис. 4).

Геолого-структурная позиция участка Лимонитовый определяется отложениями верхней подсвиты потоскуйской свиты верхнего рифея. Здесь они смяты в антиклинальную складку с размахом крыльев до 1 км, осложнённую локальными складками и разрывными нарушениями. В ядре антиклинали обнажаются глинистые известняки, глинистые и известково-глинистые сланцы, сменяющиеся кверху чёрными высокоуглеродистыми пиритизированными сланцами, вмещающими залежь слоистых колчеданно-полиметаллических руд (пачка 1), а крылья сложены полосчато-слоистыми, градационно-слоистыми сланцами, серыми и тёмно-серыми слабоуглеродистыми глинистыми сланцами (пачка 2).

В северном крыле складки в составе изученной бурением пачки 1 преобладают чёрные высокоуглеродистые, сажистые сланцы и слоистые колчеданно-полиметаллические руды (неполная вскрытая скважинами стволовая мощность сланцев – до 320 м, в том числе колчеданных руд 75–140 м), которые, по-видимому, образуют сплошной линзующийся

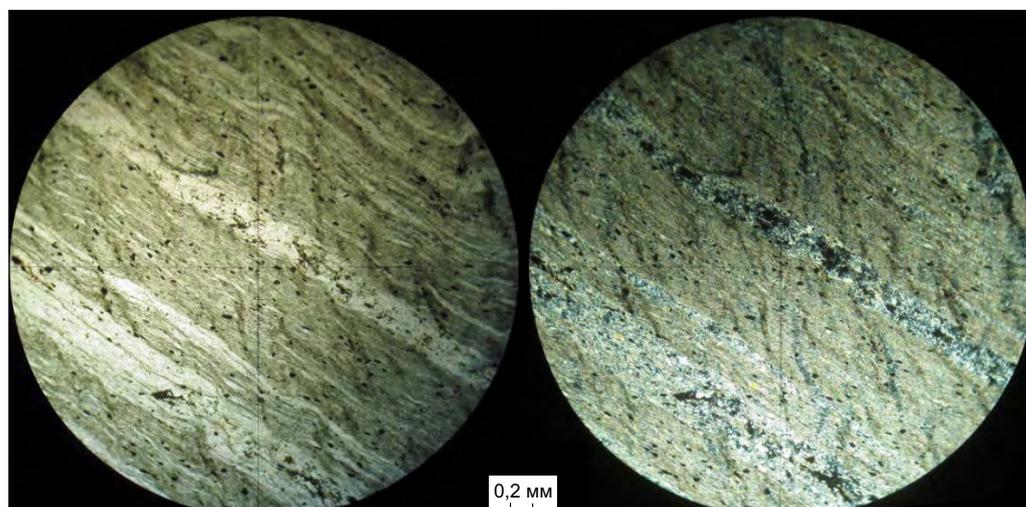


**Рис. 3. Сланец серицит-кварцевый высокоуглеродистый. Порода окварцована и сульфидизирована:**

тёмное – практически непрозрачные прослои и линзы, обогащённые пылевидным углеродистым веществом и сульфидами. Слева – без анализатора, справа – николи скрещены. Шлиф 422001-176,4 (по данным О. Ю. Перфиловой)

**Fig. 3. Sericite-quartz high-carbon shale, quartzified and sulfidized:**

dark: nearly opaque bands and lenses enriched in pulverized carbonaceous matter and sulfides. Left: no analyzer, right: crossed nicols. Polished section 422001-176,4 (based on O. Yu. Perfilova data)



**Рис. 4. Сланец серицит-кварцевый полосчатый градационно-слоистый (чередуются тонкие прослои кварц-серицитового, существенно серицитового с тонкодисперсным углеродистым веществом и серицит-кварцевого составов («полосатики»):**

слева – без анализатора, справа – николи скрещены. Шлиф 422008-184,1 (по данным О. Ю. Перфиловой)

**Fig. 4. Sericite-quartz banded gradationally stratified shale (alternation of quartz-sericite, essentially sericite, finely dispersed carbonaceous and sericite-quartz bands):**

left: no analyzer, right: crossed nicols. Polished section 422008-184,1 (based on O. Yu. Perfilova data)

горизонт. В перекрывающей пачке 2 преобладают тонкополосчатые градационно-слоистые слабоуглеродистые сланцы, местами известковистые (неполная вскрытая скважинами стволовая мощность составляет более 300 м).

По этим отложениям на участке развиты коры выветривания, представленные бурыми железняками, дресвяно-щебнисто-глинистыми и глинистыми образованиями мощностью 50–100 м, а местами интенсивно выветрелые сланцы и колчеданные руды распространяются до глубины 350 м.

На участке по данным электроразведки ВП-2D были спроектированы профили поискового бурения (в основном в пределах северного крыла антиклинали). После проходки трёх профилей на поисковых линиях РЛ-92 (скв. 422001, 422002), РЛ-78 (скв. 422007, 422008) и РЛ-68 (скв. 422014, 422015) (см. рис. 2) вскрыта и прослежена по простиранию на 2400 м, по падению на 250–380 м (до глубины 300 м). Рудная зона 1 колчеданно-полиметаллических свинцово-цинковых руд, локализованная в северном крыле антиклинали среди чёрных высокоуглеродистых сланцев. Мощность рудной залежи 57–65 м (РЛ-92), 48–56 м (РЛ-78), 20–35 м (РЛ-68), простирание субширотное, падение вначале крутое (70–85°) на север (РЛ-92, 78), а далее на восток залежь выкручивается и на профиле РЛ-68 её падение изменяется от вертикального до крутого южного (табл. 2).

Разрез рудовмещающей толщи по скв. 422008 представлен двумя пачками верхней подсвиты потоскуйской свиты: вторая пачка – серицитовые, кварц-серицитовые градационно-слоистые слабоуглеродистые сланцы («полосатики»), первая – серицитовые, кварц-серицитовые высокоуглеродистые сланцы, в кровле – колчеданы, в подошве – известковистые сланцы, известняки (рудонесная толща) (см. рис. 3, 4).

По данным изучения образцов керна руда колчеданно-полиметаллическая, сплошная, полосчатая нередко преобладает. Текстура массивная, полосчатая, структура аллотриоморфнометазернистая, гипидиоморфнометазернистая, глобулярная (фрамбоидальная), интерстициальная (рис. 5, 6).

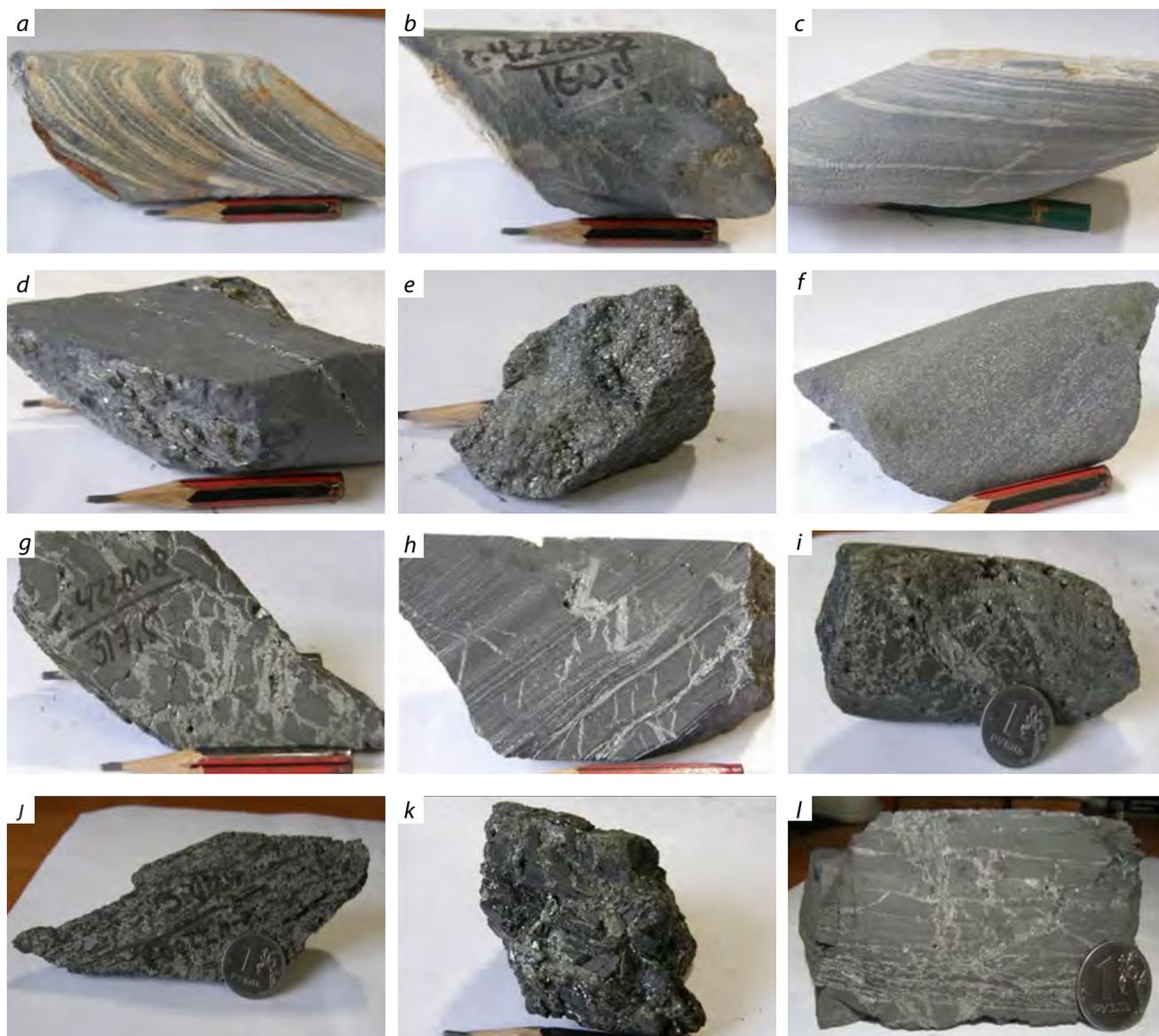
Руды представляют собой слоистые образования (мощность слоев до 0,5–2 см) очень тонкозернистого агрегата существенно пиритового состава (пирит-1), интенсивно катаклазированные и рассечённые густой сетью прожилков (до 1–5 мм) мелко- и среднекристаллического пирита-2 с вкрапленностью галенита, сфалерита, гринокита (рис. 7, см. рис. 6).

Пирит в руде доминирует и представлен несколькими формами, вероятно, отражающими его генерации. Ранняя генерация, пирит-1, морфологически представлена двумя типами (см. рис. 6).

**Табл. 2. Характеристика рудных зон по скважинам участка Лимонитовый**

Table 2. Ore zone characterization by Limonite area holes

Номера скважин	Интервал, м	Мощность по керну, м	Содержание по данным опробования РФА (по ICP-AES), %		Отношение Pb : Zn
			Pb	Zn	
422001	22–123	101	0,1–3,6 (0,1–1,3)	0,3–53,8 (0,1–3,2)	1 : 1,1
422002	140–215	85	0,1–7,56 (0,1–1,8)	1,28–32,18 (0,1–2,9)	1 : (3–5)
422007	31–171	140	0,1–28,57 (0,1–3,7)	1,21–78,64 (0,1–4,7)	1 : (5–10)
422008	277–377	100	0,58–24,67 (0,1–1,9)	0,42–68,41 (0,1–6,4)	1 : (5–10)
422014	180–255	75	0,85–32,01	1,1–11,05	1 : (0,1–1,0)
422015	12–134	122	1,1–24,99	0,5–4,25	1 : (0,1–0,5)

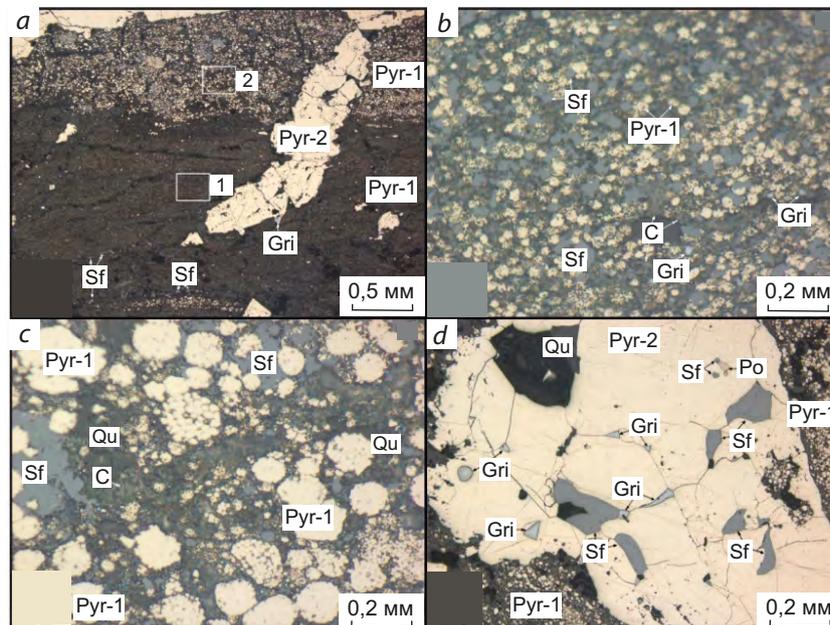


**Рис. 5. Образцы пород и руд. Скв. 422008. Интервал 0,0–357,3 м:**

сланец серицит-кварцевый: *a* – тонкополосчатый (31,4 м), *b* – полосчатый (160,4 м), *c* – полосчатый осветлённый (84,1 м); *d* – углеродистый сланец с прослойками пирита (281,7 м); колчеданная руда: *e* – брекчиевидная (296,7 м), *f* – тонкозернистая полосчатая (299,4 м), *g* – брекчиевидная (317,5 м), *h* – тонкополосчатая брекчиевидная (323,7 м), *i* – брекчиевидная (326 м), *j* – криптокристаллическая полосчатая (340,5 м), *k* – брекчиевидная (сфалерит, галенит, пирит) (353,8 м), *l* – слоисто-полосчатая брекчиевидная (357,3 м)

**Fig. 5. Rocks and ores samples. Hole 422008. Interval 0.0–357.3 m:**

sericite-quartz shale: *a* – finely banded (31.4 m depth), *b* – banded (160.4 m), *c* – banded bleached (184.1 m); *d* – pyrite-banded carbonaceous shale (281.7 m), massive sulfide ore: *e* – brecciated (296.7 m), *f* – fine-grained banded (299.4 m), *g* – brecciated (317.5 m), *h* – finely banded brecciated (323.7 m), *i* – brecciated (326 m), *j* – cryptocrystalline banded (340.5 m), *k* – (sphalerite, galena, pyrite) brecciated (353.8 m), *l* – layered banded brecciated (357.3 m)

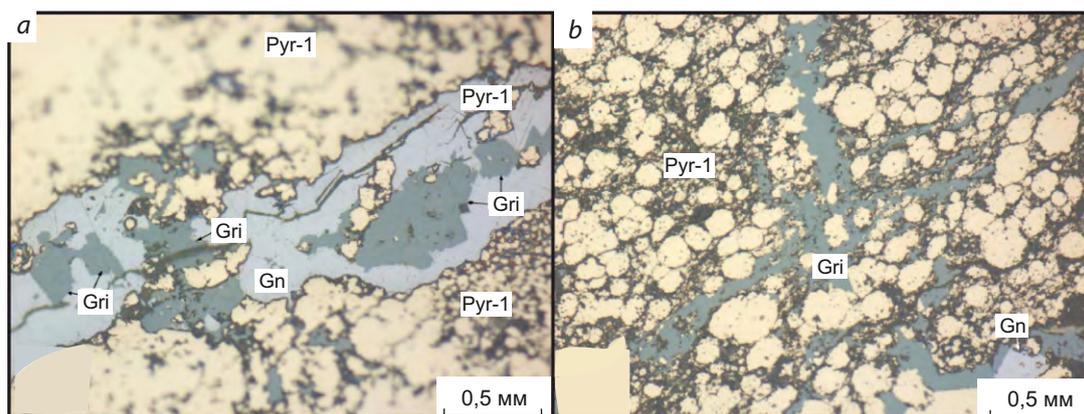


**Рис. 6. Генерации пирита:**

*a* – слои двух типов пирита-1; *b* – деталь 1 рис. 6, *a*; *c* – деталь 2 рис. 6, *a*; *d* – пирит-2 с включениями пирита-1 (Pyr-1); пирит-2 (Pyr-2), гринокит (Gri), сфалерит (Sf), кварц (Qu), углеродистое вещество (C), пирротин (Po)

**Fig. 6. Pyrite generations:**

*a* – layers of two types of pyrite-1; *b* – detail 1 Fig. 6, *a*; *c* – detail 2 Fig. 6, *a*; *d* – pyrite-2 with pyrite-1 inclusions (Pyr-1), pyrite 2 (Pyr-2), greenockite (Gri), sphalerite (Sf), quartz (Qu), carbonaceous matter (C), pyrrhotite (Po)



**Рис. 7. Гринокит в аншлифах и его взаимоотношение с минералами:**

*a* – прожилки галенита с включениями зёрен гринокита; *b* – прожилки гринокита среди пиритосфер пирита-1; Gn – галенит; остальные усл. обозн. см. рис. 6

**Fig. 7. Greenockite in polished sections and its relationship with minerals:**

*a* – galena veinlets with greenockite grain inclusions; *b* – greenockite veinlets among pyrite-1 spheres; Gri – greenockite; see Fig. 6 for other legend

Первый тип образует полосчатые (слоистые) участки сплошного тонкозернистого пирита. В отдельных аншлифах тонкозернистый пирит имеет глобулярное строение, в других – представлен микронными кубическими кристаллами. Часто глобулярный пирит цементируется округлыми фрамбоидами сфалерита ранней генерации (см. рис. 6, а).

Для второго типа тонкозернистого пирита характерны маломощные прослои с округлыми пиритосферами размером до  $0,025 \times (0,025-0,035) \times 0,035$  мм (см. рис. 6, с).

Слои раннего пирита сопровождается большое количество углеродистого материала, заполняющего все интерстиции (см. рис. 6, а, б).

Вторая генерация пирита (пирит-2) представлена прожилками мощностью от 5 мкм до 5 мм. Строение крупных прожилков гранобластовое. В составе прожилков отмечаются мелкие включения сфалерита, галенита, меньше пирротина, расположенные в зёрнах пирита или в интерстициях его зёрен (см. рис. 6, d).

Анализ химического состава минералов (пирит, галенит, сфалерит, гринокит) выполнен в лаборатории СФУ на аппаратуре Tescan Vega 3 SBH, ЭДС-анализатор Oxford X-Act (аналитик Б. М. Лобастов). Химические составы пиритов обеих генераций слабо отличаются друг от друга (табл. 3).

Сфалерит – второй по распространённости рудный минерал участка. Образует, предположительно, также две генерации. Ранняя генерация – мелкие (первые микроны) фрамбоидальные зёрна, расположенные в слоистых участках пирита-1 (см. рис. 6, а). Размеры фрамбоидов сфалерита до 0,016–0,020 мм. Вторая генерация развита в межзерновом пространстве агрегатов и прожилков пирита-2, где образует различные по форме включения (см. рис. 6, с). Выделения второй генерации сфалерита имеют значительно более крупные размеры, до  $1,0 \times 1,6$  мм. В отдельных образцах отмечаются сфалеритовые прожилки мощностью до 0,25–0,30 мм, содержащие включения мелких зёрен галенита.

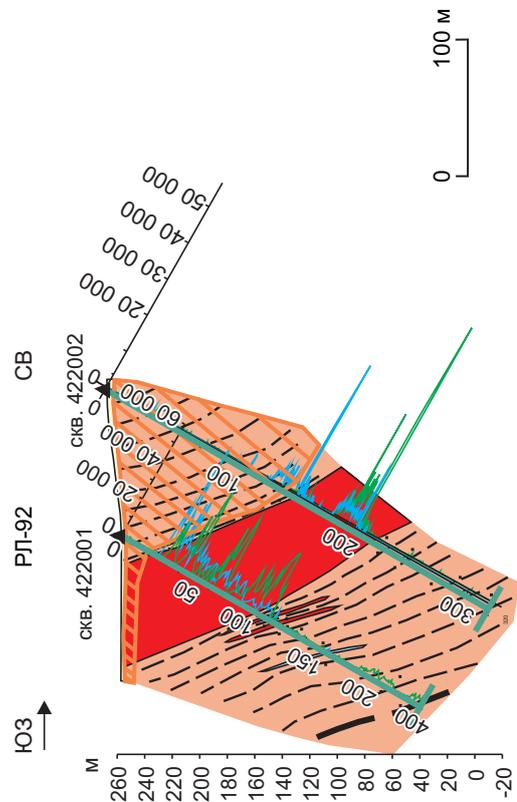
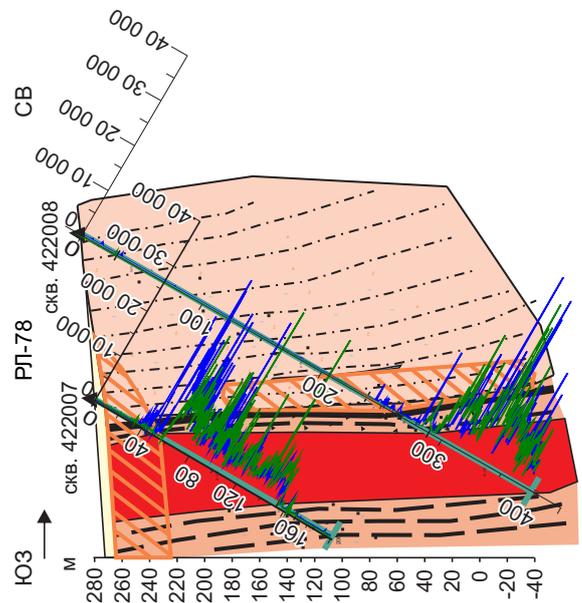
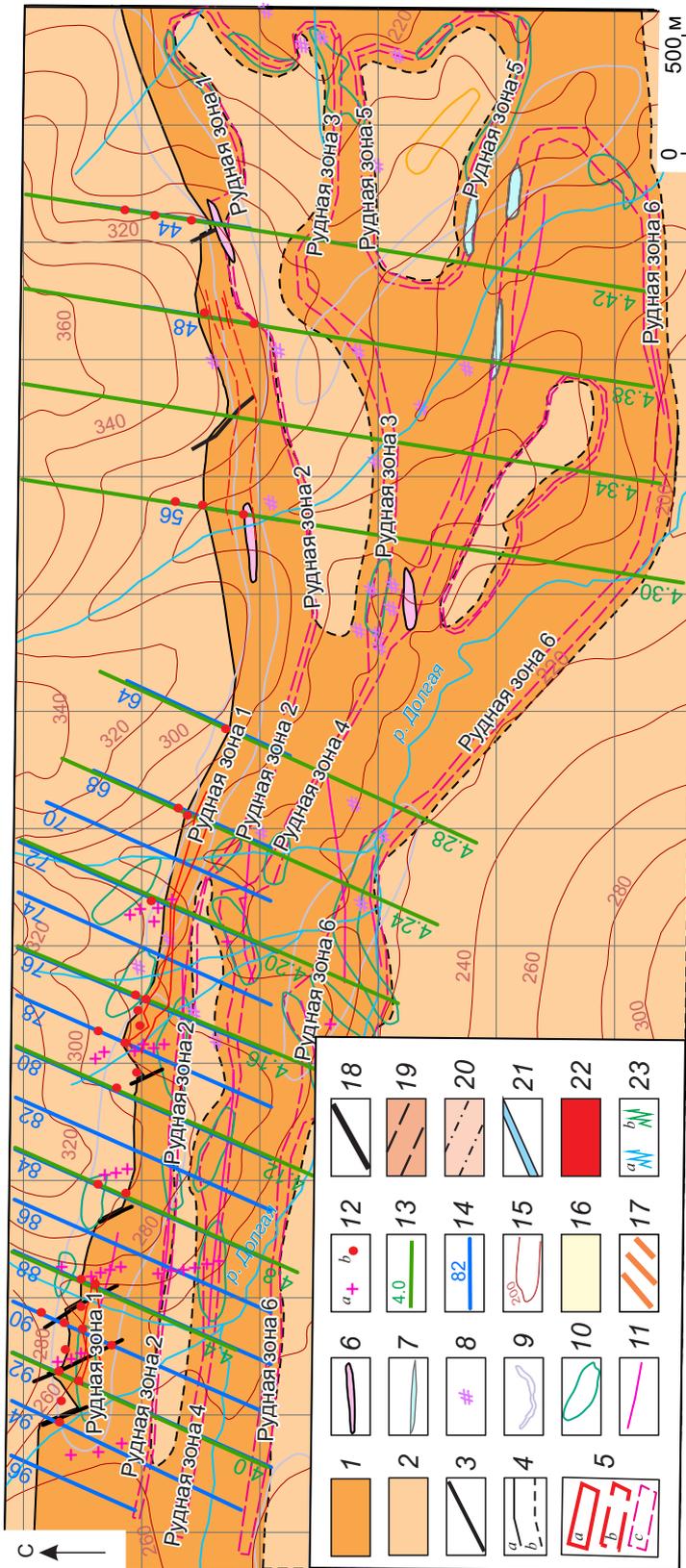
Химические составы сфалеритов двух генераций, по предварительным данным, существенно отличаются друг от друга. Ранняя (фрамбоидальная) генерация характеризуется высоким содержанием железа и существенным избытком серы (табл. 4). Поздняя генерация сфалерита (сфалерит-2) часто имеет хорошую стехиометрию и содержит небольшое количество железа.

Галенит распространён также существенно, но значительно уступает сфалериту. Зато развивается во всех типах пиритовых агрегатов. В наиболее хорошо перекристаллизован-

**Табл. 3. Химический состав пирита**

Table 3. Pyrite chemical composition

Номера образцов	Содержания элементов, мас. %			Формула	Генерация
	S	Fe	Сумма		
с-422001–35,0	53,64	47,20	100,85	$Fe_{1,01}S_{1,99}$	1
с-422001–40,0	54,21	46,28	100,49	$Fe_{0,99}S_{2,01}$	1
с-422001–94,0	53,68	46,38	100,07	$Fe_{0,99}S_{2,01}$	1
с-422001–317,5	53,71	45,54	99,24	$Fe_{0,98}S_{2,02}$	1
с-422001–35,0	53,52	46,67	100,19	$Fe_{1,00}S_{2,00}$	2
с-422001–40,0	54,25	46,25	100,51	$Fe_{0,99}S_{2,01}$	2
с-422001–94,0	53,03	46,90	99,93	$Fe_{1,01}S_{1,99}$	2
с-422001–317,5	53,26	46,76	100,02	$Fe_{1,01}S_{1,99}$	2



### Рис. 8. Геолого-поисковый план участка Лимонитовый и геологические разрезы Рудной зоны 1:

области развития: 1 – сланцев кварц-серцитовых, хлорит-серцит-кварцевых, высокоуглеродистых ( $R_{3pt_2}$ , пачка 2) (низкоомные образования), 2 – сланцев кварц-серцитовых, градационно-слоистых («полосатиков»), тёмно-серых, слабоуглеродистых ( $R_{3pt_2}$ , пачка 3) (высокоомные образования); 3 – разломы; 4 – границы между пачками: *a* – установленные, *b* – предполагаемые; 5 – рудные зоны: зона 1, установленная по телам колчеданных руд (*a*), по телам колчеданных руд и телам бурых железняков с повышенным содержанием свинца и цинка (*b*), *c* – прогнозируемые 2, 3, 4, 5, 6; данные предшественников: 6 – лимониты в коренном залегании, 7 – рудопроявления свинца и цинка, 8 – развалы бурых железняков; 9 – аномалии естественного поля, соответствующие углисто-глинистым сланцам; 10 – положительные локальные аномалии силы тяжести, отвечающие предположительно проявляющимся колчеданных руд, имеющим высокие плотностные характеристики; 11 – оси аномалий вызванной поляризации, предположительно, обусловленные телами полиметаллических руд; 12 – скважины предшественников (а), пробуренные ООО «Сибирская компания разведки недр» (б); 13 – профили геоэлектрических разрезов, выполненные ООО «Гянь-Шань Лтд» (4.0, 4.4), ООО НПП «Прогнозгеофизика» (4.8–4.42); 14 – буровые профили и их номера; 15 – изолинии рельефа, м; 16 – делювиальные отложения; 17 – коры выветривания (щебнисто-глинистые образования, глины монтмориллонит-каолинитовые, бурые железняки) позднемел-палеогеновые; 18 – тектонический контакт пачек 1, 2, 3; 19 – погоскуйская свита, пачка 2; 20 – погоскуйская свита, пачка 3; 21 – кварцевые жилы; 22 – колчеданно-полиметаллические руды (пирит, сфалерит, галенит, гринокит) тонкослоистые, массивные, вкрапленно-прожилковые, брекчиевидные; 23 – график содержания свинца (а), цинка (б), ppm (РФА)

Fig. 8. Geological and prospecting plan of the Limonite area and geological sections of Ore zone 1:

areas of development: 1 – quartz-sericite, chlorite-sericite-quartz, high-carbon shales ( $R_{3pt_2}$ , pack 2) (low-Ohm units), 2 – quartz-sericite, gradationally stratified, dark gray low-carbon shales ( $R_{3pt_2}$ , pack 3) (high-Ohm units); 3 – faults; 4 – boundaries between packs: *a* – defined, *b* – inferred; 5 – ore zones: 1-st one, identified by: *a* – pyrite orebodies and limonite bodies rich in Pb and Zn, *c* – forecasted ore zones 2, 3, 4, 5, 6; previous data: 6 – primary limonite, 7 – Pb and Zn occurrences, 8 – limonite blocks; 9 – natural field anomalies corresponding to coaly clay shales; 10 – positive local gravity anomalies presumably corresponding to high-density massive sulfide ore occurrences; 11 – axes of induced polarization anomalies thought to be caused by polymetallic orebodies; 12 – previous holes (a), drilled by LLC Siberian Mineral Prospecting Company (b); 13 – geoelectric section profiles by LLC Tien-Shan Ltd. (profiles 4.0, 4.4), LLC SPE Prognozgeophysics (profiles 4.8–4.42), 14 – drill profiles and their numbers; 15 – topography isolines, m; 16 – deluvial deposits; 17 – Upper Cretaceous–Paleogene crusts of weathering (rubble and clay, montmorillonite-kaolinite clays, limonite); 18 – tectonic contact of packs 1, 2, 3; 19 – Potoskuy suite, pack 2; 20 – Potoskuy suite, pack 3; 21 – quartz veins; 22 – pyrite-polymetallic finely banded, massive, disseminated-veinlet, brecciated ores (pyrite, sphalerite, galena, greenockite); 23 – charts of lead (a), zinc (b) content, ppm (PPA)

ных прожилках пирита-2 галенит ассоциирует и срощивается со сфалеритом и образует ксеноморфные зёрна размером до  $0,07 \times 0,11$  мм (см. рис. 6, b). Среди агрегатов мелких и более крупных фрамбоидов пирита-1 галенит вы-

полняет роль цемента, обрастая пиритосферы и одиночные кубы метакристаллов пирита-2. Кроме этого, галенит образует тонкие (от 2 мкм – 0,5 мм) прожилки и их апофизы, секущие агрегаты пиритов всех типов и генераций

**Табл. 4. Химический состав сфалерита**

Table 4. Sphalerite chemical composition

Номера образцов	Содержания элементов, мас. %				Формула	Генерация
	S	Fe	Zn	Сумма		
с-422001-317,5	35,46	7,82	58,21	101,48	$(Zn_{0,83}Fe_{0,13})_{0,96}S_{1,04}$	1
с-422001-317,5	36,79	8,98	56,14	101,91	$(Zn_{0,79}Fe_{0,15})_{0,94}S_{1,06}$	1
с-422001-317,5	37,31	5,98	58,13	101,43	$(Zn_{0,82}Fe_{0,10})_{0,92}S_{1,08}$	1
с-422001-317,5	37,06	9,20	53,56	99,82	$(Zn_{0,77}Fe_{0,15})_{0,92}S_{1,08}$	1
с-422001-35	33,81	2,11	64,91	100,82	$(Zn_{0,95}Fe_{0,04})_{0,99}S_{1,01}$	2
с-422001-94	33,14	2,62	65,46	101,23	$(Zn_{0,96}Fe_{0,05})_{1,01}S_{0,99}$	2
с-422001-94	33,19	3,15	63,44	99,78	$(Zn_{0,95}Fe_{0,05})_{1,00}S_{1,00}$	2
с-422001-317,5	32,91	1,41	65,46	99,78	$(Zn_{0,98}Fe_{0,02})_{1,00}S_{1,00}$	2

**Табл. 5. Химический состав галенита**

Table 5. Galena chemical composition

Номера образцов	Содержания элементов, мас. %			Формула
	S	Pb	Сумма	
с-422001-35,0	12,66	89,11	101,77	$Pb_{1,04}S_{0,96}$
с-422001-94,0	12,39	85,88	98,26	$Pb_{1,04}S_{0,96}$
с-422001-94,0	12,67	86,80	99,47	$Pb_{1,03}S_{0,97}$
с-422001-317,5	12,53	86,64	99,17	$Pb_{1,03}S_{0,97}$
с-422001-317,5	12,14	87,55	99,70	$Pb_{1,05}S_{0,95}$

**Табл. 6. Химический состав гринокита**

Table 6. Greenockite chemical composition

Номера образцов	Содержания элементов, мас. %					Формула
	S	Fe	Zn	Cd	Сумма	
с-422001-35,0	22,44	0,74	3,14	75,35	101,68	$(Cd_{0,94}Zn_{0,07}Fe_{0,02})_{1,02}S_{0,98}$
с-422001-35,0	22,21	1,14	2,99	75,37	101,70	$(Cd_{0,94}Zn_{0,06}Fe_{0,03})_{1,03}S_{0,97}$
с-422001-94,0	22,58	0,0	5,67	70,91	99,16	$(Cd_{0,89}Zn_{0,12})_{1,01}S_{0,99}$
с-422001-94,0	22,69	0,0	6,82	70,48	99,98	$(Cd_{0,88}Zn_{0,14})_{1,02}S_{0,98}$
с-422001-94,0	21,87	0,0	1,89	74,80	98,57	$(Cd_{0,97}Zn_{0,03})_{1,01}S_{0,99}$

(см. рис. 7, а). Указанные прожилки галенита содержат включения пиритовых зёрен, а также включения сфалерита и гринокита.

Химический состав проанализированных зёрен галенита практически всегда характеризуется дефицитом серы и превышением содержания свинца по отношению к стехиометрическому составу (табл. 5).

Гринокит присутствует в ограниченном количестве. Кроме галенитовых прожилков, где минерал встречается в виде групп мелких зёрен, он образует одиночные зёрна или короткие самостоятельные прожилки в цементе фрамбоидальных пиритосфер раннего пирита (см. рис. 7). Химический состав гринокита представлен в табл. 6.

В составе прожилков и агрегатов позднего пирита отмечаются также мелкие и достаточно редкие включения пирротина, имеющие обычно линзовидную форму.

Кроме основных рудных минералов, в составе сульфидной массы фиксируются кварц-карбонатные прожилки и гнезда, агрегаты барита, мусковита, единичные зёрна рутила, а также монацит, флоренсит и др.

Итак, анализ новых геолого-геофизических данных позволил дать прогноз на выявление шести рудоносных зон колчеданно-полиметаллических руд, первая из которых обнаружена и изучена 37 скважинами поискового бурения (из них 14 скважин – рудные), осталь-

ные пять предстоит исследовать бурением (рис. 8). Рудоносные зоны в пределах участка Лимонитовый имеют прогнозируемую мощность до 100–120 м, протяжённость по простиранию от сотен метров до 3 км.

Рудная зона 1 колчеданно-полиметаллических свинцово-цинковых руд, локализованная в северном крыле антиклинали среди чёрных высокоуглеродистых сланцев, изучена на поисковых линиях РЛ-94, 92, 90, 88, 84, 80, 78, 76, 72, 68, 64, 56, 48, 44. Поисковыми профилями она вскрыта и прослежена по простиранию на 2400 м, по падению на 250–380 м (до глубины 300 м). Мощность рудной залежи 20–65 м, простирание субширотное, падение последовательно вначале крутое (70–85°) на север (РЛ-92, 78), далее на восток залежь выкручивается и на профиле РЛ-68 её падение изменяется от вертикального до крутого южного (см. рис. 8).

В целом колчеданные свинцово-цинковые руды участка Лимонитовый имеют отчётливо выраженные черты стратиформного гидротермально-осадочного образования.

Участок Лимонитовый весьма перспективен на обнаружение крупного месторождения, о чём свидетельствуют данные геолого-геофизических и буровых работ предшествующих и современных исследований. Прогноз на выявление месторождения отражен на геолого-поисковом плане участка Лимонитовый.

## Список литературы

1. Бровков Г. Н., Ли Л. В., Шерман М. Л., Корнев Т. Я. Геология и металлогения Енисейского рудного пояса. – Красноярск, 1985. – 292 с.
2. Боголепов К. В. Мезозойские и третичные отложения восточной окраины Западно-Сибирской низменности и Енисейского кряжа. – М. : Гостехиздат, 1961. – 152 с.
3. Саванович Л. Г., Сергеева Ж. И. Геологическая карта СССР масштаба 1 : 200 000. Серия Енисейская. Лист О-46-XVI. Объяснительная записка. – М. : Недра, 1970. – 58 с.
4. Прожогин Л. Г. Геологическая карта СССР масштаба 1 : 200 000. Лист О-46-XV / Мингео СССР. – 1974. – 76 с.

## References

1. Brovko G. N., Li L. V., Sherman M. L., Kornev T. Ya. Geologiya i metallogeniya Eniseiskogo rudnogo poyasa [Geology and metallogeny of the Yenisei ore belt], Krasnoyarsk, 1985, 292 p.
2. Bogolepov K. V. Mezozoiskie i tretichnye otlozheniya vostochnoi okrainy Zapadno-Sibirskoi nizmenosti i Eniseiskogo kryazha [Mesozoic and tertiary deposits of the eastern margin of the West Si-



- berian Lowland and the Yenisei Ridge], Moscow, Gostekhizdat Publ., 1961, 152 p.
3. Savanovich L. G., Sergeeva Zh. I. Geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1 : 200 000. Seriya Eniseiskaya. List O-46-XVI. Ob"yasnitel'naya zapiska [Geological map of the USSR scale 1: 200 000. The Yenisei series. Sheet O-46-XV. Explanatory note], Moscow, Nedra Publ., 1970, 58 p.
  4. Prozhogin L. G. Geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1 : 200 000. List O-46-XV [Geological map of the USSR scale 1 : 200 000. Sheet O-46-XV], 1974, 76 p.

## Авторы

### Сердюк Сергей Станиславович

доктор геолого-минералогических наук  
главный геолог<sup>2</sup>, профессор<sup>1</sup>  
geosss1@mail.ru

### Макаров Владимир Александрович

доктор геолого-минералогических наук, профессор  
директор<sup>1</sup>  
VMakarov@sfu-kras.ru

### Кириленко Валентина Антоновна

ведущий геофизик<sup>2</sup>  
geosss2@mail.ru

### Макаров Илья Владимирович

генеральный директор<sup>3</sup>  
sla.miv@mail.ru

### Муромцев Егор Алексеевич

аспирант<sup>1</sup>  
EgorMuromtsevSib@gmail.com

### Шведов Геннадий Иванович

доцент<sup>1</sup>  
g.shvedov@mail.ru

## Authors

### Sergey S. Serdyuk

DrSc  
Chef Geologist<sup>1</sup>, Professor<sup>2</sup>  
geosss1@mail.ru

### Vladimir A. Makarov

DrSc, Professor  
Director<sup>1</sup>  
VMakarov@sfu-kras.ru

### Valentina A. Kirilenko

Leading Geophysicist<sup>2</sup>  
geosss2@mail.ru

### Ilya V. Makarov

General Director<sup>3</sup>  
sla.miv@mail.ru

### Egor A. Muromtsev

PhD student<sup>1</sup>  
EgorMuromtsevSib@gmail.com

### Gennady I. Shvedov

Associated Professor<sup>1</sup>  
g.shvedov@mail.ru

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

<sup>2</sup> ООО «Сибирская компания разведки недр», г. Красноярск

<sup>3</sup> ООО «Сибгранитстрой», Красноярский край, с. Рыбное

<sup>1</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup> LLC Siberian Mineral Exploration Company, Krasnoyarsk, Russia

<sup>3</sup> LLC Sibgranitstroy, Rybnoye, Krasnoyarsk region, Russia

## **Методика изучения керна объектов золото-кварцевой формации с применением рентгеновской компьютерной томографии на примере месторождения Дразное (Республика Саха (Якутия))**

**X-ray computed tomography study for drill core of the Drazhnoe orogenic-type gold deposit (Sakha (Yakutia), Russian Federation)**

**Чикатуева В. Ю., Степанов Н. В.,  
Читалин А. Ф., Корост Д. В.**

**Chikatueva V. Yu., Stepanov N. V.,  
Chitalin A. F., Korost D. V.**

Месторождения золото-кварцевой формации имеют отчётливый структурный контроль и сопровождаются околорудным метасоматическим ореолом. Однако при детальном моделировании часто не совпадают структурные планы распространения богатых рудонасыщенных участков и зон метасоматитов; последние не всегда приурочены к разрывным нарушениям. Поэтому очень важно ещё на ранних этапах изучения месторождения надёжно определить характер распределения рудных зон, так как от этого зависит корректная постановка буровой программы и экономическая оценка объекта. Поставленную задачу можно решить методом рентгеновской компьютерной томографии (КТ) при изучении керна.

В работе представлена методология изучения полноразмерных образцов кернового материала золото-рудных месторождений с применением КТ. Объект исследования – образец керна, характеризующий центральную часть рудного тела месторождения Дразное (Тарыньское рудное поле, Республика Саха (Якутия)). КТ-сканирование образца проводилось на двух энергиях (80 и 130 кэВ) в томографе SIEMENS Somatom Perspective. Была получена детальная трёхмерная стереологическая модель керна, что позволило изучить распределение рудных минералов в объёме образца, выделить разновозрастные жильно-прожилковые тела, исследовать их морфологию и закономерности распределения в них рудной минерализации. В итоге предложена предварительная интерпретация структурных обстановок формирования рудной минерализации и прожилков.

Ключевые слова: рентгеновская компьютерная томография, штокверк, золото, месторождение Дразное.

Orogenic gold-quartz deposits have a clear structural control and are accompanied by wallrock metasomatic alteration. However, in detailed modeling of such deposits, there is often a mismatch between the structural plans for high-grade ore zone distribution and metasommatite zones, and the latter are not always associated with faults. This is explained by the evolution of the hydrothermal process and the pulsating nature of the development of the territory. In the early stages of the mineral deposit study, it is very important to reliably determine the distribution of ore zones, since the correct targeting of the drilling program and the economic deposit assessment depend on it. The problem can be solved using the method of X-ray computed tomography (CT) in the core study.

This paper presents the methodology of studying full-size core samples of gold deposits by using CT. A core sample characterizing the central part of ore body of Drazhnoye deposit (Tarynskoye ore field, Republic of Sakha (Yakutia)) was used as the study material. The sample studied was scanned by a SIEMENS Somatom Perspective tomograph at two energies (80 and 130 keV). As a result, a detailed three-dimensional stereological model of the core was obtained, which made it possible not only to study the distribution of ore minerals in the volume of the entire sample, but also to identify vein bodies of different ages, as well as to study their morphology and trace the distribution patterns of ore mineralization in them. Based on the study results, we can offer a preliminary interpretation of ore mineralization and vein formation sequence.

Keywords: computed X-ray tomography, stockwork, gold, Drazhnoye.

Для цитирования: Чикатуева В. Ю., Степанов Н. В., Читалин А. Ф., Корост Д. В. Методика изучения керна объектов золото-кварцевой формации с применением рентгеновской компьютерной томографии на примере месторождения Дразное (Республика Саха (Якутия)). Руды и металлы. 2021. № 4. С. 43–59. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10027.

For citation: Chikatueva V. Yu., Stepanov N. V., Chitalin A. F., Korost D. V. X-ray computed tomography study for drill core of the Drazhnoe orogenic-type gold deposit (Sakha (Yakutia), Russian Federation). Ores and metals, 2021, № 4, pp. 43–59. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10027.

*Введение.* Цифровые методы исследования стали неотъемлемой частью любых поисковых и геологоразведочных работ. В последние годы во всём мире набирает популярность метод рентгеновской компьютерной томографии (КТ), который в России часто связывают с технологией «Цифрового керна» [6]. Данный метод уже успешно применяется в нефтяной отрасли, активно используется при изучении морфологии и форм выделения минеральных индивидов сульфидной минерализации, благородных металлов, а также при изучении их пространственного распределения и взаимоотношения между ними [9, 11, 12]. Главная задача КТ – получить информацию о стереологическом строении объекта исследования, не нарушая его целостности, что даёт преимущество перед классическими методами исследования.

При поисках и разведке рудных месторождений важно ещё на ранних этапах изучения надёжно определить характер распределения рудных минералов и пространственные взаимоотношения как друг с другом, так и с геологической структурой месторождения в целом. Это имеет большое значение, поскольку от достоверности получаемых геологических данных и правильной геометризации рудных жил и прожилков зависят выбор параметров буровой разведочной сети и полнота оценки запасов месторождения. Одним из эффективных инструментов в решении такой задачи является КТ-сканирование полноразмерного керна, по результатам которого геологи могут изучать объёмную цифровую (стереологическую) модель образца, отражающую его структурно-минералогические особенности.

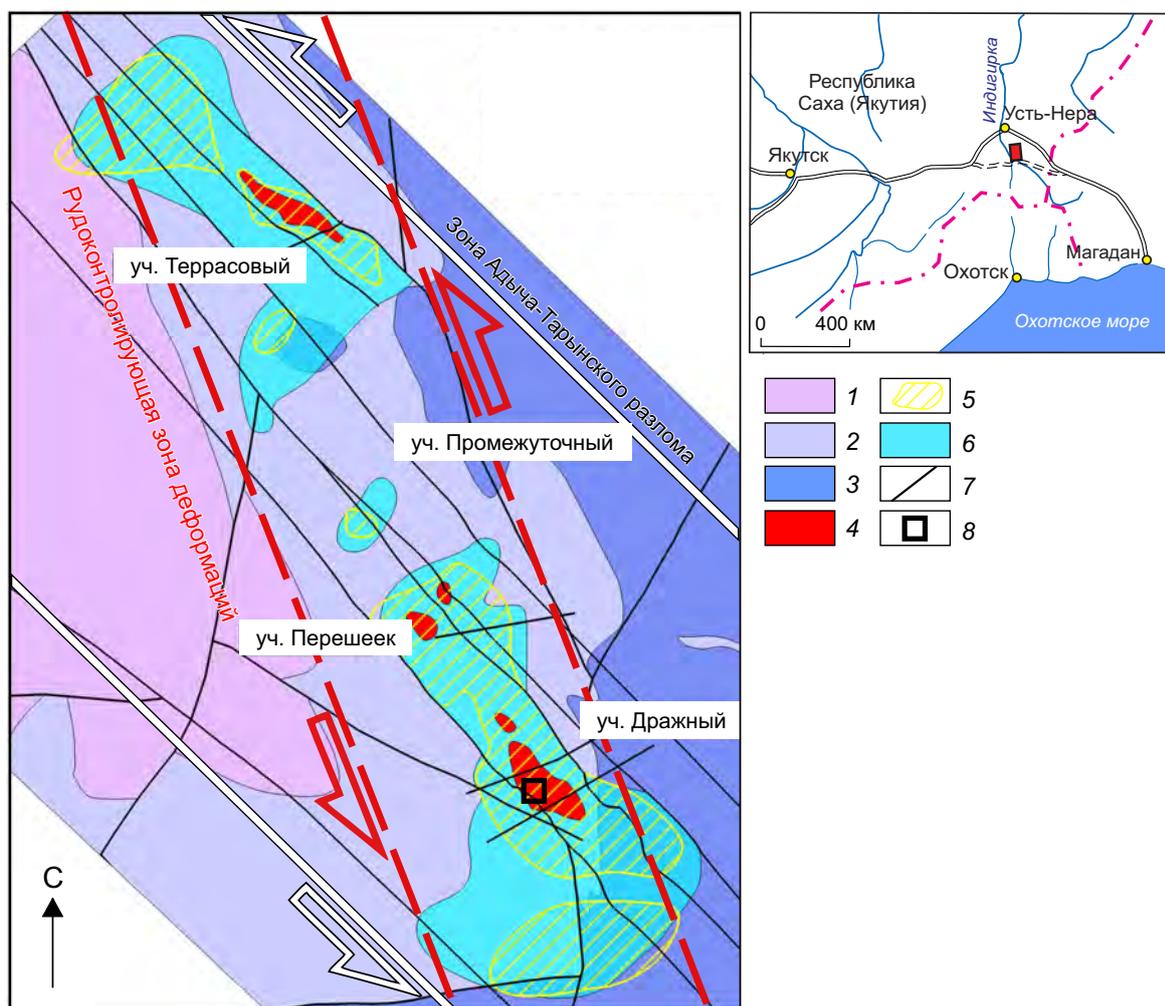
Главная цель данной работы – демонстрация методологии получения и изучения детальной цифровой модели керна с использованием рентгеновской компьютерной томографии.

*Материалы и методы исследования.* Материалом для исследования послужил образец керна, отобранный во время полевых работ на месторождении Дрожное (Республика Саха (Якутия)) золото-кварцевой формации (рис. 1)

[1, 5]. Изучаемая методом КТ половинка керна представлена тонкопереслаивающимися песчаниками и алевропесчаниками, пересечёнными прожилками кварцевого и кварц-карбонатного составов нескольких генераций, мощности и ориентировки. Видимая рудная минерализация в образце представлена пиритом и арсенопиритом; самостоятельных выделений золота не наблюдалось. Диаметр керна составляет 63,5 мм (НҚ). По результатам секционного пробирного анализа половинки керна (секция – 1 м) содержание золота в интервале отбора образца составляет 8,82 г/т. Предварительная подготовка образца для КТ-съёмки не требуется.

Прозрачно-полированные шлифы изучены в лаборатории рудной микроскопии кафедры геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых МГУ им. М. В. Ломоносова. Использованы микроскопы Axioscop 40A-Pol (Carl Zeiss) и Полам Р-312. Уточнение составов и определение микропримесей в минералах проведено при помощи электронно-зондовых исследований, выполненных на кафедре петрологии МГУ им. М. В. Ломоносова на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6480LV с вольфрамовым термоэмиссионным катодом, оснащённым энергодисперсионным спектрометром INCA X-Maxn (площадь активной зоны кристалла 50 мм<sup>2</sup>, сверхтонкое окно АТW-2) с разрешением 124 эВ (Mn K $\alpha$ , 20 kV).

*Основы и технология КТ-съёмки.* Технология КТ-съёмки основана на взаимодействии рентгеновского излучения с веществом. Большинство рентгеновских томографов имеют конусно-лучевую конфигурацию, в которой рентгеновский луч исходит из источника излучения и попадает на детектор рентгеновских лучей [2, 7, 11]. Объект исследования устанавливается между источником излучения и детектором, фиксирующим уровень поглощённого излучения. Получаемое на детекторе двумерное изображение, характеризующее интенсивность рентгеновского излучения после его прохождения через исследуемый объект, называется теневой проекцией. В процессе съёмки в зависимости от технических особенностей



**Рис. 1. Схематическая структурно-геологическая карта месторождения Дразное:**

1 –  $T_3$ , верхняя толща (алевролиты с прослоями песчаников); 2 –  $T_3$ , нижняя толща (алевролиты, редкие прослои гравелитов); 3 – переслаивание песчаников и алевролитов; 4 – рудные тела; 5 – зоны пиритизации; 6 – кварцевый штокверк; 7 – разрывные нарушения; 8 – расположение участка Дразный

**Fig.1. Sketch structural and geological map of the Drazhnoye deposit:**

1 –  $T_3$ , upper strata (sandstone-banded siltstones); 2 –  $T_3$ , lower strata (siltstones, rare interbeds of gravelstones); 3 – interbedding of sandstones and siltstones; 4 – orebodies; 5 – pyritization zones; 6 – quartz stockwork; 7 – faults; 8 – ore-controlling deformation zone

томографа, производится вращение либо самого объекта исследования вокруг своей оси, либо источника излучения, в результате чего формируется набор теневых проекций с различных углов обзора, с точной пространственной привязкой.

При использовании КТ для последующей корректной обработки получаемых данных важной является информация о процессах, протекающих в результате ослабления излучения. В случае с изучением геологических объектов применяются источники излучения



с разбросом энергии от 80 до 130 кэВ. В зависимости от энергии излучения преобладают различные механизмы, ослабляющие рентгеновское излучение при его прохождении через объект исследования. Так, при съёмке на низких энергиях (50–80 кэВ) преобладает фотоэлектрическое поглощение, при котором входящий рентгеновский фотон выбивает внутренний электрон, занимая внутреннюю оболочку атома, что приводит к переходу электрона с внешней оболочки на внутреннюю. Показатель поглощения среды при фотоэлектрическом поглощении будет пропорционален  $Z^{4-5}$ , где  $Z$  – атомное число поглощающего материала. При КТ-съёмке на высоких энергиях (> 100 кэВ) протекает явление комптоновского рассеяния, при котором рентгеновские фотоны взаимодействуют только с внешним электроном, передавая ему часть своей энергии и изменяя направление своего движения. Показатель поглощения среды при комптоновском рассеянии будет пропорционален  $Z$  [8]. В результате такой разницы эффектов съёмка на больших энергиях рентгеновского излучения (от 130–140 кэВ) несёт информацию в основном о плотности объекта, измерение на низкой энергии (80–90 кэВ и ниже) содержит информацию о  $Z_{eff}^*$  [2, 10].

За счёт эффектов рассеяния и поглощения рентгеновского сигнала (рентгеновской абсорбции) ослабление излучения на получаемых теневых проекциях проявляется в виде изменения яркости, которое, как правило, выражается в распределении оттенков серого. Часто объектам большей плотности соответствуют светлые оттенки серого, меньшей – тёмные.

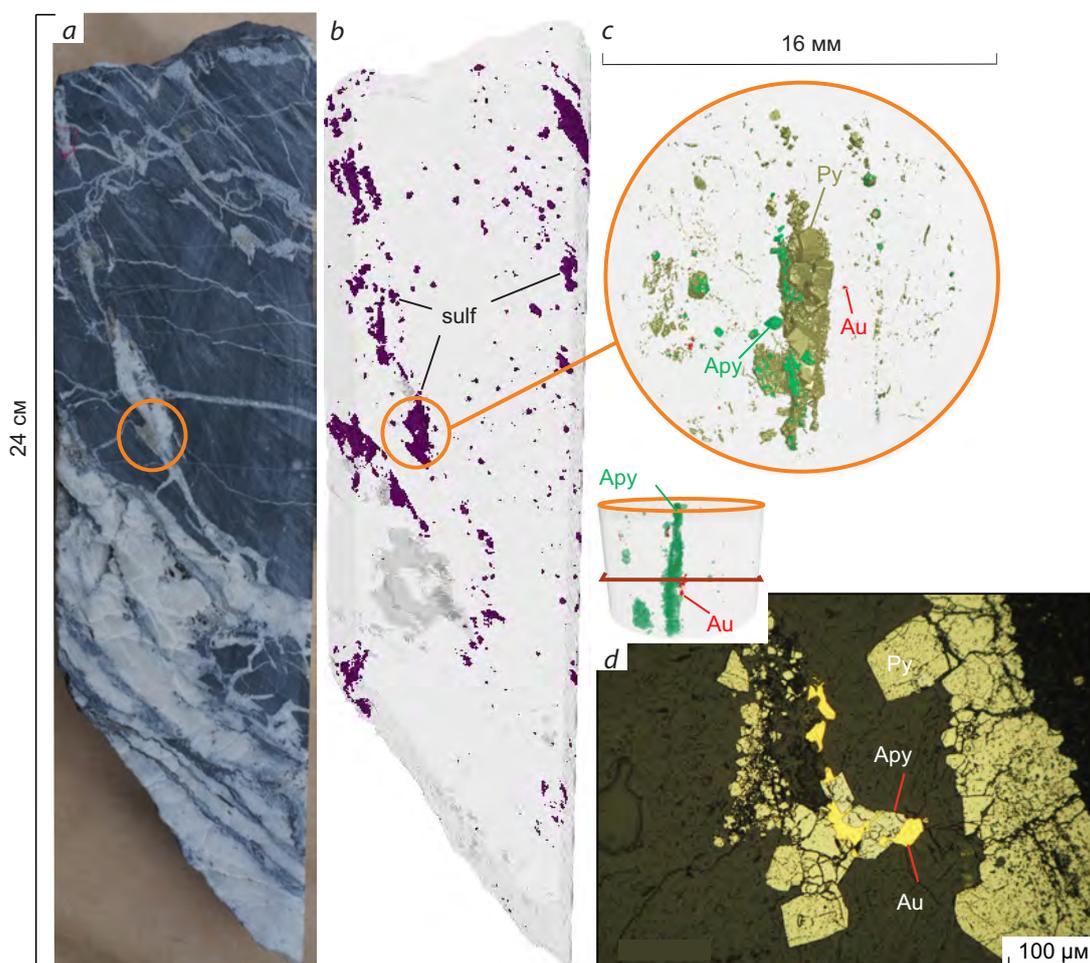
После получения первичных данных (набора теневых проекций) осуществляется их реконструкция, заключающаяся в пересчёте набора полученных рентгенограмм в набор плотностных сечений, отображающих внутреннюю

структуру образца. В ходе процедуры реконструкции интенсивность излучения на исходных рентгенограммах переводится в КТ-плотность, разрешение которой зависит от компьютерной системы, выполняющей реконструкцию [2]. Большинство современных систем используют 16-битную шкалу, позволяющую градуировать КТ-плотность в диапазоне от 0 до 65 535.

На сегодняшний день для детального изучения минеральных индивидов съёмка геологических образцов в рудной геологии производится на одной энергии (высокой). Для получения детальной стереологической модели геологических объектов, как правило, осуществляется КТ-сканирование образцов на специализированных томографах с разрешением до 0,5 мкм (например, SkyScan-1172 компании Bruker microCT, Бельгия). Для этого выпиливаются образцы либо цилиндрической, либо кубической формы, диаметр (или диагональ) которых не превышает 2 см. Время высокодетального КТ-сканирования зависит от выбранного разрешения съёмки и варьирует от первых единиц до десятков часов. Съёмка полноразмерных образцов размером более 5 × 5 см часто имеет невысокое разрешение от 50 до 250 мкм и носит, скорее, «прицельный характер» в целях выбора наиболее представительных мест для дальнейшего изготовления небольших цилиндров или кубиков для КТ-сканирования с высоким разрешением, или изучения микрокомпонентов породы. В качестве примера ниже приведены результаты ранее выполненных исследований керна методом рентгеновской компьютерной томографии (рис. 2).

Как видно из рис. 2, наиболее подробной объёмной геологической информацией обладает стереологическая модель, полученная при съёмке небольшого образца с разрешением 4,5 мкм. Тем не менее, при анализе структурно-минералогических особенностей рудных месторождений стереологические модели образцов, размер которых не превышает 2 × 2 см, не в полной мере представительны. Для объёмного изучения пространственных и возрастных взаимоотношений минеральных и

\* В качестве характеристики состава обычно используется параметр  $Z$ , представляющий средневзвешенное атомное число изучаемого объекта. В геологии изучают минералы, состоящие из нескольких химических элементов, тогда под  $Z$  принимается эффективный атомный номер ( $Z_{eff}$ ).



**Рис. 2. Результаты изучения половинки керна методом рентгеновской компьютерной томографии [3, 5]:**

*a* – фото образца, представленного алевропесчаниками с кварцевыми и кварц-карбонатными прожилками; *b* – изображение стереологической модели керна, полученное в результате сканирования керна с разрешением съёмки 100  $\mu\text{m}$ : фиолетовый цвет – рудная минерализация (sulf), оранжевый кружок – место изготовления цилиндра для детальной КТ-съёмки, см. рис. 2, *c*; *c* – картина распределения зёрен арсенопирита и золота в цилиндре диаметром 16 мм, полученная в результате КТ-съёмки с разрешением 4,5  $\mu\text{m}$ , красная линия – плоскость среза шлифа; *d* – фото рудных минералов под микроскопом в шлифе, указанном на рис. 2, *c* (Py – пирит, Apy – арсенопирит, Au – золото)

**Fig. 2. Study results for core half by X-ray computed tomography [3, 5]:**

*a* – photo of the sample represented by silt sandstone with quartz and quartz-carbonate veinlets; *b* – image of the stereological core model obtained through core scanning at 100  $\mu\text{m}$  resolution, ore mineralization (sulf) is colored violet, orange circle indicates the location of taking a cylinder sample for detailed CT imaging, see Fig. 2, *c*; *c* – pattern of arsenopyrite and gold grain distribution in 16 mm diameter cylinder obtained in CT imaging at 4.5  $\mu\text{m}$  resolution, the red line shows the plane of the section cut; *d* – microscope-generated photo of ore minerals in polished section shown in Fig. 2, *c* (Py – pyrite, Apy – arsenopyrite, Au – gold)

структурных элементов в масштабах месторождения предпочтительнее использовать детальную цифровую модель полноразмерного керна, отобранного из скважин, пройденных на нескольких ключевых участках объекта. Кроме того, немаловажным фактором является высокая производительность сканирования, так как при больших объёмах каменного материала съёмка небольшого образца в течение нескольких часов будет долгим и дорогостоящим процессом. На основании вышеизложенного основной задачей данной работы стало получение подробной и достоверной стереологической модели полноразмерного образца керна за приемлемый период времени, а также демонстрация методики анализа и интерпретация получаемых данных.

*КТ-съёмка полноразмерного образца.* Для решения поставленной задачи было выполнено последовательное КТ-сканирование образца керна на двух энергиях – низких (80 кэВ) и высоких (130 кэВ). Исследование проводилось на томографе SIEMENS Somatom Perspective (Siemens, Германия). На нём установлены детектор из «ультрабыстрой керамики» (UFC – Ultra Fast Ceramics) и высокопроизводительная рентгеновская трубка DURA 688 MV, которые позволяют сканировать керн со скоростью 1 метр в минуту при максимальном разрешении 97,5 мкм для диаметра 50 мм. Напряжение на трубке от 80 до 130 кэВ, сила тока 200 мА. Исследуемый образец керна помещался в пластиковую трубу, заполненную кварцевым песком, и располагался в томографе в горизонтальной плоскости. Съёмка велась в спиральном режиме с разрешением 130 мкм.

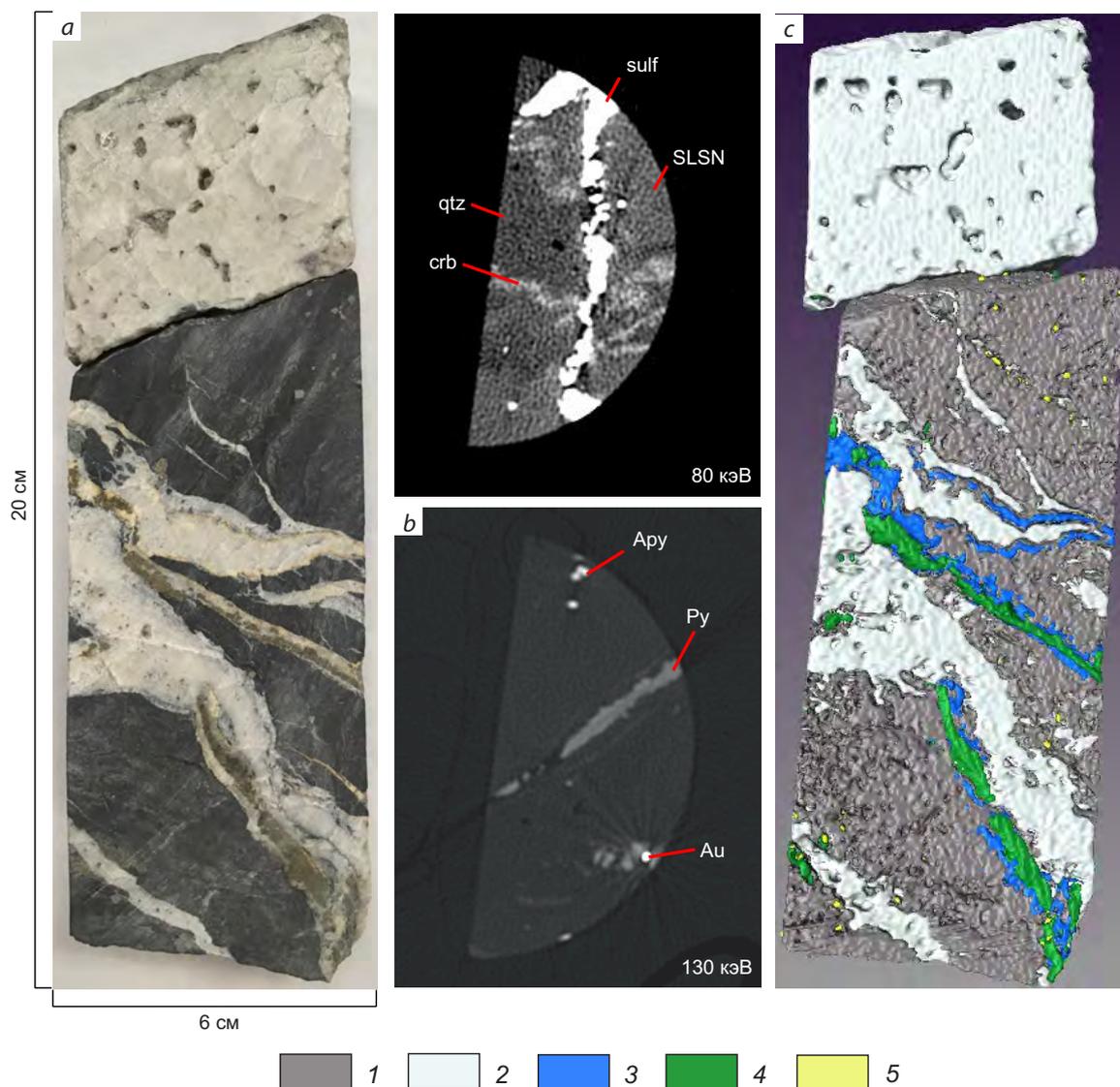
В результате сканирования образца на двух энергиях были получены два первичных набора рентгеноплотностных срезов (стека данных) с проявлением разных эффектов поглощения рентгеновского излучения. Результатом любого рентгенотомографического измерения являются стеки дискретных изображений, в которых яркость каждой точки может определяться двумя физическими параметрами материала объекта: плотностью и эффективным атомным номером. На рентгено-

плотностных срезах, полученных при съёмке на низкой энергии, высокой рентгеновской контрастностью обладают минералы со схожими плотностными свойствами, но различным  $Z_{eff}$  – это кварц, карбонатные минералы и алевропесчаники (рис. 3, *b*). Наиболее ярким оттенком (белым) отражена сульфидная минерализация без разделения на минеральные индивиды. На срезах, полученных при съёмке на высокой энергии, наибольшая рентгеновская контрастность проявлена у минералов с высокой плотностью – пирита, арсенопирита и золота. Жильные минералы и вмещающие алевропесчаники на данных срезах характеризуются единым оттенком серого. В результате при обработке двух наборов рентгеноплотностных срезов получены стереологические модели как для жильных, так и для рудных минералов (см. рис. 3, *c*).

Обработка и визуализация стеков данных проводились в различных специализированных компьютерных приложениях, таких как CTan и DataViewer (Bruker Corporation), Avizo 3D (Thermo Fisher) и т. д. Каждое приложение демонстрирует пространственное распределение выделенных рентгеноконтрастных компонентов и, в зависимости от поставленных задач, имеет своё преимущество в работе со стеками данных. Заверка получаемых стереологических моделей осуществлялась путём прицельного выпиливания пластин для изготовления прозрачно-полированных шлифов и их изучения под микроскопом (рис. 4).

*Анализ и интерпретация результатов КТ-сканирования.* Работа с результатами КТ-сканирования начинается с детального анализа рентгеноплотностных срезов в градации серого. Такой анализ выполняется в целях выявления слабоконтрастных рентгеноплотностных фаз\*, которые могут нести важную геологическую информацию, однако используемые

\* Рентгеноконтрастная фаза используется применительно к смеси компонентов, которые при данных условиях съёмки имеют близкие характеристики рентгеновского поглощения. Возможность их разделения как самостоятельных минеральных фаз появляется в процессе съёмки при более высоком разрешении.

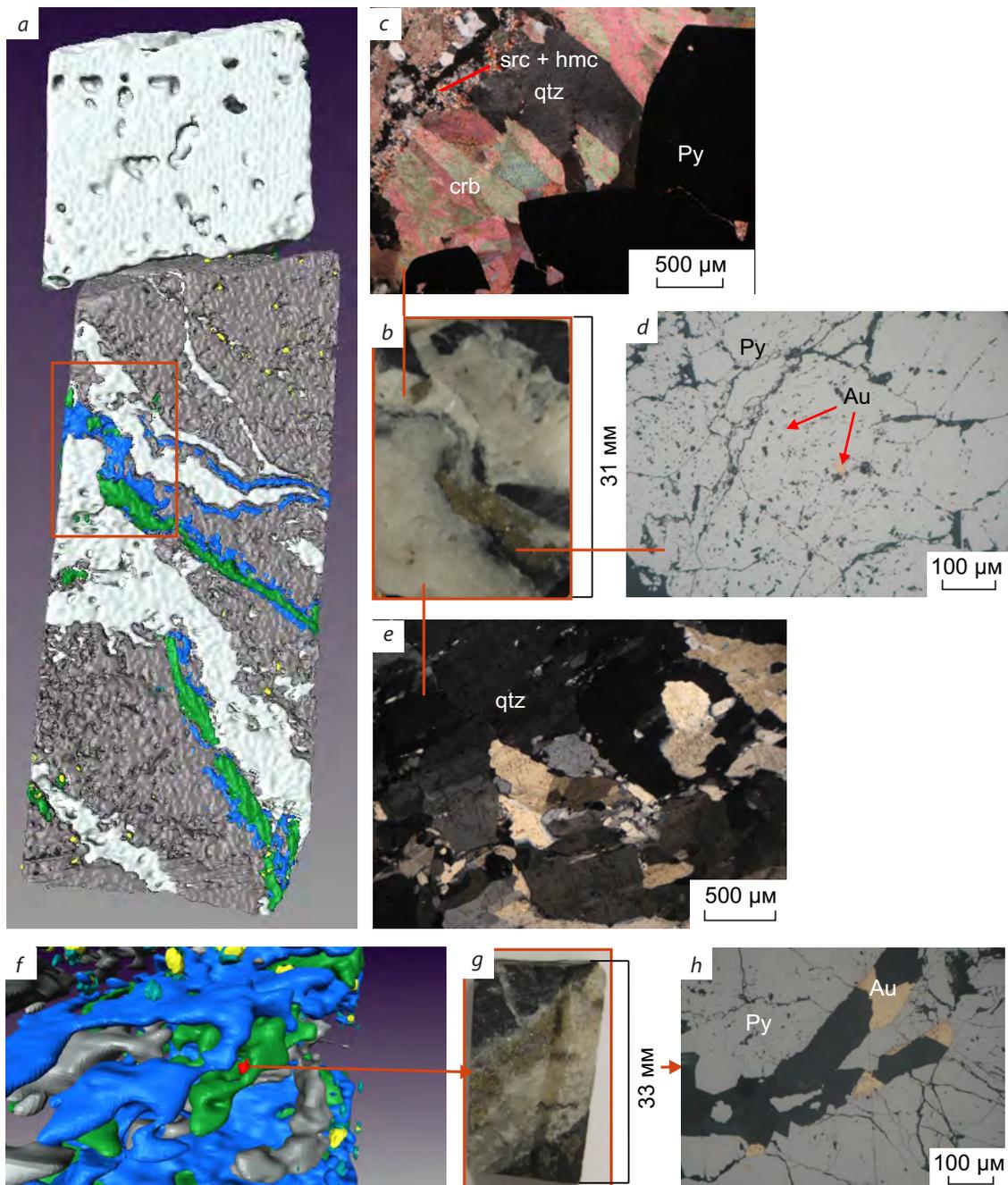


**Рис. 3. Изучаемый образец ядра и его стереологическая модель:**

*a* – фото образца; *b* – рентгеноплотностные срезы, полученные в результате съёмки на двух энергиях и дальнейшей специальной обработки данных КТ (qtz – кварц, crb – карбонаты, sulf – сульфиды, SLSN – алевропесчаник); *c* – изображение стереологической модели ядра, визуализация выполнена в программе Avizo 3D (1 – алевропесчаники, 2 – кварц, 3 – карбонаты, 4 – пирит, 5 – арсенопирит); остальные усл. обозн. см. рис. 2

**Fig. 3. Core sample studied and its stereological model:**

*a* – sample photo; *b* – X-ray density sections obtained as a result of imaging at two energies and further special processing of CT data (qtz – quartz, crb – carbonate, sulf – sulfides, SLSN – silt sandstone); *c* – stereological core model, Avizo 3D software was used for visualization (1 – silt sandstone, 2 – quartz, 3 – carbonate, 4 – pyrite, 5 – arsenopyrite); see Fig. 2 for other legend



**Рис. 4. Стереологическая модель изучаемого образца и фотографии изготовленных из него прозрачно-полированных шлифов:**

*a, f* – стереологические модели; *b, g* – участки изготовления шлифов; *c–e, h* – фото шлифов; ser – серицит, hmc – минералы группы гидрослюд; остальные усл. обозн. см. рис. 2, 3

**Fig. 4. Stereological model of the sample studied and photos of polished sections prepared from it:**

*a, f* – stereological models; *b, g* – locations of polished section preparation; *c–e, h* – photos of polished sections; ser – sericite, hmc – hydromica minerals; see Figs. 2, 3 for other legend

компьютерные алгоритмы не всегда могут их фиксировать и визуализировать (рис. 5, *a*).

На полученных срезах выделены следующие рентгеноконтрастные компоненты: кварц, карбонатные минералы, пирит, арсенопирит и золото (см. рис. 3, *b*, *c*). Зёрна пирита, образующие лентовидные скопления в кварц-карбонатных прожилках, имеют небольшое различие в поглощении. Для центральной области скопления зёрен минерала характерны более высокоабсорбционные характеристики, чем у зёрен, расположенных по периферии (см. рис. 3, *b*; см. рис. 5, *a*). Такая неоднородность указывает либо на различный химический состав зёрен минерала, либо на различные плотностные характеристики. Согласно исследованию минерального состава руд на месторождении Дрожное в золотоносных кварц-карбонатных прожилках присутствуют две генерации пирита, которые отнесены к полисульфидной стадии гидротермально-метасоматического этапа [4]. Зёрна более ранней генерации минерала Py-2 (1) на рис. 5 имеют псевдодлиннопризматическую форму выделения и являются результатом процесса замещения раннего пиритина пиритом при повышении фугитивности серы  $fS_2$ . В данном пирите не выявлена примесь As, но присутствуют примеси Ni (0,19–1,03 мас. %) и Co (~ 0,5 мас. %) (таблица).

Кроме того, во всех изученных шлифах золота в виде включений наблюдается исключительно в данной разновидности пирита. Выделения поздней генерации пирита Py-2 (2) (см. рис. 5) обрастают ранний псевдодлиннопризматический пирит и содержат в своём химическом составе примесь мышьяка от 1 до 3,36 мас. %. Различие в химическом составе зёрен минерала напрямую влияет на один из его физических параметров –  $Z_{eff}$ , который в данном случае изменяется с 21,7 (FeS<sub>2</sub>) на 21,2 (FeS<sub>2</sub> (+As)), а наличие включений золота в одной из генераций пирита может повлиять на показатель поглощения среды, пропорционального  $Z$ . В результате на рентгеноплотностных срезах лентовидные скопления пирита имеют неоднородные абсорбционные характеристики: резкий переход от более тёмного оттенка серого в центральной

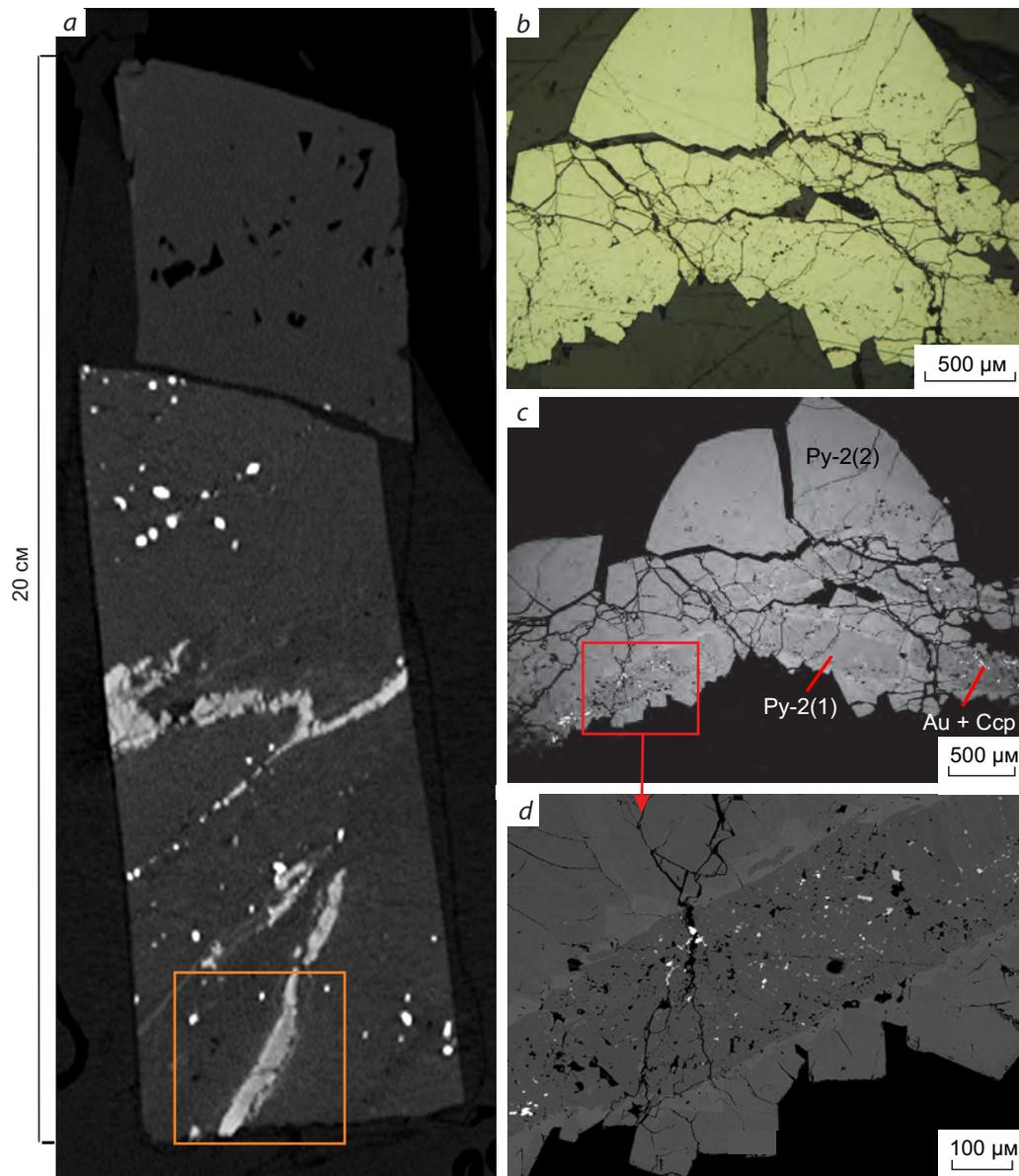
области скопления к более светлому по периферии.

Выявленное различие рентгеновской абсорбции, выраженное в оттенках серого у пирита различных генераций, слабоконтрастное. Тем не менее, при работе со стереологическими моделями в специализированных программных приложениях есть возможность выделить данные скопления пирита (слабоконтрастную рентгеноплотностную фазу) и присвоить им уникальный цвет. Таким образом, полученная информация имеет чёткую пространственную привязку, отображена на стереологической модели и в дальнейшем будет учитываться при детальном структурно-минералогическом исследовании цифровой модели зерна.

Далее был выполнен детальный структурно-минералогический анализ визуализированной цифровой модели зерна (рис. 6). На стереологической модели установлены прожилки, имеющие кварцевый, кварц-карбонатный и карбонат-кварц-сульфидный составы. Морфология прожилков различна – от простых прямолинейных до извилистых и ветвящихся. Наиболее ранние образования представлены кулисно расположенными кварцевыми прожилками по трещинам отрыва мощностью до 0,3–0,4 мм. Они имеют секущее положение к слоистости (угол > 60°).

В центральной части цифровой модели зерна установлено пересечение ранних кварцевых прожилков более мощным кварц-карбонатным, имеющим  $Z$ -образную морфологию (см. рис. 6, *a*, розовая линия). При его изучении под микроскопом обнаружены структуры дислокационного скольжения (волнистое погасание) и рекристаллизации (см. рис. 4, *e*). Карбонатные минералы приурочены к микротрещинам, пересекающим зёрна более раннего кварца.

Прожилки карбонат-кварц-пиритового состава пересекают под различными углами ранее образованные кварц-карбонатные кварцевые прожилки и частично наследуют их морфологию (см. рис. 6, *b*). Выделения карбонатных минералов в карбонат-кварц-пиритовых прожилках не деформированы, что ука-



**Рис. 5. Анализ рентгеноплотностных срезов:**

*a* – изучаемый образец в градации серого, оранжевый квадрат – участок срастания раннего (Py-2 (1)) и позднего пирита с примесью As (Py-2 (2)) в золотоносном кварц-карбонатном прожилке; *b* – фото скоплений пирита различных генераций в шлифе под микроскопом; *c* – фото шлифа в отражённых электронах; *d* – детализация участка, выделенного красным квадратом; Ccp – халькопирит; остальные усл. обозн. см. рис. 2, 3

**Fig. 5. Analysis of X-ray density sections:**

*a* – image of the sample studied (gray color shades), orange square shows an area of intergrowth of early (Py-2 (1)) and late pyrite with As traces (Py-2 (2)) in gold-rich quartz-carbonate veinlet; *b* – photo of pyrite clusters (various generations are present) in microscopically studied polished section; *c* – reflected electron polished section photo; *d* – detalization of the area shown as a red square; Ccp – chalcopyrite; see Figs. 2, 3 for other legend

### Состав пирита золотоносных кварц-карбонатных прожилков по данным электронно-зондового анализа (мас. %)

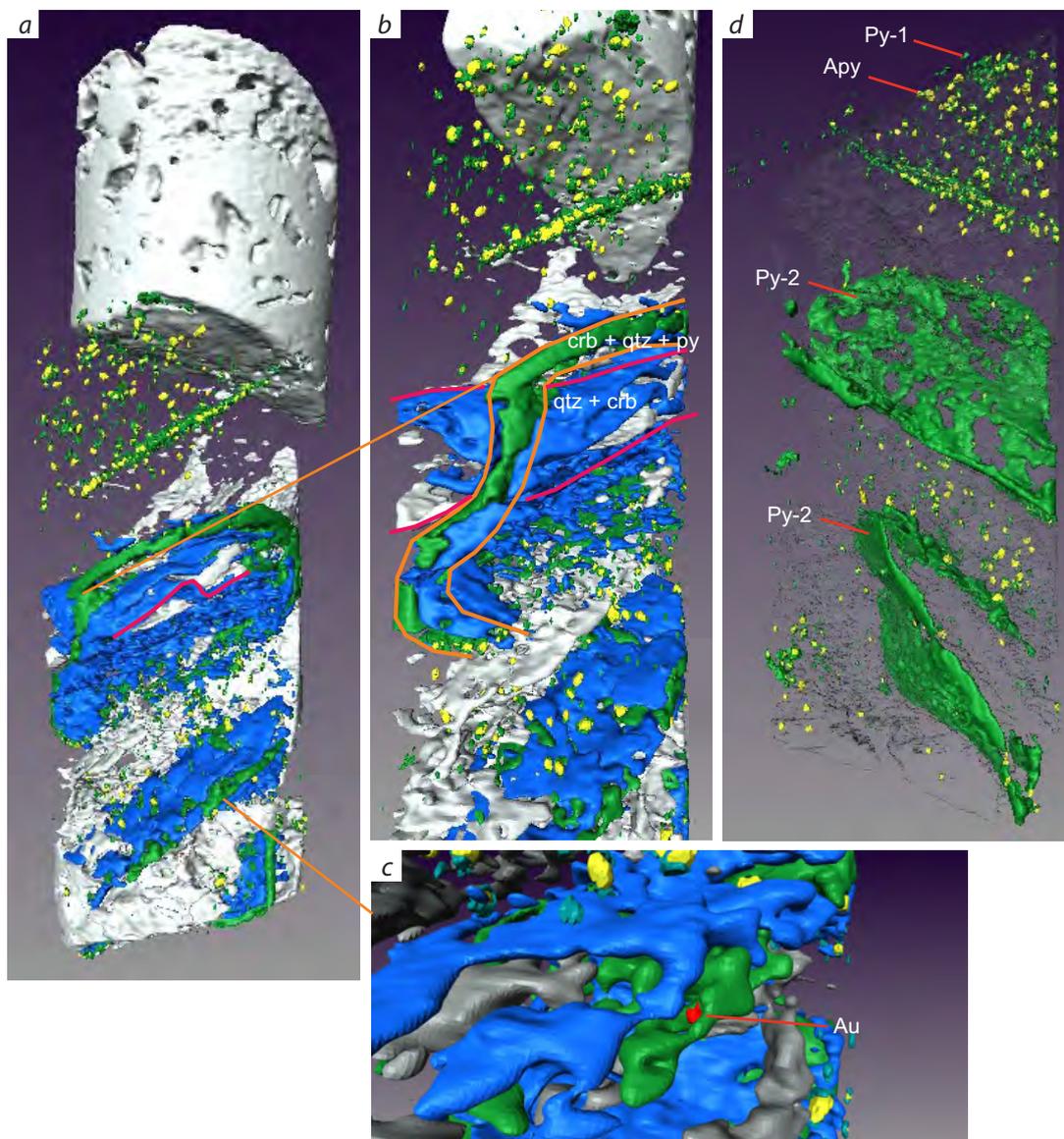
Pyrite composition of gold-rich quartz-carbonate veinlets, based on electron probe analysis data (weight %)

Номера замера	S	Fe	As	Cu	Co	Ni	Sb	Сумма	Генерация пирита
1	51,07	45,84	3,36					100,26	Py-2 (2)
2	51,39	45,94	2,1					99,44	Py-2 (2)
3	53,27	46,73						99,97	Py-2 (1)
4	53,5	46,71						100,17	Py-2 (1)
5	51,46	46,14	3,02					100,62	Py-2 (2)
6	53,34	46,49						99,82	Py-2 (1)
7	53,2	46,66						99,84	Py-2 (1)
8	51,63	46,17	2,55					100,35	Py-2 (2)
9	51,68	46,28	2,14					100,1	Py-2 (2)
10	50,81	45,55	2,92					99,28	Py-2 (2)
11	52,96	46,27						99,23	Py-2 (1)
12	51,2	45,7	2,72					99,63	Py-2 (2)
13	51,51	45,81	1,6					98,92	Py-2 (2)
14	51,78	45,83	1,9					99,51	Py-2 (2)
15	52,1	45,07	1,23					98,4	Py-2 (2)
16	52,04	45,14	2,63					99,81	Py-2 (2)
17	52,47	45,45			0,4			98,32	Py-2 (1)
18	52,37	45,81			0,35	0,19		98,71	Py-2 (1)
19	51,35	45,25			0,44	0,53		97,57	Py-2 (1)
20	51,34	45,03		0,17	0,31	0,36	0,04	97,26	Py-2 (1)
21	51,69	44,88		0,05	0,43	1,03		98,09	Py-2 (1)

зывает на их образование на более поздних этапах. Пиритовая минерализация более поздняя по отношению к кварцу и карбонату, о чём говорит их локализация вдоль наиболее ослабленных направлений, которыми являются зальбанды прожилков (см. рис. 4, *b*, *c*). Пирит представлен двумя генерациям, одна из которых содержит включение золота. Арсенопирит в данных прожилках встречается в виде единичных зёрен.

Мощная жила кварцевого состава занимает текущее положение ко всем описанным выше прожилкам и не содержит какой-либо сульфидной минерализации. Пустоты, проявленные на стереологической модели жилы, отражают её друзовидную текстуру (см. рис. 6, *a*).

Сульфидная минерализация наблюдается как во вмещающих породах, так и в прожилках. Пирит и арсенопирит, локализованные в терригенно-осадочных толщах, представлены самостоятельными выделениями и, на первый взгляд, неравномерно распределены по породе (см. рис. 6, *d*). Однако при повороте стереологической модели вокруг вертикальной оси проявляются плоскостные направления в распределении зёрен этих минералов (микротренды), что указывает на наличие ослабленных зон в породе (микропроницаемость или микротрещиноватость). Микротренды имеют как текущее, так и согласное положение к слоистости и прожилкам. Описанные выше выделения пирита и арсенопирита, согласно



**Рис. 6. Стереологическая модель изучаемого образца керна:**

*a* – стереологическая модель керна (без алевропесчаников); *b* – участок пересечения кварц-карбонатного прожилка (qtz + crb) прожилками карбонат-кварц-пиритового состава (crb + qtz + py); *c* – золото в прожилке кварц-карбонатного состава; *d* – арсенопирит и пирит ранней генерации (Py-1) образуют неравномерные скопления зёрен в алевропесчаниках, пирит более поздней генерации (Py-2) образует лентовидные скопления в кварц-карбонатных прожилках; остальные усл. обозн. см. рис. 2, 3

**Fig. 6. Stereological model of the core sample studied:**

*a* – stereological core model (no silt sandstone); *b* – area of quartz-carbonate (qtz + crb) veinlet intersection by carbonate-quartz-pyrite (crb + qtz + py) veinlets; *c* – gold in quartz-carbonate veinlet; *d* – arsenopyrite and early pyrite (Py-1) form irregular grain clusters in silt sandstone, later pyrite (Py-2) forms ribbon clusters in quartz-carbonate veinlets; see Figs. 2, 3 for other legend

минералогическим исследованиям, относятся к ранней стадии гидротермально-метасоматического этапа [4].

Пирит, слагающий лентовидные скопления зёрен в карбонат-кварц-сульфидных прожилках, образовался позднее, и по данным изучения шлифов и рентгеноплотностных срезов представлен двумя генерациями, охарактеризованными ранее (см. рис. 5). В одном из прожилков карбонат-кварц-сульфидного состава, расположенного в нижней части цифровой модели ядра, установлено самостоятельное выделение золота, локализованное по трещинам в пирите (см. рис. 4, *f-h*). Золотины также выявлены во вмещающих породах, где минерал тяготеет к зонам повышенной концентрации пирита и арсенопирита.

*Интерпретация полученных результатов.* По результатам визуального изучения ядра, его стереологической модели и изготовленных из него прозрачно-полированных шлифов все выделенные жильные минералы и рудная минерализация были разделены на генерации (рис. 7, *a-d*). Каждой генерации минерала на стереологической модели присвоен определённый цвет. С учётом всех выявленных в образце ядра структурных и минералогических особенностей, а также знаний о минеральном составе руд и структуре золоторудного месторождения Дражное [1, 3–5], предложена предварительная структурно-минералогическая интерпретация.

*Этап 1 (дорудный).* На первом этапе формировались пологие и крутопадающие прожилки кварцевого состава ( $qtz_1$ ) (см. рис. 7). Кварц, вероятно, заполнял соскладчатые трещины скола и отрыва, образование которых происходило в надвиговом поле напряжений (в координатах образца).

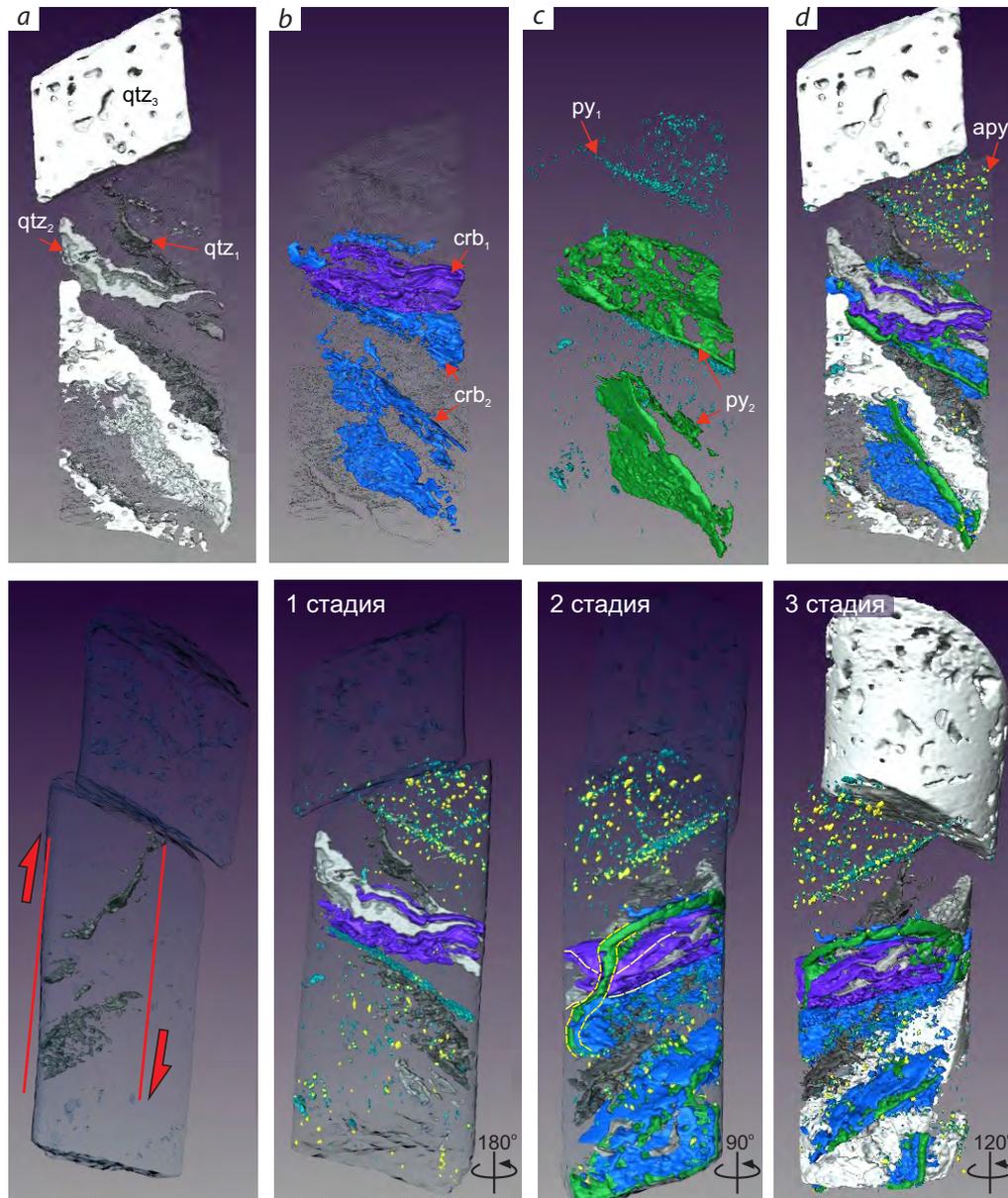
*Этап 2 (рудный).* На первой стадии рудного этапа продолжалось формирование кварцевых прожилков ( $qtz_2$ ). Несколько позже, в процессе прогрессивной деформации, начали отлагаться ранние карбонатные минералы ( $carb$ ) по новообразованной системе трещин и, возможно, ранние пирит ( $py_1$ ) и арсенопирит ( $apy$ ) в терригенно-осадочных толщах. На цифровой модели ядра отчётливо прослеживается

зависимость локализации пирита и арсенопирита от деформационной анизотропии осадочной толщи. Минералы тяготеют к ослабленным зонам во вмещающих породах (кливаж, послойные срывы, контакты разнородных сред и т. д.), а также заполняют инфраструктуру микротрещин (микроструктурные ловушки). Возможно, отложение минеральной ассоциации первой стадии второго этапа также происходило в надвиговом поле напряжений.

На второй стадии второго этапа формировались золотоносные карбонат-кварц-сульфидные прожилки. Рудоносные структуры пересекают ранние кварцевые и кварц-карбонатные прожилки, что, вероятно, может быть связано с формированием первых в сменившемся поле напряжений. На результативных стереологических моделях, представленных на рис. 7, *a-d*, рудоносные прожилки включают пирит второй генерации ( $py_2$ ). По результатам минералогических исследований и детального изучения рентгеноплотностных срезов пирит данной генерации на стереологической модели объединяет две его разновидности: ранний, с включениями золота ( $Py-2$  (1)), и поздний ( $Py-2$  (2)), с примесью мышьяка до 3,36 мас. % (см. рис. 5; см. таблицу). Завершает вторую стадию второго этапа отложение золота. Самостоятельные выделения золота приурочены к зонам повышенных концентраций раннего пирита и арсенопирита в терригенно-осадочных толщах, а также локализованы в прожилках кварц-карбонат-сульфидного состава. Выявленное золото в алевропесчаниках указывает на наличие в этих породах микроструктурных трендов, по которым осуществлялось движение золотоносных гидротермальных растворов.

*Этап 3 (пострудный).* На заключительном, третьем, этапе формировались пологие жилы (в координатах образца) крупнокристаллического кварца третьей генерации ( $qtz_3$ ), секущие ранее образованные структуры.

*Выводы.* В результате выполненной работы предложены методология комплексного изучения ядра методом рентгеновской компьютерной томографии, а также последовательность обработки получаемой информации и



**Рис. 7. Этапы и стадии минералообразования в изучаемом образце керна:**

*a–d* – стереологические модели минералов, разделённых на генерации (подстрочным индексом указана генерация); в нижнем ряду приведена структурно-минералогическая интерпретация керна (красными стрелками показана кинематика зоны кулисных прожилков, в правых нижних углах даны углы поворота стереологической модели вокруг своей оси); остальные усл. обозн. см. рис. 2, 3

**Fig. 7. Mineral formation stages in the core sample studied:**

*a–d* – stereological models of each mineral divided into generations (subscript denotes generation); the lower side depicts structural and mineralogical core interpretation (red arrows show kinematics of imbricate veinlet zone, right lower angles show stereological model angle of rotation around its axis; see Figs. 2, 3 for other legend

её предварительная структурно-минералогическая интерпретация. По данным КТ-сканирования получена цифровая модель ядра, отражающая детальную трёхмерную геолого-структурную информацию. На основании изучения рентгеноплотностных срезов, визуализированной цифровой модели и петрографического описания шлифов выделена последовательность минералообразования, установлены рудоносные прожилки и проанализировано их положение в общем строении жильно-прожилковой зоны, а также предложена предварительная структурно-минералогическая интерпретация структурных обстановок формирования рудной минерализации и прожилков. Таким образом, на основе получаемых цифровых моделей геологических образцов появляется возможность устанавливать многоэтапные структурно-минералогические парагенезы и определять их роль в эволюции рудной гидротермальной системы.

Детальная стереологическая модель полноразмерного образца ядра была получена

в результате его последовательного КТ-сканирования на высоких и низких энергиях. На сегодняшний день такое сканирование 1 м ядра является довольно быстрым процессом и занимает со всеми подготовительными операциями порядка 10–15 минут. Обработанные стереологические модели экспортируются из специализированных компьютерных приложений в широком объёме форматов, что позволяет их использовать в программах для геологического и блочного моделирования и подсчёта запасов, таких как Micromine (Micromine, Австралия), Leapfrog (Seequent, Новая Зеландия) и т. д. Увязка получаемых цифровых моделей ядра с объёмными моделями рудоносных структур и рудных тел значительно повысит детальность и достоверность моделирования структуры месторождения. Точная пространственная информация о залегании наиболее золотоносных прожилков позволит уточнить параметры сети бурения, угол и азимут бурения, что, в свою очередь, повысит достоверность оценки запасов объекта.

## Список литературы

1. Аристов В. В., Прокофьев В. Ю., Имамендинов Б. Н. [и др.] Особенности рудообразования на золото-кварцевом месторождении Дражное (Восточная Якутия, Россия) // Доклады академии наук. – 2015. – Т. 464, № 1. – С. 65–70.
2. Корост Д. В. Неоднородность строения терригенных коллекторов и типы структуры их пустотного пространства: на примере верхней части тюменской свиты Урненского нефтяного месторождения Западной Сибири : специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения» : дис. на соискание учёного степеня кандидата геолого-минералогических наук / Корост Дмитрий Вячеславович. – М., 2012. – 175 с.
3. Чикатуева В. Ю., Сивков Д. В., Читалин А. Ф. Опыт использования рентгеновской томографии при структурных исследованиях золоторудного штока месторождения Дражное, Республика Саха (Якутия) // Материалы Международной геолого-геофизической конференции и выставки ГеоЕвразия – 2019. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии. – 2019. – С. 431–435.
4. Чикатуева В. Ю., Ситкевич С. А. Минералогия золоторудного месторождения Дражное, Республика Саха (Якутия) // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2019. – № 5. – С. 57–63.
5. Читалин А. Ф., Воскресенский К. И., Гришин Е. М. [и др.] Структурно-кинематическая модель золоторудного месторождения Дражное // Геофизика. – 2018. – № 3. – С. 106–114.
6. Шкловер В. Я., Артемов Н. А., Маряев И. Г. [и др.] Технология анализа и цифрового моделирования ядра как составляющая часть инфраструктуры «цифрового месторождения». От геологоразведки до промышленной эксплуатации // Недропользование XXI век. – 2018. – № 5. – С. 84–95.
7. Carmignato S., Dewulf W., Leach R. Industrial X-Ray Computed Tomography // Springer International Publishing. – 2018. – 369 p.

8. Guntoro P., Ghorbani Y., Koch P., Rosenkranz J. X-ray Microcomputed Tomography ( $\mu$ CT) for Mineral Characterization: A Review of Data Analysis Methods // *Minerals*. – 2019. – № 9 (3). – P. 183. – doi.org/10.3390/min9030183.
9. Korost D. V., Ariskin A. A., Pshenitsyna I. V., Khomyak A. N. X-Ray Computed Tomography as a Method for Reproducing 3D Characteristics of Sulfides and Spinel Disseminated in Plagioclones from the Yoko-Dovyren Intrusion // *Petrology*. – 2019. – V. 27, № 4. – P. 370–385. – DOI: 10.1134/S0869591119040040.
10. Korost D., Belokhin V., Kudaev A., Khomyak A., Asryan S. Technologies for the Study of Full-Size Core with CT and Numerical Simulation Methods // *Society of Petroleum*. – 2019. – P. 17. – DOI: 10.2118/196927-MS.
11. Kyle J. R., Ketcham R. A. Application of high resolution X-ray computed tomography to mineral deposit origin, evaluation and processing // *Ore Geology Reviews*. – 2014. – doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.09.034.
12. Vukmanovic Z., Barnes S., Reddy S., Godel B., Fiorentini M. Morphology and microstructure of chromite crystals in chromitites from the Merensky Reef (Bushveld Complex, South Africa) // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2013. – V. 165. – P. 1031–1050. – DOI: 10.1007/s00410-012-0846-1.

## References

1. Aristov V. V., Prokof'ev V. Yu., Imamendinov B. N. [et al.] Osobennosti rudoobrazovaniya na zoloto-kvartsevom mestorozhdenii Drazhnoe (Vostochnaya Yakutiya, Rossiya) [Features of ore formation at the Drazhnoye gold and quartz deposit (Eastern Yakutia, Russia)], *Doklady akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*, 2015, V. 464, No 1, pp. 65–70. (In Russ.).
2. Korost D. V. Neodnorodnost' stroeniya terrigenykh kollektorov i tipy struktury ikh pustotnogo prostranstva: na primere verkhnei chasti tyumenskoi svity Urnenskogo neftyanogo mestorozhdeniya Zapadnoi Sibiri [Heterogeneity of the structure of terrigenous reservoirs and types of structure of their void space: on the example of the upper part of the Tyumen formation of the Urnensky oil field in Western Siberia: Extended abstract of candidate's thesis], Moscow, 2012, 175 p.
3. Chikatueva V. Yu., Sivkov D. V., Chitalin A. F. Opyt ispol'zovaniya rentgenovskoi tomografii pri strukturnykh issledovaniyakh zolotorudnogo shtokverka mestorozhdeniya Drazhnoe, Respublika Sakha (Yakutiya) [The experience of using X-ray tomography in structural studies of the gold ore stockwork of the Drazhnoye deposit, Republic of Sakha (Yakutia)], *Materialy Mezhdunarodnoi geologo-geofizicheskoi konferentsii i vystavki GeoEvraziya – 2019. Sovremennye tekhnologii izucheniya i osvoeniya nedr Evrazii [Materials of the International Geological and Geophysical conference and exhibition GeoEurasia – 2019. Modern technologies for studying and developing the subsurface of Eurasia]*, 2019, pp. 431–435.
4. Chikatueva V. Yu., Sitkevich S. A. Mineralogiya zolotorudnogo mestorozhdeniya Drazhnoe, Respublika Sakha (Yakutiya) [Mineralogy of the Drazhnoye gold deposit, Republic of Sakha (Yakutia)], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration]*, 2019, No 5, pp. 57–63. (In Russ.).
5. Chitalin A. F., Voskresenskii K. I., Grishin E. M. [et al.] Strukturno-kinematicheskaya model' zolotorudnogo mestorozhdeniya Drazhnoe [Structural and kinematic model of the Drazhnoye gold deposit], *Geofizika [Geophysics]*, 2018, No 3, pp. 106–114. (In Russ.).
6. Shklover V. Ya., Artemov N. A., Maryasev I. G. [et al.] Tekhnologiya analiza i tsifrovogo modelirovaniya kerna kak sostavlyayushchaya chast' infrastruktury "tsifrovogo mestorozhdeniya". Ot geologorazvedki do promyshlennoi ekspluatatsii [Core analysis and digital modeling technology as an integral part of the infrastructure of the "digital deposit". From geological exploration to industrial operation], *Nedropol'zovanie XXI vek [Subsoil use XXI century]*, 2018, No 5, pp. 84–95. (In Russ.).
7. Carmignato S., Dewulf W., Leach R. Industrial X-Ray Computed Tomography, *Springer International Publishing*, 2018, 369 p.
8. Guntoro P., Ghorbani Y., Koch P., Rosenkranz J. X-ray Microcomputed Tomography ( $\mu$ CT) for Mineral Characterization: A Review of Data Analysis Methods, *Minerals*, 2019, No 9 (3), pp. 183, doi.org/10.3390/min9030183.



9. Korost D. V., Ariskin A. A., Pshenitsyna I. V., Khomyak A. N. X-Ray Computed Tomography as a Method for Reproducing 3D Characteristics of Sulfides and Spinel Disseminated in Plagioclones from the Yoko-Dovyren Intrusion, *Petrology*, 2019, V. 27, No 4, pp. 370–385, DOI: 10.1134/S0869591119040040.
10. Korost D., Belokhin V., Kudaev A., Khomyak A., Asryan S. Technologies for the Study of Full-Size Core with CT and Numerical Simulation Methods, *Society of Petroleum*, 2019, pp. 17, DOI: 10.2118/196927-MS.
11. Kyle J. R., Ketcham R. A. Application of high resolution X-ray computed tomography to mineral deposit origin, evaluation, and processing, *Ore Geology Reviews*, 2014, doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.09.034.
12. Vukmanovic Z., Barnes S., Reddy S., Godel B., Fiorentini M. Morphology and microstructure of chromite crystals in chromitites from the Merensky Reef (Bushveld Complex, South Africa), *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2013, V. 165, pp. 1031–1050, DOI: 10.1007/s00410-012-0846-1.

## Авторы

**Чикатуева Виктория Юрьевна**

геолог<sup>1</sup>

v.chikatueva@igeotech.ru

**Степанов Никита Валерьевич**

инженер-программист<sup>2</sup>

stepanov-nikita13@rambler.ru

**Читалин Андрей Фёдорович**

кандидат геолого-минералогических наук

главный геолог<sup>1</sup>

a.chitalin@igeotech.ru

**Корост Дмитрий Вячеславович**

кандидат геолого-минералогических наук

научный сотрудник<sup>3</sup>

dkorost@mail.ru

<sup>1</sup> ООО «Институт геотехнологий», г. Москва

<sup>2</sup> ООО «Деко-сервис», г. Москва

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова», г. Москва

## Authors

**Victoria Yu. Chikatueva**

Geologist<sup>1</sup>

v.chikatueva@igeotech.ru

**Nikita V. Stepanov**

Software engineer<sup>2</sup>

stepanov-nikita13@rambler.ru

**Andrey F. Chitalin**

PhD

Chief geologist<sup>1</sup>

a.chitalin@igeotech.ru

**Dmitry V. Korost**

PhD

Researcher<sup>3</sup>

dkorost@mail.ru

<sup>1</sup> LLC "Institute of Geotechnologies", Moscow, Russia

<sup>2</sup> LLC "Deco Service", Moscow, Russia

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

## Редкометалльно-полиметаллическое оруденение Кошмансайского рудного поля (Восточный Узбекистан)

### Rare metal-polymetallic mineralization of Koshmansay ore field (Eastern Uzbekistan)

Ежков Ю. Б., Рахимов Р. Р., Холиёров А. Т.,  
Тошметов У. Х.

Ezhkov Yu. B., Rahimov R. R., Holiyorov A. T.,  
Toshmetov U. H.

Кошмансайское рудное поле расположено в южной части гранитоидного Чаткальского батолита, в бассейне р. Кошмансай. Вмещающая среда гранитоидов – карбонатные нижнекаменноугольные отложения, подвергнутые прежде всего интенсивному скарнированию. В геологическом строении скарнового редкометалльно-полиметаллического месторождения Кошмансай принимают участие осадочно-метаморфические породы, вулканиты и гранитоиды.

В распределении рудообразующих и сопутствующих элементов определённую роль играет их морфогенетический тип. Так, в биметасоматических скарнах в минералах больше накапливаются Cu, Zn, Ni, Te, Tl, Ge, в инфильтрационных скарнах – Ag, Pb, Bi, Cd, Sb, Co. Сульфидная полиметаллическая минерализация в скарнах ассоциирует с кварцем и кальцитом.

Кошмансайское рудное поле обладает отчётливой геохимической зональностью, подразделяясь на Кошмансайское редкометалльно-полиметаллическое месторождение на верхних уровнях и Нижнекошмансайское редкометалльно-медное рудопроявление на нижних. Тем не менее рудные тела формировались в сходной термодинамической обстановке, что позволяет рассматривать рудное поле как единую геохимическую аномалию.

Вертикальная геохимическая зональность ореолов рудообразующих элементов позволяет предположить расширение перспектив месторождения на глубину.

Ключевые слова: свинец, цинк, медь, висмут, вольфрам, серебро, скарн, роговики, изоконцентрации элементов, месторождение Кошмансай.

The Koshmansai ore field is located in the southern part of the granitoid Chatkal batholith, in its apical ledge and exocontact zones, in the Koshmansai river basin. The host environment of the granitoids is Lower Carboniferous carbonate rocks, which were primarily affected by intensive skarnification. Sedimentary-metamorphic and volcanics rocks and granitoids constitute the geological structure of the skarn rare-metal-polymetallic Koshmansai deposit.

In the distribution of ore-forming and associated elements in the mineral phases of skarn orebodies, their morphogenetic type plays a certain role. Thus, in bi-metasomatic skarns, minerals accumulate more Cu, Zn, Ni, Te, Tl, Ge. In infiltration skarns, these are Ag, Pb, Bi, Cd, Sb, Co. Sulfide polymetallic mineralization in skarns is associated with quartz and calcite.

The Koshmansai ore field has a distinct geochemical zoning, which can be subdivided into the Koshmansai rare-metal-polymetallic deposit at the upper levels of the ore field and the Nizhnekoshmansai rare-metal-copper ore occurrence at its lower levels. Nevertheless, orebodies formation proceeded in a similar thermodynamic environment, in the conditions of upper shielding at low temperature gradients, which makes it possible to consider the ore field as a single geochemical anomaly. The vertical geochemical zoning of ore-forming element halos determined by their concentration at the lower section levels of the Koshmansai deposit skarn orebodies suggests the expansion of its prospects in depth.

Keywords: lead, zinc, copper, bismuth, tungsten, silver, skarn, hornfelses, isoconcentrations of elements, Koshmansai deposit.

Для цитирования: Ежков Ю. Б., Рахимов Р. Р., Холиёров А. Т., Тошметов У. Х. Редкометалльно-полиметаллическое оруденение Кошмансайского рудного поля (Восточный Узбекистан). Руды и металлы. 2021. № 4. С. 60–74. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10028.

For citation: Ezhkov Yu. B., Rahimov R. R., Holiyorov A. T., Toshmetov U. H. Rare metal-polymetallic mineralization of Koshmansay ore field (Eastern Uzbekistan). Ores and metals, 2021, № 4, pp. 60–74. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10028.

Кошмансайское рудное поле расположено в южной части гранитоидного Чаткальского батолита, в его апикальном выступе и экзо-контактных зонах, в бассейне р. Кошмансай (рис. 1). Вмещающая среда гранитоидов – карбонатные нижнекаменноугольные отложения, подвергнутые в первую очередь интенсивному скарнированию. Рудное поле вытянуто более чем на 10 км в северо-западном направлении, с размещением на его юго-восточном фланге скарново-рудных тел месторождения Кошмансай, а на северо-западном – подобных же тел Нижнекошмансайского рудопроявления.

**Геолого-структурное положение и контактово-метасоматические преобразования.** Геология рудного поля и вещественный состав руд ранее изучались В. Н. Пузиковым, В. Н. Аполлоновым, А. Я. Лаухиным [3], Т. М. Мацкиной [4] и др. В настоящем же исследовании мы освещаем результаты проведённого минералого-геохимического опробования практически всего Кошмансайского рудного поля, а данные по изучению эндогенных ореолов рассеяния рудных и редких элементов приведены главным образом в пределах собственно скарнового редкометалльно-полиметаллического месторождения Кошмансай.

Анализ распределения свинцово-цинкового оруденения в рудном поле показывает снижение интенсивности оруденения от месторождения Кошмансай к Нижнекошмансайскому рудопроявлению. Считается, что при почти полной идентичности состава вмещающих пород на всём протяжении рудного поля наиболее вероятная причина этого явления в скарнах – различные масштабы рудообразующих процессов на разных глубинах его формирования: месторождение Кошмансай расположено на отметках 2400–2600 м, а Нижнекошмансайское рудопроявление – 1500–1600 м. В связи с естественными условиями рельефа рудное поле оказалось обнажено на глубину около 1000 м, что подтверждается сменой отложений верхней части разреза, вскрытых на месторождении Кошмансай, отложениями его нижней части на площади Нижнекошмансайского рудопроявления. В геологическом строении скарнового редкометалльно-полиметал-

лического месторождения Кошмансай принимают участие осадочно-метаморфические породы, вулканиты и гранитоиды. Серые и светло-серые, средне- и толстослоистые относительно чистые мраморизованные известняки визейского яруса нижнего карбона слагают в основном левый борт р. Кошмансай и в виде провесов кровли интрузии размещаются на водоразделе между реками Кошмансай и Арпапая. Суммарная мощность известняков не превышает 350–450 м. В средней части разреза залегает горизонт зеленовато-серых тонкослоистых кремнистых известняков с маломощными, до 5–6 см, прослойками волластонита. Мощность горизонта 90–100 м.

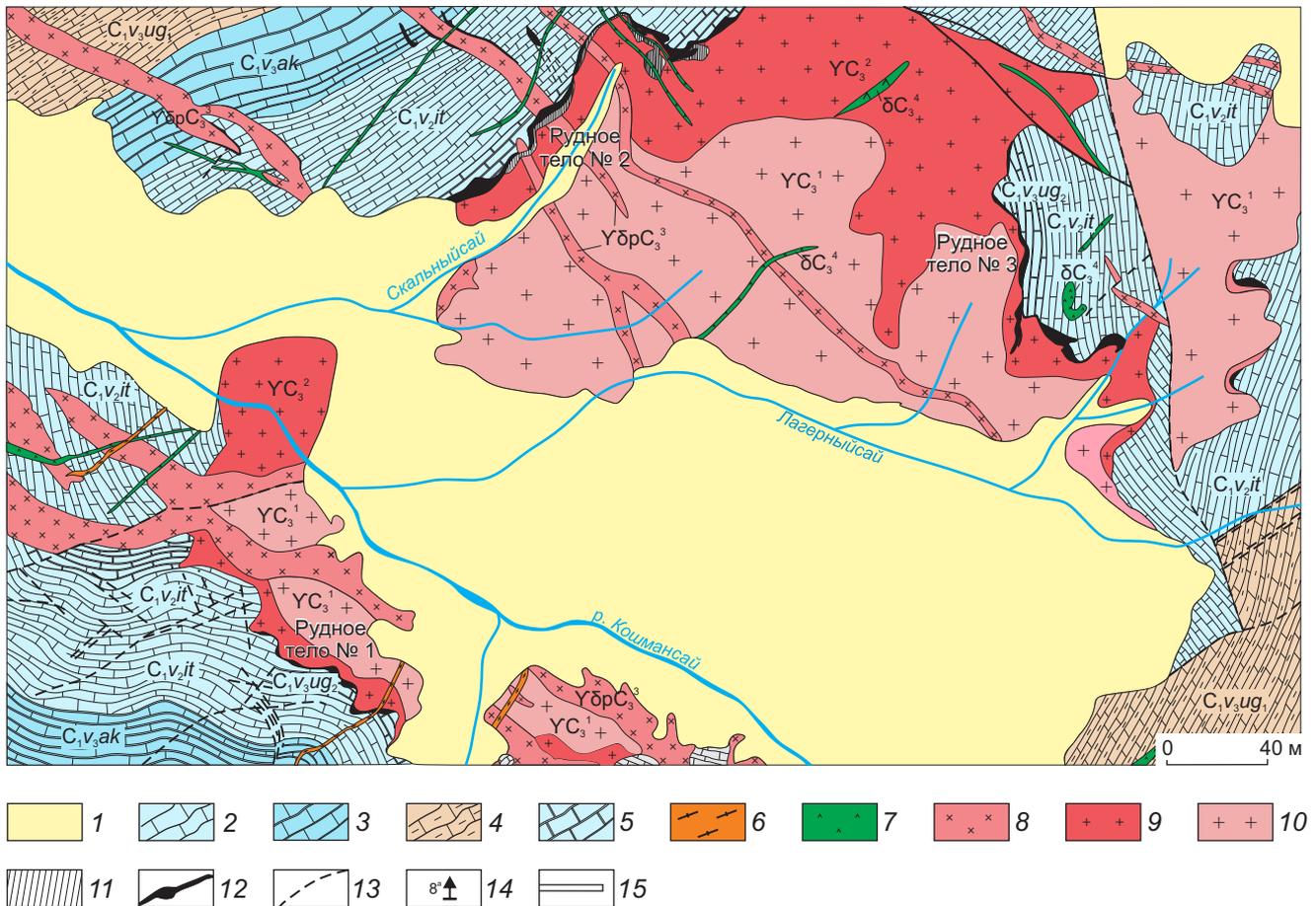
Вулканиты  $C_1n-C_2b_1$  (видимо, их покровная часть) несогласно перекрывают известняки и слагают водораздельную часть хребта Ташкескен и его северные склоны. В составе вулканитов известны туфы, тёмно-серые порфириты, фельзит-порфиры, диабазовые и плагиоклазовые порфириты.

Крупно- и среднезернистые адамеллиты, мелкозернистые лейкократовые граниты, граносиениты и сиенодиориты – эндоконтактные фации и дополнительные интрузии кислых гранитоидных дифференциатов Чаткальского интрузива. Среди жильных пород известны диоритовые порфириты, гранит-гранодиорит и адамеллит-порфиры, лампрофиры, диабазовые порфириты и фельзит-порфиры.

Простираение даек в основном северо-западное, падение северо-восточное (75–85°), реже наблюдаются дайки с северо-восточным простиранием и крутым падением на северо-запад (85–90°).

На площади месторождения известняки образуют асимметричную складку северо-восточного простирания с пологопадающим северо-восточным крылом (10–15°) и крутопадающим северо-западным (70–90°). Свод антиклинали обнажён в верховьях сухого Скального сая.

Дизъюнктивные нарушения проявляются главным образом в виде небольших разломов и трещин, маркируются дайками, полосами гидротермальных изменений и зонами брекчированных пород.



**Рис. 1. Геологическая карта редкометалльно-полиметаллического месторождения Кошмансай:**

1 – четвертичные отложения (Q); нижнекаменноугольные отложения: 2 – средне- и крупнозернистые мраморы ( $C_{1v_2it}$ ), 3 – мраморизованные слоистые известняки с кремнистыми желваками и прослоями волластонита ( $C_{1v_3ak}$ ), 4 – доломитизированные известняки и доломиты ( $C_{1v_3ug_1}$ ), 5 – эпидот-кварц-волластонитовые роговики ( $C_{1v_3ug_2}$ ); интрузивные образования: 6 – фельзит-порфиры ( $YC_3^5$ ), 7 – диабазовые порфиристы ( $\delta C_3^4$ ), 8 – гранодиорит-адамеллит-порфиры ( $Y\delta pC_3^3$ ), 9 – мелкозернистые граниты и гранит-порфиры ( $YC_3^2$ ), 10 – крупнозернистые биотитовые граниты ( $YC_3^1$ ); 11 – скарновые тела безрудные; 12 – скарно-рудные тела; 13 – разрывные нарушения; 14 – штольня; 15 – скважины

**Fig. 1. Geological map of the Koshmansai rare-metal-polymetallic deposit:**

1 – Quaternary deposits (Q); Lower Carboniferous deposits: 2 – medium- to coarse-grained marbles ( $C_{1v_2it}$ ), 3 – marbled laminated limestone with siliceous nodules and wollastonite bands ( $C_{1v_3ak}$ ), 4 – dolomitized limestone and dolomite ( $C_{1v_3ug_1}$ ), 5 – epidote-quartz-wollastonite hornfels ( $C_{1v_3ug_2}$ ); intrusive rocks: 6 – felsic porphyries ( $YC_3^5$ ), 7 – diabase porphyrites ( $\delta C_3^4$ ), 8 – granodiorite-adamellite porphyries ( $Y\delta pC_3^3$ ), 9 – fine-grained granite and granite porphyries ( $YC_3^2$ ), 10 – coarse-grained biotite granites ( $YC_3^1$ ); 11 – barren skarn bodies; 12 – skarn orebodies; 13 – faults; 14 – adit; 15 – drillholes

В пределах месторождения выделяются контактово-биметасоматические и инфильтрационно-метасоматические типы известковых скарнов. Биметасоматические скарны размещаются: на контактах мраморов и мраморизованных известняков с гранитоидами; дайками гранодиорит- и гранит-порфиоров в межформационных нарушениях на контакте мраморизованных известняков с кислыми вулканами. Инфильтрационные скарны развиваются вдоль зон тектонических нарушений (жильноподобные тела) и на участках пересечения различных систем трещин или небольших разломов (трубчатые тела).

Рудовмещающие породы – пироксеновые и гранат-пироксеновые скарны, тогда как гранатовые, эпидотовые и волластонитовые практически безрудны; слабо минерализованы известково-силикатные роговики. Форма оруденых скарнов разнообразна и определяется рудолокализирующими структурами. Размеры изменяются в широких пределах: длина от 22 м до 1 км, мощность от 1 до 60 м. У трубчатых тел площадь выхода от 50 до 200 м<sup>2</sup>.

На месторождении выделяются следующие типы минерализации:

- безводные алюмосиликаты (гранаты, пироксены, волластонит, родонит, шеелит);
- гидротермально-метасоматические преобразования скарнов (амфиболы, эпидоты, др.);
- железоксидная (магнетит, гематит);
- кварцево-карбонатно-сульфидная.

Текстура руд вкрапленная, прожилково-вкрапленная и прожилковая с переходами в петельчатую и такситовую. Структура интерстиционная, аллотриоморфнозернистая и гипидиоморфнозернистая. Почти во всех скарново-рудных телах преобладают алюмосиликаты, объём которых не превышает 60–70 % от общей массы, а также карбонат и кварц, объём которых обычно достигает 20 %.

Состав и характер минерализации определяются минералого-геохимическими особенностями вмещающей среды – в известняках образуются известковые скарны (Mn-диопсид-салит, Mn-геденбергит, гроссуляр-андрадит и др.), для алюмосиликатов и некоторых сульфидов характерна повышенная примесь мар-

ганца и железа; иногда наблюдается марганцовистый минерал – родонит. В мезотермальном диапазоне формирования сульфидного и оксидного оруденения характерный жильный минерал – кварц.

Сульфидная полиметаллическая минерализация в скарнах ассоциирует с кварцем и кальцитом, она наиболее обильна и разнообразна в рудах собственно месторождения Кошмансай. Здесь возникают скопления сплошных сульфидов типа колчеданных руд, для которых характерны также различные сульфосили. Геохимия руд выделяется примерно равным соотношением свинца и цинка. Сфалерита и галенита обычно больше, чем дисульфидов железа. Медь, отчасти висмут образуют повышенные концентрации только в единичных рудных телах, иногда в них отмечается также довольно высокая концентрация серебра (вплоть до образования его самостоятельных минералов – акантита и др.).

Гранитоидные породы, включая и жильные образования, весьма незначительно затронуты контактово-метасоматическими процессами, которые, как правило, представлены маломощными зонками скарнированных пород. В них фиксируются эпидот, гранат и тремолит, из вторичных – обильные кварц, карбонат, хлорит.

Собственно контактовые изменения собственно чистых известняков состоят лишь в их интенсивной перекристаллизации с изменением текстурно-структурных особенностей. Вблизи контактов и зон трещиноватости это кристаллические мраморы, обычно осветлённые, обладающие гранобластовой структурой; с удалением от контактов породы слабо мраморизованы и представлены часто неравнозернистыми известняками. Метаморфизованные в различной степени карбонатные породы характеризуются магнезиальной новообразованной ассоциацией: форстерит, хондродит, гумит (клиногумит), диопсид, шпинель, тремолит, тальк, флогопит. Среди них устойчиво оформляются в пространстве ассоциации: форстерит, хондродит, диопсид, тальк; диопсид, хондродит, форстерит (шпинель), тальк; форстерит, тремолит, кварц (доломит).

Наиболее внешние части ореола контактового метаморфизма отличаются наличием единичных тремолита, гидромусковита, флогопита, кварца и доломита. Прослой мергелистых и кремнистых известняков преобразованы в полосчатые силикатные и известняково-силикатные роговики. Они слагают достаточно широкую зону отчётливо полосчатых роговиков, состоящих из тонкозернистых, тонкополосчатых, часто перемежающихся прослоев различного состава: кальцит-эпидот-волластонит-кварцевого, волластонит-пироксен-кварцевого, эпидот-волластонитового и эпидот-гранат-кварцевого. Изредка с кварц-волластонитовыми роговиками ассоциирует единичный крупнокристаллический флюорит.

Указанные роговики переслаиваются с маломощными линзовидными телами волластонит-кальцитовых и чисто волластонитовых мраморов. Последние представляют собой белые плотные крупнокристаллические образования, сложенные в основном крупношестоватым (спутанно-лучистым) волластонитом. Волластонит часто замещается (по ветвящейся трещиноватости и в виде пятен) мелкоагрегатными скоплениями эпидота, кальцита и тремолита. Роговики в той или иной степени затронуты процессами скарнообразования, приводящими в отдельных участках к появлению пород типа скарноидов [1].

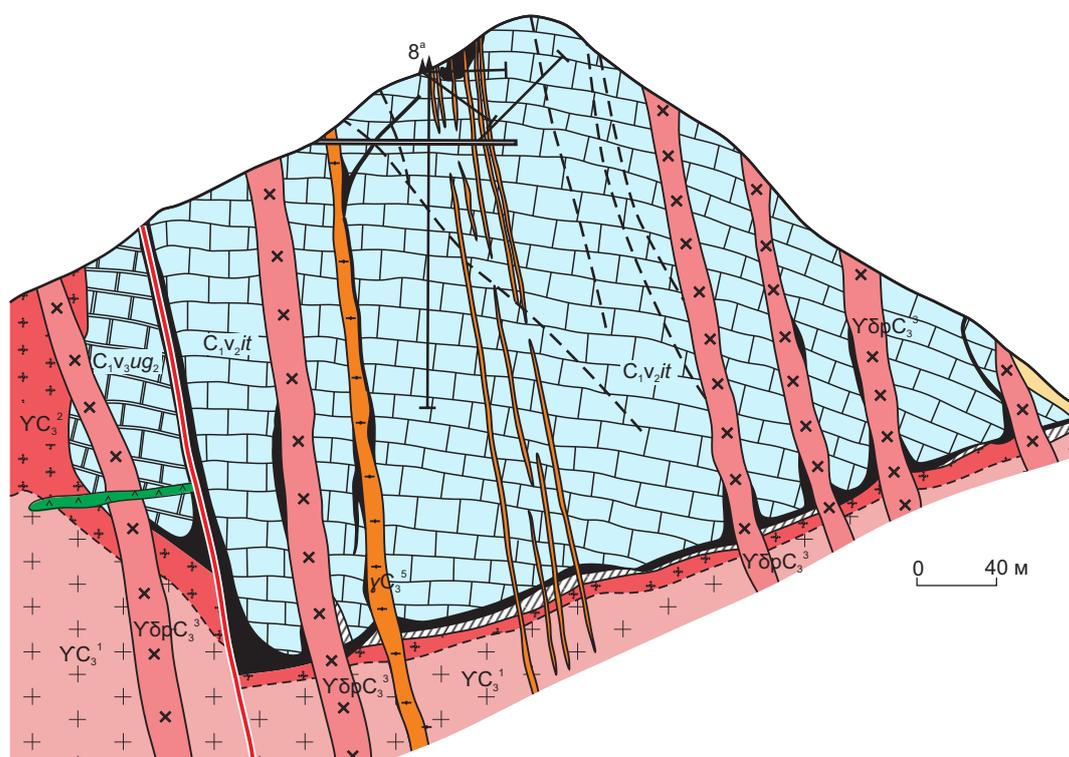
Из постмагматических процессов, проявленных во вмещающих карбонатных породах месторождения, наиболее широко представлена доломитизация. Доломит распределяется в мраморах неравномерно, от незначительной (5–15 %) вкрапленности до локальных насыщенных участков (50–80 %). Зёрна новообразованного доломита значительно более светлые и чистые (свободные от пигментаций), овально-ромбической формы, с неправильными очертаниями. Часто кристаллы доломита почти полностью замещают зёрна и скопления форстерита, хондродита и др. Выделенные наиболее интенсивные участки доломитизации в общем повторяют контуры зон магнезиальной минералого-парагенетической ассоциации.

Таким образом, завершая изучение контактово-метасоматических преобразований на

месторождении Кошмансай и привлекая при этом результаты микроисследований скарново-рудных тел, можно выделить среди них эталонный (типовой) объект – рудное тело № 2, представленное пироксен-геденбергитовым скарном (рис. 2). Пироксен (от 10 до 25 % породы) преимущественно реликтовый. Замещён в кристаллах серпентино-тальковыми и карбонатными (реже с хлоритом) образованиями от трещинного заполнения по спайности до полных псевдоморфоз как отдельных зёрен и скоплений, так и участков скарна (серпентинизированная порода). Серпентин и карбонат (до 6 % скарна) присутствуют в агрегатных скоплениях и микропрожилках (совместно или раздельно). В участках наиболее интенсивных серпентино-карбонатных преобразований скарнов наблюдается насыщение рудной минерализацией (до 30 %). Также отмечены обильные скопления гидроксидов железа (гематит, лимонит и др.).

В целом участки контактов с крутым погружением кровли гранитоидного массива вмещают более крупные скарново-рудные залежи, а карбонатные породы при этом несут следы слабого метаморфизма. В местах полого залегания кровли интрузии карбонатные породы выделяются по более широким и интенсивным преобразованиям, но скарновые тела обычно маломощные, хотя и сравнительно выдержанные по простиранию.

**Минералого-геохимические особенности рудного процесса.** В Кошмансайском рудном поле вещественный состав скарново-рудных тел изучался по 83 минералого-геохимическим пробам, в которых были установлены 65 минералов. Этапы и стадии минералообразования наиболее интересных из них приведены в табл. 1. При отборе протолок на месторождении Кошмансай в карбонатных породах выявлены кварц-кальцит-гематитовые жилы с медно-висмутовой минерализацией, выполняющие зоны дробления в секущих тектонических трещинах, в 100 м западнее рудного тела № 2. Эти образования интересны тем, что в них впервые для месторождения Кошмансай был установлен теллурид висмута – жозеит-В (проба 12105). Позднее жозеит-В был



**Рис. 2. Геологический разрез через скарново-рудное тело № 2 Кошмансайского редко-металльно-полиметаллического месторождения:**

усл. обозн. см. рис. 1

**Fig. 2. Geological section across the skarn orebody #2 of the rare metal-polymetallic Koshmansai deposit:**  
see Fig. 1 for legend

обнаружен ещё в 11 протолочках практически во всех частях рудного поля. Кроме того, жозеит является одним из основных рудных минералов на близрасположенном шеелит-висмутовом рудопроявлении Кошмансай-II (пробы 10148 – 531 г/т, 10149 – 11 722 г/т).

Почти всегда в минералого-геохимических пробах присутствует шеелит, но самые большие его содержания отмечены только на рудопроявлениях Нижнекошмансайское (протолочка 11134 – 40 072 г/т) и Кошмансай-II, где шеелит является ведущим рудным минералом (протопочки 10148 – 10 706 г/т, 10149 – 4313 г/т). На месторождении Кошмансай только на водоразделе рек Кошмансай и Арпапая в протолочке 10131 шеелит отмечен в количестве 5297 г/т. В протолочках, отобранных из

рудных тел №№ 2, 3, 4 и 13, шеелит установлен в количестве > 1000 г/т.

Рассмотрим основные особенности распределения содержаний рудных и сопутствующих элементов в минералах Кошмансайского рудного поля по данным химического анализа (табл. 2).

*Пирит* – самый распространённый из рудных минералов. В отличие от других рудообразующих сульфидов он отлагается многократно в течение всего рудного процесса.

В пирите содержание марганца достигает 0,1%, никеля и кобальта – 0,001 и 0,01%; при этом кобальта примерно в пять раз больше, чем никеля в пирите из биметасоматических скарнов, а в инфильтрационных телах уже двукратно преобладает никель. Содержание

**Табл. 1. Схема последовательности минералообразования редкометалльно-медно-полиметаллического (с Bi, W) оруденения Кошмансайского рудного поля**

Table 1. Scheme of mineral formation sequence of the rare metal-copper-polymetallic (with Bi-W) mineralization at the Koshmansai ore field

Этапы минералообразования				
Метасоматический	Метаморфогенно-гидротермальный	Гидротермальный		Экзогенный
Стадии минералообразования				
Безводные Ca-Fe-Mg-Mn алюмосиликаты с шеелитом	Ореол контактового преобразования карбонатных пород	Fe-оксидно-кварц-карбонатная	Сульфидная	Водно-Fe-Mn-оксидная
Диопсид-салит	Волластонит	Магнетит	Пирит	Лимонит
Геденбергит	Форстерит	Гематит	Халькопирит	Mn-охры
Гроссуляр-андрадит	Диопсид-II	Кварц	Сфалерит	
Родонит	Тремолит	Карбонат	Галенит	
Шеелит	Флогопит		Жозеит-В	
	Серпентин		Акантит	
	Шпинель		Фрейбергит	
	Доломит			
	Эпидот			
	Гидромусковит			
	Кальцит			

молибдена 0,0001n % наиболее высоко в пиритах рудного тела № 17, им же свойственно и более высокое, по сравнению с остальными, содержание олова. Содержание мышьяка отмечено лишь в отдельных пиритах и характеризуется очень большим варьированием; вместе с мышьяком отмечается значительное содержание сурьмы (300 г/т). Концентрация серебра низкая, однако даже при незначительном её увеличении параллельно растёт содержание свинца и висмута. При этом содержание висмута почти всегда на порядок или два выше, чем серебра.

Содержание свинца в пирите из инфильтрационных скарнов почти в четыре раза выше, чем в биметасоматических телах; соотношение содержания висмута в пирите тех же

сред ещё выше – 16 раз. Содержание меди показывает обратную картину: в пирите биметасоматических скарнов её почти в пять раз больше, чем в инфильтрационных. Цинка в пирите в два раза больше, чем свинца и меди; при резком возрастании содержания цинка появляются бедные примеси кадмия. Следует отметить, что в отдельных кристаллах пирита распределение свинца и цинка удивительно совпадает, характеризуясь тремя максимумами в гипсометрическом интервале 1500–2450 м. Содержание галлия невысокое, часто на грани чувствительности анализа.

*Халькопирит.* Отмечается очень высокая частота встречаемости. Для большинства выявленных элементов в халькопирите характерна исключительно высокая дисперсия. Се-

**Табл. 2. Средние содержания минералообразующих и редких элементов в минералах месторождения Кошмансай (химический анализ, г/т, %)**

Table 2. Average grades of mineral-forming and rare elements in the Koshmansai deposit minerals (chemical analysis, g/t, %)

Минерал, вмещающая среда	Число определений	Fe	Mg	Mn	Ti	Ag	Cu	Pb	Zn	As	Bi	Ni	Co	Sb	Mo	W	Sn	Te	Cd	Tl	Ga	Ge
Гранат, биметасоматический скарн	48	> 3 %	7900	8857	553	2	133	238	4800	-	26	6	35	-	34	735	50	-	850	-	6	17
Гранат, инфильтрационный скарн	6	> 3 %	6167	7833	865	2	31	768	7300	-	40	7	25	-	-	-	-	-	590	-	5	15
Пирит, биметасоматический скарн	65	> 3 %	-	2550	-	8	3640	2400	6711	706,6	136	16	57	140	6	146	16	-	45	-	5	-
Пирит, инфильтрационный скарн	5	> 3 %	-	2960	-	24	800	8520	5840	352,4	2116	159	98	-	7	-	-	-	68	-	5	-
Халькопирит, инфильтрационный скарн	8	> 3 %	-	1382	-	35	> 3 %	2612	1,22 %	-	103	8,2	12	-	8	-	6	-	112	-	5	-
Халькопирит, кварц-кальцит-гематитовая жила*	2	> 3 %	-	500	-	80	> 3 %	100	60	-	> 3 %	-	-	-	-	-	6	4000	-	-	5	-
Халькопирит, шеелит-висмутовый скарноид	2	> 3 %	-	500	-	60	> 3 %	3000	3 %	-	3 %	-	-	200	20	> 3 %	100	3000	100	-	5	-
Сфалерит, биметасоматический скарн	15	> 3 %	-	8200	-	107	4300	1200	> 3 %	-	351	8	72	-	44	183	25	-	4593	-	6	10
Сфалерит, инфильтрационный скарн	6	1,92 %	-	6333	-	146	3300	1800	> 3 %	-	824	6	53	-	-	-	6	-	4800	-	-	-
Галенит, биметасоматический скарн	19	1,4 %	-	6895	-	4567	3286	> 3 %	> 3 %	-	> 3 %	7	9	435	87	215	8	2516	511	260	-	-
Галенит, инфильтрационный скарн	7	1,7 %	-	5000	-	2529	5423	> 3 %	> 3 %	-	1,6 %	6	9	190	6	115	8	2057	757	260	-	-
Гематит, кварц-кальцит-гематитовые жилы	3	> 3 %	-	466	280	-	7	32	100	-	80	6	-	-	6	267	10	-	-	-	5	-
Кварц, кварц-кальцит-гематитовые жилы	5	4720	4000	2280	-	4	9	76	1012	-	67	30	-	-	26	240	-	-	-	-	-	-
Кальцит, кварц-кальцит-гематитовые жилы	5	1,2 %	1,2 %	1,2 %	-	14	112	681	6246	-	59	26	6	-	12	150	-	-	85	-	-	-
Шеелит, биметасоматический скарн	2	2 %	> 3 %	5000	30	1	55	100	-	-	30	6	10	-	225	> 3 %	-	-	-	-	-	-

\* Au – 15 г/т.

ребра втрое больше, чем в пирите, но общий уровень содержания элемента также низок. Висмута меньше, чем в пирите, но содержание его в целом относительно высокое (103 г/т). Цинка в халькопирите больше, чем свинца, в четыре раза, а в отдельных пробах содержание цинка достигает 3 %, очевидно, за счёт эмульсионной вкрапленности сфалерита. Существенно отличается в этом плане халькопирит из секущих медно-висмутовых кварц-кальцит-гематитовых жил с шеелит-висмутового месторождения Кошмансай-II, где содержание висмута превышает 3 %, а теллура достигает 0,4 %. Объясняет подобный рост содержания висмута и теллура в данном халькопирите наличие включений частых клиновидных пластинок теллурида висмута – жозеита.

*Сфалерит.* Содержание кадмия в отдельных случаях в сфалерите превышает 1 %, что характерно для месторождений, сформировавшихся в мощных карбонатных толщах. Марганец всегда присутствует в 0,1n %, но в единичных случаях его количество превышает 3 % – именно такие разности сфалерита и являются высокожелезистыми. Отчётливо наблюдается высокая кобальтоносность сфалерита, причём кобальта примерно в 10 раз больше, чем никеля. Высокие, с очень большой дисперсией, содержания меди в сфалерите (от 10 г/т до 3 %) можно объяснить эмульсионной вкрапленностью халькопирита. Распределение меди характеризуется двумя отчётливыми максимумами, что аналогично распределению меди в галените. Схожий характер распределения у висмута и серебра, однако при этом серебро (только наряду с кобальтом) – один из немногих элементов, которые устойчиво накапливаются в сфалеритах к более глубоким уровням эрозийного среза рудного поля.

*Галенит* – один из главных рудообразующих минералов (кристаллизовавшийся несколько позже сфалерита). Отличается высокой концентрацией практически всех рудных элементов, причём серебро, висмут и теллур в большинстве своём присутствуют в виде структур распада твёрдых растворов – матильдита и жозеита. Распределение меди в галените, как уже отмечалось, полностью совпа-

дает с особенностью её распределения в сфалерите. Большие содержания цинка и кадмия возникли в основном за счёт микровключений сфалерита, а высокое содержание молибдена и вольфрама характерно для тех рудных тел, в которых концентрируются молибденит и шеелит. Очень высокой дисперсией отличается распределение сурьмы: от исчезающе малых содержаний до 0,3 %; также велика и дисперсия содержаний таллия. Следует отметить, что повышенное содержание таллия (90 г/т) в галените обычно характерно для месторождений, обогащённых дисульфидами железа.

В *гематите* марганец и титан содержатся в большом количестве, ванадий, медь, свинец, галлий – в незначительном. Несколько повышенное содержание вольфрама, по-видимому, связано с включениями шеелита, так как пробы взяты из обогащённых им рудных тел.

*Шеелит* Кошмансайского рудного поля высокожелезистый, магниезильный, марганцовистый, умеренно серебряный. Повышенные содержания молибдена обнаружены в шеелите рудного тела № 18 (225 г/т).

*Жильные минералы* представлены кварцем и карбонатами. В целом карбонаты более распространены, чем кварц. Обычно основная масса кварца выделяется до отложения главных рудных минералов, которые затем либо заполняют в нём полости и трещины, либо развиваются по скарированным и карбонатизированным породам. Карбонаты преимущественно более поздние, формируются в основном на завершающей стадии рудного процесса на месторождении. По-видимому, из-за этого кварц Кошмансайского рудного поля обеднён рудными примесями по сравнению с карбонатом. Кварц с умеренным содержанием железа, магния, марганца, цинка и низким – меди и свинца. Карбонаты, которые по составу можно отнести к манган-анкеритам, кальцитам и манган-кальцитам, содержат серебро (тысячные доли процента), медь (сотые), свинец (сотые), цинк (десятые), висмут (тысячные). Постоянно присутствие никеля. Основные рудные элементы в карбонатах содержатся в составе микровключений пирита, халькопирита, сфалерита и галенита.

*Гранаты* Кошмансайского рудного поля относятся к кальциевым разностям ряда гроссуляр–андрадит с постоянным высоким содержанием железа и марганца, причём гранаты месторождения Кошмансай более марганцовистые. Высокое содержание магния в гранатах закономерно увеличивается к Нижнекошмансайскому рудопроявлению, а постоянная примесь титана (до 0,1 %) возрастает к месторождению Кошмансай. В Нижнекошмансайском рудопроявлении содержание олова в гранатах составляет 80 г/т, в гранатах месторождения Кошмансай – ниже чувствительности анализа. Содержание меди в гранатах на Нижнекошмансайском рудопроявлении также выше, чем на месторождении Кошмансай (в два раза); для свинца и цинка характерна обратная зависимость. В гранатах отмечается низкое содержание серебра, никеля, галлия. Таким образом, гранат – чуткий индикатор вертикальной рудно-геохимической зональности на Кошмансайском рудном поле.

Укажем, наконец, что в распределении рудообразующих и сопутствующих элементов в минеральных фазах скарново-рудных тел определённую роль играет их морфогенетический тип. Так, в биметасоматических скарнах в минералах в большей мере накапливаются медь, цинк, никель, теллур, таллий, германий, в инфильтрационных – серебро, свинец, висмут, кадмий, сурьма, кобальт.

Обобщение минералого-геохимических данных по Кошмансайскому рудному полю позволяет выделить месторождение Кошмансай как редкометалльно-полиметаллическое, а рудопроявление Нижнекошмансайское – как редкометалльно-медное.

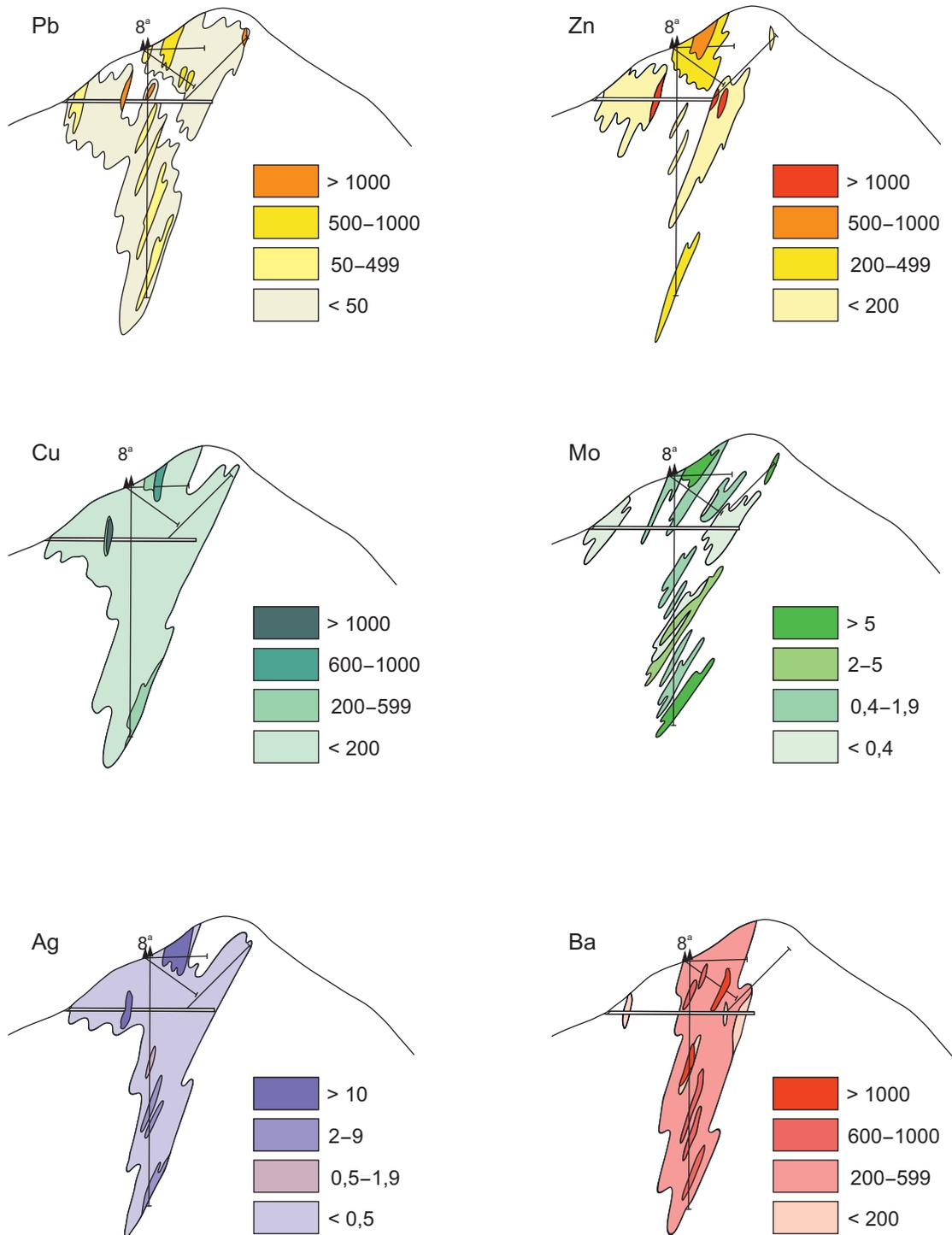
**Закономерности распределения рудных и редких элементов в вертикальных и горизонтальных сечениях скарново-рудных тел.** По рудному телу № 2 и в околорудном пространстве (см. рис. 2) были пройдены штольня и ряд скважин (вертикальная 8а). Это позволило получить приближенно объёмную картину распределения свинца, цинка и сопутствующих им элементов. Рассмотрим особенности их распределений по данным количественного спектрального анализа (рис. 3). Для

сравнения изоконцентраций элементов использовались фоновые данные, рассчитанные для карбонатных пород в верховьях р. Кошмансай. Они составили (в г/т): для свинца – 5,49, цинка – 16,6, серебра – 0,04, меди – 12,6, бария – 131, стронция – 324, олова – 0,5, молибдена – 0,12, кобальта – 2,85, никеля – 1,23, марганца – 654.

*Свинец.* Изоконцентрации в основном средней интенсивности, превышающие фоновое содержание в 4–6 раз. Распределение свинца резко контрастное. Наблюдаются соприкосновения участков концентраций элемента в 1000 г/т и менее 10 г/т. Простирающиеся ореолы свинца субмеридиональные. Области повышенных изоконцентраций узлокальные, не превышают 20–22 м. Поле максимальной концентрации элемента унаследовало морфологию рудного тела. Горизонтальная зональность распределения свинца выражена нечётко, однако проявлена тенденция возрастания его изоконцентраций к забою скв. 8а на глубоких уровнях скарново-рудного тела.

*Цинк.* Среди изоконцентраций цинка отчётливо выделяются низкоинтенсивные (ниже фона) и высокоинтенсивные области. Последние занимают 1/6 часть пространства и приурочены к рудному телу. Области низких изоконцентраций охватывают 1/3 пространства. Области средней интенсивности располагаются в средней части скв. 8а и близ забоя штольни. Отмечается чередование концентраций 1000 и 1–10 г/т, что позволяет говорить о резко контрастном геохимическом поле цинка. Простирающиеся ореолы близко к меридиональному, форма их неправильно овальная (до 100 м) и линзовидно вытянутая (до 80 м). Поле максимальных изоконцентраций цинка совпадает с контуром рудного тела. Горизонтальная зональность выражена слабо. Повышенные изоконцентрации цинка контролируются серией даек. К забою скважины 8а содержания цинка растут, что говорит о существующей по отношению к ним вертикальной зональности.

*Медь.* В целом изоконцентрации низкоинтенсивные; высокоинтенсивные и среднеинтенсивные области развиты спорадически. Оре-



**Рис. 3. Ореолы концентраций Pb, Zn, Cu, Mo, Ag, Ba в вертикальном разрезе скарново-рудного тела № 2, г/т**

**Fig. 3. Halos of Pb, Zn, Cu, Mo, Ag, Ba in vertical section of the skarn orebody #2, g/t**



олы меди отличаются яркой контрастностью, наблюдается резкая смена областей изоконцентраций от 10 до 10 000 г/т. Области максимальных изоконцентраций меди совпадают с контурами рудного тела и располагаются в верхней части его разреза. Изоконцентрационная горизонтальная зональность не проявлена. К забойу скв. 8а отмечено усиление интенсивности ореолов меди, что позволяет говорить о проявлении её вертикальной зональности в рудном теле.

*Молибден.* Явно выделяются локальные высоко- и среднеинтенсивные области изоконцентраций на фоне низкоинтенсивных. Наиболее высокие изоконцентрации в верхней части разреза повторяют контуры рудного тела, несколько удаляясь от него. Горизонтальная зональность слабо проявлена, можно говорить лишь о нечёткой смене областей с низкой концентрацией областями со средней. Характерно увеличение интенсивности изоконцентраций с глубиной по скв. 8а. Максимум приходится на забой, что обуславливает определённую вертикальную зональность распределения молибдена в рудном теле.

*Серебро.* Хорошо фиксируется низкоинтенсивная область изоконцентраций серебра, занимающая 2/3 пространства, при этом распределение серебра резко контрастное – области с содержанием 10 г/т сменяются областями с 0,01 г/т. По скважинам определяются спорадические линзовидные области высоких изоконцентраций серебра протяжённостью до 30–40 м, а поле его максимальных содержаний практически совпадает с границами рудного тела, в разрезе которого распределение серебра подвержено как горизонтальной, так и вертикальной зональности.

*Барий.* Среди изоконцентраций бария отчётливо обособляется область средней интенсивности, в 4–8 раз превышающая фоновое содержание. Контрастность изоконцентраций бария высокая из-за соприкосновения областей < 100 и > 1000 г/т. Форма овальная, симметрично вытянутая. Горизонтальная зональность в распределении бария подчёркивается присутствием в приустьевой и забойной частях штольни его низких изоконцентраций, а

максимумы приурочены к серии даек и зоне повышенной трещиноватости. Вертикальная зональность проявлена достаточно чётко. С глубиной по скв. 8а содержание бария относительно равномерно возрастает.

*Стронций.* Выделена одна низкоинтенсивная область, которая хорошо выдержана по простиранию. Ореолы стронция менее контрастные, чем у бария. Наблюдается почти постепенная смена изоконцентраций, форма их овальная, вытянутая. Ореолы стронция постепенно выклиниваются на глубину. Горизонтальная зональность отсутствует, а вертикальная проявлена слабо.

*Олово.* Отчётливо обособляются области высоких концентраций, превышающих фоновые в 15–20 раз. Распределение изоконцентраций резко контрастное, простирание близко к субмеридиональному. Высокие изоконцентрации олова приурочены к зонам трещиноватости и серии даек. В распределении содержания олова горизонтальная зональность отсутствует, отмечается слабая вертикальная по скв. 8а.

*Никель.* Выделяются две высокоинтенсивные области изоконцентраций на общем фоне среднеинтенсивных. Изоконцентрации достаточно контрастны, форма их близка к овальной. Наиболее высокие изоконцентрации никеля тяготеют к рудной зоне, на глубине быстро выклиниваются. Картина вертикальной и горизонтальной зональности распределения никеля нечёткая.

*Кобальт.* Преобладают низкоинтенсивные изоконцентрации кобальта. Среднеинтенсивные оторваны друг от друга и располагаются изолированно в верхней и нижних частях разреза по рудному телу. Ореолы резко контрастные. Соседствуют области концентраций 10 и 1 г/т. Высокие изоконцентрации кобальта приурочены к рудному телу и дайке гранодиорит-порфиров. Горизонтальная зональность выражена слабо. По скв. 8а на самом низком гипсометрическом уровне наблюдается резкое увеличение интенсивности изоконцентраций кобальта, что позволяет говорить о вертикальной зональности его распределения в рудном теле.



*Марганец.* Отчётливо выделяются низко-, средне-, и высокоинтенсивные области изоконцентраций. Наиболее распространены первые. Наблюдается сопряжение областей низких (до 500 г/т) и высоких (10 000 г/т) изоконцентраций. Ореолы обладают значительной вертикальной протяжённостью. Области максимальных изоконцентраций приходятся только на контуры рудного тела и имеют протяжённость до 10 м. Горизонтальная зональность выражена слабо. Резкое увеличение интенсивности изоконцентраций с глубиной по скв. 8а позволяет говорить о вертикальной зональности в распределении содержания марганца.

В заключение рассмотрим морфогенетические особенности геохимических полей свинца и цинка, выделенных на поверхности месторождения Кошмансай.

Содержание свинца колеблется от 10 г/т до значений свыше 1000 г/т; его среднее содержание для кислых пород земной коры (СЗК) по А. П. Виноградову – 20 г/т, а фоновое содержание, вычисленное нами для карбонатных пород верхний р. Кошмансай, – 5,49 г/т. В пределах месторождения обособляются высокие (500–1000 г/т), средние (200–500 г/т) и низкие (до 200 г/т) области концентрации свинца. Области высокой концентрации отмечаются около всех рудных тел, в приконтактных частях интрузивных пород с карбонатными отложениями и мелких линзах аксуйской свиты, вытянутых параллельно их простиранию. Области средней концентрации свинца тоже широко распространены. Подавляющая часть находится вблизи рудных тел. Все мелкие и крупные тектонические зоны маркируются областями низкой концентрации свинца (до 200 г/т).

Содержание цинка варьируется от 1 до более 1000 г/т (СЗК – 60 г/т, фоновое содержание в карбонатных породах – 16,6 г/т). Высокая концентрация (500–1000 г/т) цинка установлена в площади рудных тел в приконтактных зонах магматитов с карбонатными породами и в отложениях аксуйской свиты в виде мелких линзовидных областей, вытянутых вдоль поверхностей напластования. Ореолы средних

значений концентрации цинка (200–500 г/т) занимают более обширные площади и наблюдаются в контактовых зонах граносиенитов и вулканитов с карбонатными отложениями. Для подавляющей части рудной площади характерна низкая концентрация цинка (до 200 г/т). Области наиболее низкого содержания цинка (15–60 г/т) располагаются концентрически вокруг областей с концентрацией 60–200 г/т и по площади не уступают им. Ореолы цинка по сравнению со свинцом менее контрастные и более широкие.

#### **Основные выводы и рекомендации.**

1) Кошмансайское рудное поле обладает отчётливой геохимической зональностью, подразделяясь на собственно Кошмансайское редкометалльно-полиметаллическое месторождение на верхних уровнях рудного поля и Нижнекошмансайское редкометалльно-медное рудопроявление на его нижних уровнях. Тем не менее формирование рудных тел протекало в сходной термодинамической обстановке, в условиях надёжной экранированности, при малых градиентах температур, что позволяет рассматривать рудное поле как единую геохимическую аномалию.

2) На месторождении Кошмансай, то есть на более верхних уровнях рудного поля, основному этапу рудообразования предшествовали активные процессы скарнирования и гидротермального магнезиально-железо-марганцевого преобразования карбонатных пород в провесе кровли Чаткальского гранитного батолита. Именно ему и обязано Кошмансайское рудное поле своим редкометалльным потенциалом, в основном за счёт насыщения исходных гидротерм вольфрамом и висмутом.

3) Эндогенные ореолы рассеяния изучены главным образом по поверхности рудного поля, в связи с чем, несмотря на значительный эрозионный срез, в настоящее время трудно получить объёмную картину рассеяния элементов. Однако имеющиеся данные позволяют установить, что элементная трансляция [5] диффузионного характера от полиметаллического рудного тела в окружающее пространство будет несравненно более слабой, чем инфльтрационная трансляция (по типу «отор-

ванного факела»). Более всего на это указывают резкий перепад концентраций элементов и отсутствие зависимости мощности ореола и транслирующего этот ореол в пространство рудного тела.

4) Выявление медно-висмутовой минерализации в кварц-кальцит-гематитовой брекчии вблизи рудного тела № 2, в экзоконтакте интрузива, подтверждает предположение о пологом падении его контакта под склон, к хребту Ташкескен [2].

Трассирование в западном направлении от кварц-кальцит-гематитовой брекчии сильно ожелезненной структуры повышенной висмутоносности даёт возможность сделать вывод: её необходимо вскрывать горными выработками в первую очередь. Принимая же во внимание наличие близрасположенного шелиф-висмутового рудопоявления Кошмансай-II, можно заключить, что вся площадь заслуживает быть опоискованной на висмут. Не менее важно и установление на левом борту р. Кошмансай наиболее интенсивных ореолов практически всех изученных рудных и редких элементов в зоне контакта покровных кислых вулканитов и граносиенитов с карбонатными породами, а также в отложениях аксуйской свиты, образующих серповидную структуру.

Эта часть рудного поля в пределах изученной площади заслуживает внимания в целях постановки геологоразведочных работ также и потому, что здесь возможно совмещение руд-

ных процессов, связанных с преобразованием карбонатного блока гидротермами вулканогенного и интрузивного источников.

5) Изучение Нижнекошмансайского редкометалльно-медного рудопоявления показало, что появление здесь редких относительно мощных сульфидных тел в скарнах не сопровождается интенсивными метасоматическими преобразованиями. Поведение элементов относительно скарно-рудного тела характеризуется проявлением стандартной, но всё же сильно «сжатой» геохимической зональности. При этом подавляющее число элементов концентрируется в этой части рудного поля, в карбонатной раме интрузива, и, возможно, имеет эманационную природу.

6) Таким образом, нашими первоочередными рекомендациями по изучению Кошмансайского рудного поля являются:

- постановка геологоразведочных работ в центральном блоке и в районе рудного тела № 2 для выявления эталонных геохимических признаков в над- и подрудном сечениях скарно-рудных тел;
- проведение на левом берегу р. Кошмансай детальных поисковых геолого-геохимических работ с заложением профиля буровых скважин над выходом кварц-кальцит-гематит-медно-висмутовой брекчии в целях прослеживания её как в западном направлении, так и, в дальнейшем, в зоне контакта вулканитов и карбонатных пород в приводораздельной части хребта Ташкескен.

## Список литературы

1. Вахрушев В. А. Минералогия, геохимия и образование месторождений скарно-золоторудной формации. – Новосибирск : Наука, 1972. – 238 с.
2. Дунин-Барковская Э. А. Геохимия и минералогия висмута (Чаткало-Кураминские горы). – Ташкент : ФАН, 1979. – 272 с.
3. Лаухин А. Я., Хейфец Д. И., Лебединский А. Е. [и др.] Отчёт по поисково-разведочным работам, проведённым в пределах Кошмансайского рудного поля на месторождениях Кошмансай, Левобережное и на рудопоявлениях Ташкескен, Нижнекошмансайское и Кашела. – Ташкент : Геолфонд, 1973. – 132 с.
4. Мацоккина-Воронич Т. М., Агафонов А. П. [и др.] Теоретическое обоснование отдельных площадей Чаткало-Кураминского региона на свинец, цинк, медь, золото и редкие металлы. Некоторые особенности геологии и рудоносности Акбулак-Кошмансайского региона Чаткальских гор. – Ташкент : ФАН, 1974. – 210 с.
5. Соловов А. П., Матвеев А. А. Геохимические методы поисков рудных месторождений. – М. : МГУ, 1985. – 232 с.

## References

1. Vakhrushev V. A. Mineralogiya, geokhimiya i obrazovanie mestorozhdenii skarnovo-zolotorudnoi formatsii [Mineralogy, geochemistry and formation of deposits of the skarn-gold ore formation], Novosibirsk, Nauka Publ., 1972, 238 p.
2. Dunin-Barkovskaya E. A. Geokhimiya i mineralogiya vismuta (Chatkalo-Kuraminskie gory) [Geochemistry and mineralogy of bismuth (Chatkalo-Kuramin Mountains)], Tashkent, FAN Publ., 1979, 272 p.
3. Laukhin A. Ya., Kheifets D. I., Lebedinskii [at al.] Otchet po poiskovo-razvedochnym rabotam, provedennym v predelakh Koshmansaiskogo rudnogo polya na mestorozhdeniyakh Koshmansai, Levoberezhnoe i na rudoproyavleniyakh Tashkesken, Nizhnekoshmansaiskoe i Kashela [Report on prospecting and exploration work carried out within the Koshmansai ore field at the Koshmansai and Levoberezhnoe deposits and Tashkesken, Nizhnekoshmansaiskoe i Kashela ore occurrences], Tashkent, Geolfond Publ., 1973, 132 p.
4. Matsokina-Voronich T. M., Agafonov A. P. [at al.] Teoreticheskoe obosnovanie otchel'nykh ploshchadei Chatkalo-Kuraminskogo regiona na svinets, tsink, med', zoloto i redkie metally. Nekotorye osobennosti geologii i rudonosnosti Akbulak-Koshmansaiskogo regiona Chatkal'skikh gor [Theoretical substantiation of some areas of the Chatkalo-Kuramin region for lead, zinc, copper, gold and rare metals. Some features of the geology and ore content of the Akbulak-Koshmansai region of the Chatkal Mountains], Tashkent, FAN Publ., 1974, 210 p.
5. Solovov A. P., Matveev A. A. Geokhimicheskie metody poiskov rudnykh mestorozhdenii [Geochemical methods of ore deposit prospecting], Moscow, MGU Publ., 1985, 232 p.

## Авторы

**Ежков Юрий Борисович**

кандидат геолого-минералогических наук  
начальник отдела  
Larsim@yandex.ru

**Рахимов Рахмон Рахимович**

старший научный сотрудник  
Rrahmon46@gmail.com

**Холиёров Анвар Турсинович**

старший научный сотрудник  
xoliyorovanvar@gmail.com

**Тошметов Убайдулло Хамидуллоевич**

старший научный сотрудник  
toshmetovubaydullo88@gmail.com

ГУ «Институт минеральных ресурсов» Госкомгеологии РУз,  
г. Ташкент, Республика Узбекистан

## Authors

**Yuri B. Ezhkov**

PhD  
Head of department  
Larsim@yandex.ru

**Rahmon R. Rahimov**

Senior researcher  
Rrahmon46@gmail.com

**Anvar T. Holiyrov**

Senior researcher  
xoliyorovanvar@gmail.com

**Ubaydullo H. Toshmetov**

Senior researcher  
toshmetovubaydullo88@gmail.com

Institute of Mineral Resources of the Uzbek State Geological  
Committee, Tashkent city, Republic of Uzbekistan

## Особенности геологического строения и локализации оруденения Морянихо-Меркурихинского рудного поля

### Geological structure and localization of mineralization at the Moryanikho-Merkurikhinskoye ore field

Зайцева М. Н.

На примере Морянихо-Меркурихинского рудного поля (Енисейский кряж) рассмотрены литолого-фациальные особенности терригенно-карбонатной (биогермной) рудоносной геологической формации, в пределах которой локализованы стратиформные свинцово-цинковые месторождения в карбонатных толщах. Охарактеризованы рудовмещающие литофации и их палеоструктурная позиция. Автор считает основными благоприятными литолого-фациальными и структурными факторами локализации стратиформного свинцово-цинкового оруденения морянихинского типа: наличие палеовпадин в пределах шельфовой зоны; развитие пород фаций карбонатных пород – доломитов, строматолитовых доломитов и известняков, образующих биогермные постройки на склонах палеоподнятий; наличие примеси туфогенного материала в терригенных разностях пород.

Обозначено влияние тектонических нарушений на формирование рудных залежей и морфологию рудных тел. Рассмотрены основные типы руд, их минеральный состав. Кратко охарактеризованы наиболее крупные и хорошо изученные стратиформные месторождения и рудопроявления свинца и цинка в пределах Морянихо-Меркурихинского рудного поля.

Морянихинское месторождение – типовой объект для поисков стратиформных месторождений свинца и цинка в карбонатных толщах Ангаро-Большепитской минерагенической зоны, что имеет практический интерес при разработке прогнозно-поисковых моделей месторождений и ведёт к повышению эффективности проведения поисковых работ.

Ключевые слова: Енисейский кряж, Ангаро-Большепитская минерагеническая зона, стратиформные полиметаллические месторождения, литолого-фациальный анализ, палеорекострукции, Морянихо-Меркурихинское рудное поле, обстановки формирования месторождений, геолого-промышленные типы.

Zaytseva M. N.

The paper discusses the lithological and facial features of the terrigenous-carbonate (biohermic) ore-bearing geological formation of the Moryanikho-Merkurikhinskoye ore field (Yenisei Ridge), which hosts stratiform lead-zinc deposits in carbonate strata. Ore-hosting lithofacies and their paleostructural position are characterized. Based on the previous studies, as well as the author's own materials obtained as a result of field work, the main favorable lithological, facial and structural factors for hosting Moryanikhinsky-type stratiform lead-zinc mineralization are defined: the presence of paleodepressions within the shelf zone; development of carbonate rocks – dolomites, stromatolite dolomites and limestones, which are biohermic structures on the slopes of paleo-uplifts; the presence of an admixture of tuffaceous material in terrigenous rock varieties.

The influence of tectonic faults on the formation of ore deposits and the morphology of ore bodies is indicated. The main types of ores of the Moryanikho-Merkurikhinsky ore field, as well as their mineral composition are described. The paper discusses the main ore types, as well as their mineral composition typical of the Moryanikho-Merkurikhinskoye ore field. The largest and well-studied lead and zinc stratiform Moryanikhinskoye deposit and Merkurikhinskoye ore occurrence located within the ore field are briefly characterized.

The Moryanikhinskoye deposit is a typical example for searching for stratiform deposits of lead and zinc in the carbonate strata of the Angara-Bolshepitskaya mineragenic zone, which is of practical interest in developing predictive prospecting models of deposits and improving the efficiency of prospecting.

Keywords: Yenisei ridge, Angara-Bolshepitskaya mineragenic zone, stratiform polymetallic deposits, lithological and facial analysis, paleoreconstructions, Moryanikho-Merkurikhinskoye ore field, deposit formation conditions, geological and economic types.

Для цитирования: Зайцева М. Н. Особенности геологического строения и локализации оруденения Морянихо-Меркурихинского рудного поля. Руды и металлы. 2021. № 4. С. 75–84. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10029.

For citation: Zaytseva M. N. Geological structure and localization of mineralization at the Moryanikho-Merkurikhinskoye ore field. Ores and metals, 2021, № 4, pp. 75–84. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10029.

В пределах Енисейского кряжа (Красноярский край) наиболее перспективна на выявление месторождений свинца и цинка Ангаро-Большепитская минерагеническая зона. Наибольший промышленный интерес вызывают месторождения свинцово-цинкового стратиформного типа в карбонатных комплексах рифейского возраста [2, 3].

На территории Ангарского рудного района поисковый интерес представляют породы Тунгусикского формационного комплекса, которые служат основными рудовмещающими для колчеданно-полиметаллического и свинцово-цинкового оруденения. В составе изучаемого формационного комплекса выделяются песчано-глинисто-сланцевая, терригенно-карбонатная (биогермная), вулканогенно-углеродисто-кремнисто-карбонатная и углеродисто-терригенно-карбонатная формации. Каждая из них имеет свой специфический набор литофаций. Ранее нами была дана общая характеристика каждой формации Тунгусикского формационного комплекса [4, 5]. В настоящей работе на примере Морянихо-Меркурихинского рудного поля рассмотрены литолого-фациальные особенности терригенно-карбонатной (биогермной) рудоносной геологической формации, в пределах которой локализованы свинцово-цинковые месторождения в карбонатных толщах (рис. 1).

В ходе проведённых (2017–2020 гг.) поисковых работ на свинцово-цинковое оруденение на Морянихинской площади в Ангарском рудном районе были получены новые данные о геологическом строении и литолого-фациальных особенностях района, в том числе Морянихо-Меркурихинского рудного поля.

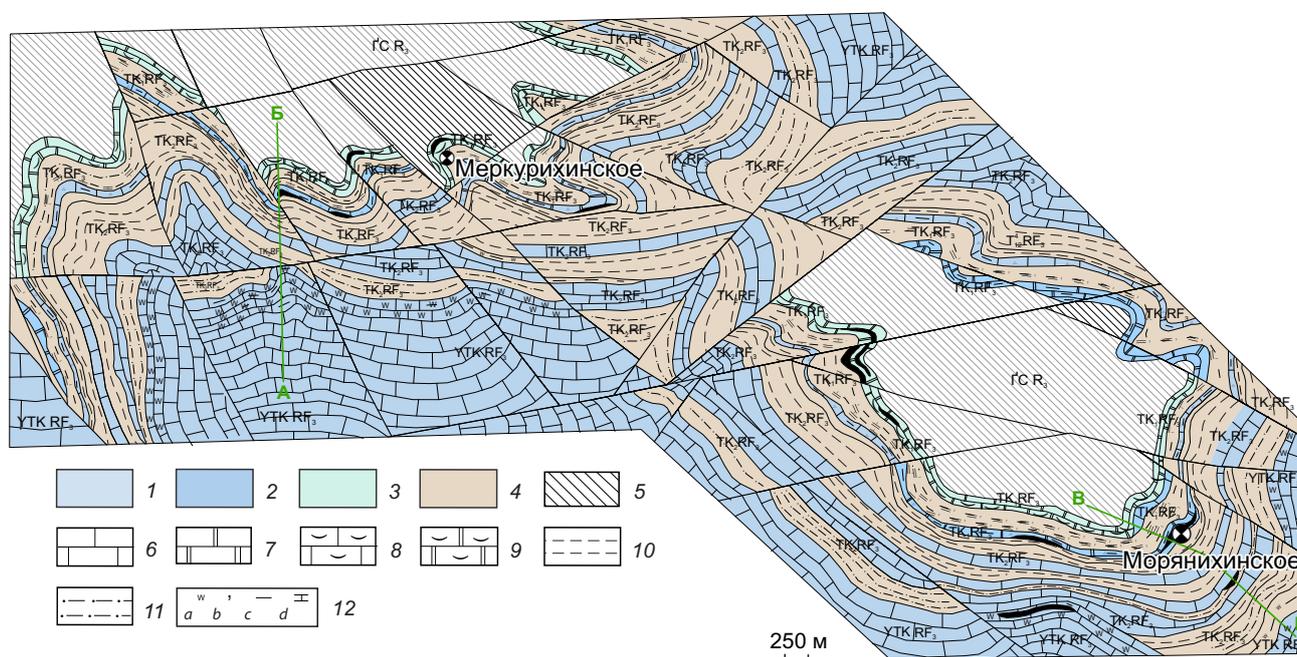
Морянихо-Меркурихинское рудное поле расположено на западе Енисейского кряжа в водораздельной части рек Меркуриха-2 и Моряниха – правых притоков р. Татарка. В геологическом строении рудного поля участвуют преимущественно верхнерифейские породы, соответствующие верхней части тунгусикской серии, представленные породами терригенно-карбонатной формации, с которой ассоциирует свинцово-цинковый стратиформный тип месторождений в карбонатных комплексах.

В пределах Морянихо-Меркурихинского рудного поля расположены Морянихинское месторождение и Меркурихинское и Верхне-Пихтовое рудопроявления.

Геологическое строение и литологический состав пород к настоящему времени наиболее изучены в районе Морянихинского месторождения и Меркурихинского рудопроявления – представителей стратиформных свинцово-цинковых руд в карбонатных толщах терригенно-карбонатной (биогермной) формации.

С учётом информации предшественников и на основе личных исследований автором ниже приведены характеристика рудоносных (рудовмещающих) групп фаций, состав и мощность перекрывающих и подстилающих пород и их фациальная изменчивость, интерпретация палеоструктурной позиции рудовмещающих фаций и рудных залежей, рассмотрены рудоподводящие и рудоконтролирующие тектонические нарушения, наличие рудокластов и сингенетичной минерализации в перекрывающих отложениях, морфология рудных тел, типы руд и главные рудные минералы.

*Характеристика рудоносных (рудовмещающих) групп фаций.* Рудовмещающая ассоциация литофаций отличается большим разнообразием слагающих пород и их фациальной изменчивостью. В её нижней части выделяются следующие пачки (снизу вверх): гравелитов; хемогенных железистых доломитов и известняков; доломитовых и известняковых интракластов; биогермная водорослевых железистых доломитов. Выше залегает пачка алевритоглинистых, глинистых и алевролитовых сланцев с маломощными отложениями турбидитов, которые являются инъективным элементом разреза рудовмещающей толщи. Они лишь на незначительное время меняли общий характер осадконакопления. Завершает разрез пачка карбонатных седиментационных брекчий, состоящих из обломков доломитов, известняков, глинистого и карбонатно-алевритоглинистого матрикса. В составе матрикса устанавливается наличие изменённого пеплового материала. Анализ распространённости фациальных разновидностей оползневых отложений указывает на то, что оползанию под-



**Рис. 1. Литолого-фациальная карта Морянихо-Меркурихинского рудного поля с предполагаемыми рудными телами. Составлена по материалам отчёта М. М. Лапшина, 1990 г.:**

фации карбонатных пород шельфа: 1 – доломиты, доломитистые известняки, кремнистые доломиты, сидериты, 2 – известняки, доломитистые известняки, глинистые известняки, углеродистые известняки, кремнистые известняки, 3 – органогенные известняки и доломиты; терригенные отложения шельфа: 4 – конгломераты, песчаники, алевролиты, кремнистые алевролиты, карбонатистые алевролиты, кремнисто-карбонатные алевролиты, углеродисто-кремнистые алевролиты, углеродистые алевролиты, глинистые алевролиты с прослоями турбидитов, аргиллиты, туфы и туфопесчаники; 5 – подрудная песчано-глинисто-сланцевая формация; 6 – известняки; 7 – доломиты; 8 – известняки органогенные; 9 – доломиты органогенные; 10 – алевролиты; 11 – аргиллиты; 12 – дополнительные литологические знаки: a – углеродистость, b – кремнистость, c – глинистость, d – карбонатность

**Fig. 1. Lithologic facial map of Moryanikho-Mercurikhinskoye ore field showing inferred orebodies. Based on M. M. Lapshin report materials, 1990:**

carbonate shelf rock facies: 1 – dolomite, dolomitic limestone, siliceous dolomite, siderite, 2 – limestone, dolomitic limestone, clayey limestone, carbonaceous limestone, siliceous limestone, 3 – organogenic limestone and dolomite; terrigenous shelf deposits: 4 – conglomerates, sandstone, siltstones, siliceous siltstones, clayey siltstones with turbidite bands, argillite, tuffs and tuff sandstone; 5 – sub-ore sand-clay-schist sequence; 6 – limestone; 7 – dolomite; 8 – organogenic limestone; 9 – organogenic dolomite; 10 – siltstones; 11 – argillite; 12 – additional lithologic marks: a – carbon content, b – Si content, c – clay content, d – carbonate content

верглись отложения со склонов локальных подводных поднятий.

В пределах Морянихинского месторождения разрез рудовмещающей пачки отличается преобладанием в нижней её части тёмно-серых и серых доломитов, неяснослоистых крупных оползневых блоков тех же доломитов размером от первых метров до 10 м. В верхней части разреза отмечаются оползневые брекчии с обломками мелких и средних размеров («конгломератовидные известняки») (рис. 2). Мощность рудовмещающей пачки в центральной части месторождения 80–130 м.

По латерали по направлению к флангам мощность рудовмещающей пачки постепенно снижается до 22–35 м. Также снижается мощность доломитовой составляющей разреза. В настоящее время возможно говорить о прямой коррелятивной зависимости мощности рудных тел от мощности рудовмещающей пачки в целом и доломитовой её части. На юго-западном фланге месторождения явно просматривается тенденция к повышению роли примеси мелкообломочного материала в разрезе рудовмещающей пачки, а на северо-восточном – значительное снижение мощности доломитов, а также уменьшение содержания железа и марганца.

Контакт рудовмещающей пачки с вышележащими породами постепенный и проводится, как правило, по исчезновению последних скоплений карбонатных обломков и появлению ясной параллельной слоистости.

Вышележащие надрудные отложения представлены карбонатно-терригенными (карбонатно-глинистыми сланцами) и терригенными (глинистыми, известняковыми брекчиями с прослоями известково-доломитовых тефроидов, алевроито-глинистыми сланцами, как правило, яснопараллельно-слоистыми) породами. По минеральному составу выделяются сланцы кварц-хлорит-серицитовые, хлорит-серицитовые, кварц-хлорит-хлоритоид-серицитовые.

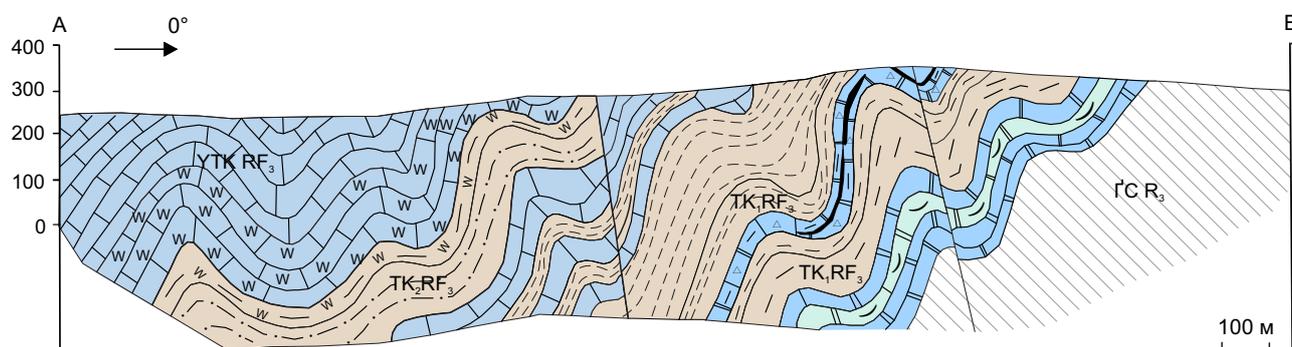
На Меркурихинском рудопроявлении надрудные отложения характеризуются наличием обломковидных обособлений, рудокластов, выполненных пиритом, размером от нескольких миллиметров до нескольких сантимет-

ров, нарушающих слоистость во вмещающих породах (рис. 3). Мощность рудовмещающей пачки в пределах месторождения изменяется от 25 до 80–100 м. Закономерности в изменении состава и мощности пачки в центральной и фланговых частях рудопроявления не выявлены, хотя наблюдается тенденция к снижению мощности на флангах, особенно в северо-восточном направлении.

Подстилающие рудовмещающую пачку отложения на площади Морянихинского месторождения представлены тёмно-серыми неяснослоистыми глинистыми сланцами. Этот тип подстилающих отложений в пределах Морянихинско-Меркурихинского рудного поля более характерен для участков площади, содержащих полиметаллическое оруденение и сульфидную минерализацию. На безрудных участках преобладающая разновидность подстилающих пород – переслаивание алевроитовых и глинистых сланцев с градационной слоистостью.

Перечисленные породы рассматриваются в качестве единого обобщённого литотипа, отвечающего обстановкам накопления сублитеральной (неритовой) зоны. Формирование осадков происходило выше базиса волнения.

*Интерпретация палеоструктурной позиции рудовмещающих фаций и рудных залежей.* В палеоструктурном плане площадь Морянихинско-Меркурихинского рудного поля во время накопления пород рудовмещающей ассоциации литофаций представляла собой нижнюю часть шельфового склона и область непосредственного подножия [6, 7]. Месторождение Морянихинское и рудопроявление Меркурихинское находятся в районе подножия склона на границе мелко- и крупнообломочных фаций оползневых доломитов и доломитовых известняков. Значительное повышение мощности пород рудовмещающей пачки в районе Морянихинского месторождения (в 1,5–2 раза) позволяет предполагать здесь наличие локальной палеовпадины. Это предположение подтверждается также наличием неслоистых карбонатно-глинистых пород застойно-иловых фаций. Во впадине среди крупнообломочных оползневых брекчий доломитов и сосредоточено орудене-

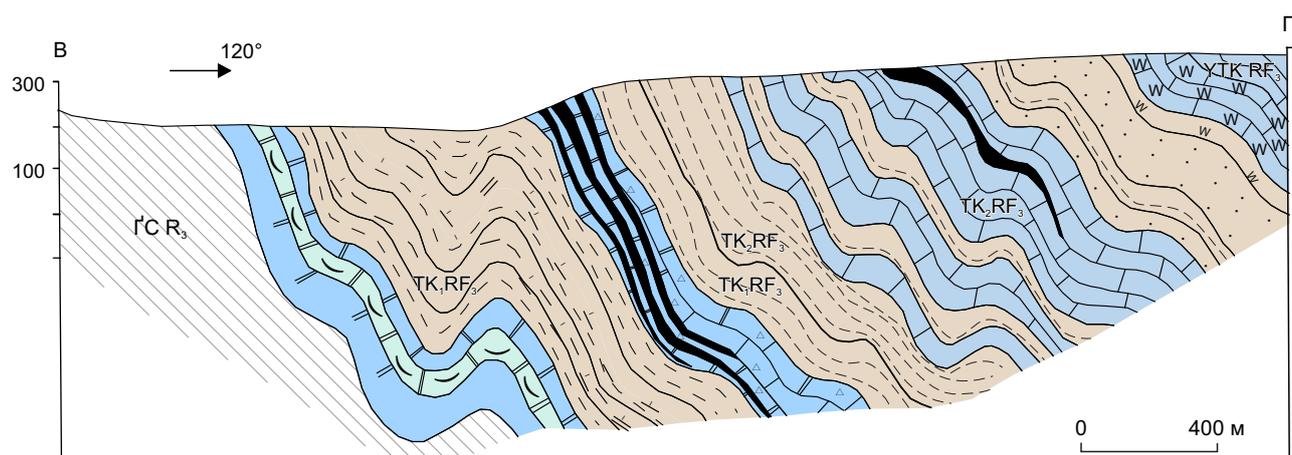


**Рис. 2. Литолого-фациальный разрез по линии А–Б в районе Морянихинского месторождения:**

усл. обозн. см. рис. 1

**Fig. 2. Lithologic facial section along A–B line in the area of Moryanikhinskoye deposit:**

see Fig. 1 for legend



**Рис. 3. Литолого-фациальный разрез по линии В–Г в районе Морянихинского месторождения:**

усл. обозн. см. рис. 1

**Fig. 3. Lithologic facial section along B–Г line in the area of Moryanikhinskoye deposit:**

see Fig. 1 for legend

ние главной залежи Морянихинского месторождения. За пределами впадины оруденение, как правило, либо отсутствует, либо представлено убогой галенит-сфалеритовой минерализацией. Значения модуля Страхова ( $Fe + Mn$ ) /  $Ti$  для пород рудовмещающей пачки находятся в диапазоне от 20 до 30, что характерно

для шельфовых и прибрежно-морских фаций, удалённых от центра вулканизма [8]. Это говорит о периодическом поступлении эксгальционных растворов и участии их в формировании химического состава осадка. Поступление рудоносных растворов, очевидно, происходило с восточного фланга месторождения, о

чём свидетельствует геохимическая зональность рудоносной части разреза и рудных тел (М. М. Лапшин, Ю. А. Забиров, 1986). Максимум рудоотложения приходится на восточную и центральную части палеовпадины, в других её частях встречена лишь убогая вкрапленность сульфидов свинца и цинка.

*Рудоподводящие и рудоконтролирующие тектонические нарушения.* Разрывные нарушения не играют значительной роли в геологическом строении Морянихо-Меркурихинского рудного поля. Разрывная тектоника в данном случае носит пострудный характер и лишь незначительно влияет на морфологию рудных тел. Наиболее крупные разрывные нарушения имеют северо-западное простирание и формируют горстообразное поднятие на участке собственно периклинального замыкания Морянихинской антиклинали, ограничивая блок, в котором и расположены рудные тела. Амплитуда смещения по ним не превышает первых десятков метров. Оперяющие трещины в некоторой степени влияют на морфологию рудных тел. К ним приурочены переотложенные бедные вкрапленные и послойно-вкрапленные руды в рудовмещающей пачке. Зоны разломов выделяются кварцевыми жилами и прожилками, а также узкой (2–10 м) зоной хлоритовых метасоматитов. Как прожилки, так и метасоматиты не несут свинцово-цинковой минерализации. Оперяющие трещины, пересекая рудные тела, образуют регенерированную жильную фазу оруденения, не превышающую в общем балансе рудного вещества 1–5 %. Руды и вмещающие их породы метаморфизованы в пределах зеленосланцевой фации.

Рудовмещающие отложения характеризуются общим ритмично-волнообразным типом распределения элементов с повышением в рудной зоне содержания  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$  и большинства рудогенных элементов (В. В. Кузнецов и др., 1989).

*Морфология рудных тел.* Как правило, это линзо-, плито- и пластообразные тела, залегающие согласно и субсогласно со слоистостью и общим структурном плане строения рудовмещающих горизонтов.

*Типы руд и главные рудные минералы.* Минеральный состав руд достаточно простой. Главные рудные минералы – галенит и сфалерит. Пирит в рудовмещающей пачке и рудных телах встречается повсеместно в количестве 1–3 %. Второстепенные рудные минералы – пирротин, халькопирит, блёклая руда, бурнонит. Фиксируются также единичные вкрапления пентландита, миллерита, алтаита, борнита, герсдорфита [1]. Нерудные минералы – кварц, анкерит (главные), доломит, редко барит, арагонит. Преобладающая структура руд аллотриоморфнозернистая. Текстуры редко- и густовкрапленные брекчиевые, полосчатые, послойно-вкрапленные, иногда массивные. Незначительная часть оруденения представлена прожилковыми рудами.

Названные минералы образуют несколько парагенетических минеральных ассоциаций. Наиболее ранняя и распространённая – пирит-сфалерит-галенит-кварц-анкеритовая, отвечающая синхронному с осадконакоплением этапу рудообразования. Слагающие её сульфиды образуют скрытокристаллические и неравнозернистые агрегаты, среди которых отмечаются выделения галенита, сфалерита, пирита глобулярного строения, при этом отсутствуют какие-либо признаки замещения пород. Метаморфическому этапу соответствуют жильная кварц-карбонат-сульфидная ассоциация, для которой характерны крупно- и неравнозернистое строение минеральных агрегатов, возникших в процессе перекристаллизации первичных рудных концентраций, и ассоциация сульфидов с жильными минералами зеленосланцевой фации метаморфизма. Жильная ассоциация, кроме сфалерита, галенита и пирита, в значительном количестве может содержать халькопирит и блёклые руды.

*Промышленное оруденение* характеризуется в целом преобладанием свинца над цинком и низкой степенью колчеданности. В пределах рудных залежей чётко выделяются несколько типов руд: 1) существенно галенитовые с примесью сфалерита до 15–20 % от всей рудной массы; 2) существенно сфалеритовые; 3) галенит-сфалеритовые, содержащие главные рудные минералы в разных количествах.

Перечисленные текстуры руд проявлены во всех трёх минеральных типах. В рудной залежи обнаруживается чёткая зональность в распределении типов руд. Первые локализуются преимущественно в верхних и средних частях крутопадающих рудных тел, уходя на глубину на юго-западном фланге, вторые – в средних и нижних частях и тяготеют к северо-восточному флангу. Галенит-сфалеритовые руды занимают центральную часть залежи, образуя наиболее богатые блоки рудных тел. Установлено, что по падению рудных тел отчётливо наблюдается смена свинцовых руд цинковыми. Такая же тенденция прослеживается и по мощности рудных тел от всячего блока к лежащему.

*Меркурихинское рудопроявление* расположено в юго-восточной части Морянихинской антиклинали. Оруденение приурочено к вулканогенно-терригенной субформации терригенно-карбонатной формации. В тектоническом отношении Морянихинско-Меркурихинское рудное поле относится к Большепитскому синклинию. Тектонические нарушения преимущественно имеют сбросо-сдвиговый характер. Вулканогенно-осадочные породы представлены туффитами. В пределах рудного поля в виде даек силлов встречаются интрузии метаморфизованных долеритов мощностью от десятков сантиметров до нескольких метров.

В основании разреза – тонкое переслаивание тёмно-серых, глинистых и алеврито-глинистых сланцев и серых кварцитоидных алевролитов. В результате метаморфизма породы серицитизированы, хлоритизированы. В незначительных количествах в прослоях отмечается доломит. Порфиробласты пирита распространены повсеместно. Залегание пород преимущественно наклонное, реже субвертикальное.

Выше по разрезу для пород характерно чередование интервалов терригенных пород и доломитовых разностей. Доломиты слоистые, массивные, в меньшей степени строматолитовые, с брекчиевидными и подводно-оползевыми текстурами, местами перекристаллизованные до средне- и крупнокристаллических мраморов, с примесью алевритового и песчаного материала по прослоям.

Терригенные породы – глинистые и алеврито-глинистые сланцы (по алевролитам) с прослоями кремнисто-доломитистых алевролитов. Контакт между интервалами терригенных и доломитовых разностей постепенный и часто визуально не различим, устанавливается по выявлению доломитов. Породы перекристаллизованы, в терригенных разностях прослеживается градиционное распределение обломочного материала.

Все породы претерпели метаморфизм зеленосланцевой фации с разной интенсивностью проявления изменений. Строение осложнено складчатостью нескольких порядков.

Рудовмещающие литофации в районе рудопроявления представлены глинистыми известняками, строматолитовыми доломитами и карбонатно-кремнистыми алевролитами. В целом разрез характеризуется чередованием терригенных (кремнистых алевролитов и пелитов, алевропесчаников, которые нередко сильно метаморфизированы до хлоритоидных сланцев) с пачками карбонатных пород (доломитов, кремнистых доломитов, строматолитовых доломитов, кремнистых и глинистых известняков). Оруденение тяготеет к брекчиевидным известнякам и доломитам, в том числе строматолитовым, которые, по всей видимости, брекчированы в результате подводно-оползневых процессов, подвержены перекристаллизации вследствие регионального метаморфизма.

Текстура руд вкрапленная, прожилково-вкрапленная, часто брекчиевидная, в прожилках сложных руд массивная. Структура обычно гипидиоморфнозернистая. Кроме галенита и сфалерита, иногда развит халькопирит, образующий вроски в галените, реже самостоятельные скопления. Пирит равномерно рассеян в породе или ассоциирует с галенитом и сфалеритом.

В палеоструктурном плане *Морянихинское месторождение* представляет собой палеовпадину у подножия склонов палеоподнятия. Данное утверждение основано на трёх фактах: наличии в разрезе карбонатных оползневых брекчий; резком увеличении мощности карбонатных отложений в центральной части палео-



впадины; наличии подстилающих карбонатно-глинистых пород застойно-иловых фаций.

В пределах Морянихинского месторождения выявлены пять линзо-плитообразных рудных залежей, согласно залегающих с вмещающими их породами. Контакты рудных тел нечёткие и выделяются в основном по данным опробования.

Размеры рудных тел, оконтуренных с заданными бортовыми содержаниями свинца и цинка, по простиранию и падению составляют от 200–300 до 850 м при мощности не более 30 м. Отношение мощности к простиранию и падению в среднем составляет 1 : 50 : 80 (по падению залежь не оконтурена, но наблюдается тенденция к выклиниванию). Рудные тела имеют отчётливое юго-западное склонение. Их дугообразная в плане форма подчёркивает структурный рисунок рудовмещающей пачки, с которой они участвуют во всех складчатых и разрывных деформациях.

Отметим, что рассеянная галенит-сфалеритовая минерализация с содержаниями ниже промышленных концентраций прослеживается и за пределами контура на расстоянии до первых метров. Рудные тела характеризуются полосчатой прожилково-вкрапленной текстурой, с отчётливо выраженной приуроченностью к стратифицированным литофациям с преобладанием карбонатной составляющей.

Общее количество сульфидов в рудах составляет около 15 %. Преобладает сфалерит (клеюфан – 10 %), в значительно меньшем количестве находится пирит (4,5 %), галенит присутствует в виде примеси (0,5 %). Сульфиды находятся в виде отдельных обломочных зёрен. В ассоциации с галенитом отмечена блёклая руда. Свинцово-цинковые руды Морянихинского месторождения сложены существенно карбонатными породами с прожилково-вкрапленной пирит-галенит-сфалеритовой минерализацией.

Месторождения данного типа, как показал многолетний опыт работ, являются неблагоприятными объектами для изучения геофизическими методами из-за слабой дифференциации по физическим свойствам между рудами и вмещающими породами. В связи с

этим имеющиеся материалы не позволяют составить полное представление о геолого-геофизической модели Морянихинского месторождения.

Рудовмещающие породы – доломиты, оползневые доломитовые брекчии. В разрезе также имеются кварц-хлорит-серицитовые сланцы. Мощность рудовмещающих пачек в центральной части достигает 230 м. По флангам наблюдается снижение мощности, а также доломитовой составляющей в разрезе. Перекрывающие отложения – хлоритоидные сланцы, подстилающие – тёмно-серые неяснослоистые глинистые сланцы по пелитам.

*Выводы.* Итак, для Морянихинско-Меркурихинского рудного поля с одноимёнными месторождениями характерно широкое распространение рудоносных карбонатных фаций с преобладанием известняков над доломитами и доломитовыми известняками. Наиболее перспективны на выявление свинцово-цинковой минерализации биогермные постройки и продукты их разрушения (брекчиевые строматолитовые доломиты). Морянихинское месторождение является типовым объектом для поисков стратиформных месторождений свинца и цинка в карбонатных толщах Ангаро-Большепитской минерагенической зоны.

Основными благоприятными литолого-фациальными и структурными факторами для локализации стратиформного свинцово-цинкового оруденения морянихинского типа являются: наличие палеовпадин в пределах шельфовой зоны; развитие пород фаций карбонатных пород – доломитов, строматолитовых доломитов и известняков, представляющих собой биогермные постройки на склонах палеоподнятий; наличие примеси туфогенного материала в терригенных разностях пород, что свидетельствует об относительной близости палеовулканической постройки.

Генетические представления о данном типе месторождений сформированы на основании вышеизложенного материала и ранее опубликованных работ. Образование этого типа месторождений связано с поступлением рудоносных растворов в рудоконтролирующую палеовпадину и отложением рудного вещества

в нелигитированном осадке известково-доломитового состава по схеме придонного метасоматического замещения. Выход растворов в придонную часть палеобассейна указывает на то, что источник находился в непосредственной близости от впадины, при этом отсутствие рудных концентраций за пределами впадины может объясняться достаточно быстрым движением рудообразующих растворов по склону в придонную часть. Зона вы-

водящего канала, по-видимому, была расположена в восточной части палеовпадины и контролировалась долгоживущими разрывными нарушениями.

В процессе диагенеза и последующего метаморфизма рудная минерализация приобрела современные формы, причём часть рудного вещества переотложена в жилах в период активизации деятельности разрывных нарушений.

## Список литературы

1. Бранднер Н. Х., Забиров Ю. А., Пономарёв В. Г., Хохлов А. П. Стратиформное Pb-Zn оруденение в карбонатных толщах Енисейского кряжа (Моряника) // Геология и геофизика. – 1985. – № 2.
2. Донец А. И., Конкин В. Д. Геолого-промышленные типы и региональные геологические особенности стратиформных свинцово-цинковых месторождений в карбонатных толщах // Отечественная геология. – 2017. – № 6. – С. 31–39.
3. Зайцева М. Н., Инякин А. В. Типы месторождений свинца и цинка Енисейского кряжа и основы их прогноза и поисков // Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов: Сборник тезисов докладов IX Международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 167–168.
4. Зайцева М. Н., Инякин А. В., Кузнецов В. В., Конкина А. А. Прогнозно-поисковые модели полиметаллических месторождений Енисейского кряжа // Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов: Сборник тезисов докладов VIII Международной научно-практической конференции. – 2018. – С. 128–129.
5. Зайцева М. Н., Кузнецов В. В., Конкин В. Д., Саравина Т. В., Инякин А. В., Богославец Н. Н., Хачатуров М. М. Обстановки формирования месторождений свинца и цинка Ангаро-Большепитской минерагенической зоны, Енисейский кряж // Руды и металлы. – 2020. – № 3. – С. 52–67.
6. Пономарёв В. Г., Забиров Ю. А. Поисковые признаки и оценочные критерии свинцово-цинкового оруденения Енисейского кряжа. – Новосибирск : ИГиГ СО АН СССР, 1988. – 141 с.
7. Пономарёв В. Г., Акимцев В. А., Забиров Ю. А., Саравин С. В. Методологические принципы моделирования стратиформных свинцово-цинковых проявлений в терригенно-карбонатных толщах. Генетические модели стратиформных месторождений свинца и цинка // Труды института геологии и геофизики им. 60-летия Союза ССР. – 1991. – Вып. 784. – С. 13–41.
8. Саравин С. В. Литология, геохимия и фациальный анализ рифейских отложений Морянихо-Меркурихинского рудного поля (Енисейский кряж) // Бассейновый литогенез и минерагения. – Новосибирск : ИГиГ СО АН СССР, 1989. – С. 62–104.

## References

1. Brandner N. Kh., Zabirov Yu. A., Ponomarev V. G., Khokhlov A. P. Stratiformnoe Pb-Zn orudnenie v karbonatnykh tolshchakh Eniseiskogo kryazha (Moryanikha) [Stratiform Pb-Zn mineralization in carbonate strata of the Yenisei Ridge (Moryanikha)], *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 1985, No 2. (In Russ.).
2. Donetsk A. I., Konkin V. D. Geologo-promyshlennye tipy i regional'nye geologicheskie osobennosti stratiformnykh svintsovo-tsinkovykh mestorozhdenii v karbonatnykh tolshchakh [Geological and industrial types and regional geological features of stratiform lead-zinc deposits in carbonate strata], *Otechestvennaya geologiya* [National Geology], 2017, No 6, pp. 31–39. (In Russ.).



3. Zaitseva M. N., Inyakin A. V. Tipy mestorozhdenii svintsya i tsinka Eniseiskogo kryazha i osnovy ikh prognoza i poiskov [Types of lead and zinc deposits of the Yenisei ridge and the basics of their prediction and prospecting], *Nauchno-metodicheskie osnovy prognoza, poiskov, otsenki mestorozhdenii almazov, blagorodnykh i tsvetnykh metallov: Sbornik tezisev dokladov IKh Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Scientific and methodological foundations of forecasting, prospecting, evaluation of deposits of diamonds, precious and non-ferrous metals: Collection of abstracts of the IX International Scientific and Practical Conference], 2019, pp. 167–168.
4. Zaitseva M. N., Inyakin A. V., Kuznetsov V. V., Konkina A. A. Prognozno-poiskovye modeli polimetallicheskich mestorozhdenii Eniseiskogo kryazha [Predictive prospecting models of polymetallic deposits of the Yenisei ridge], *Nauchno-metodicheskie osnovy prognoza, poiskov, otsenki mestorozhdenii almazov, blagorodnykh i tsvetnykh metallov: Sbornik tezisev dokladov VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Scientific and methodological foundations of forecasting, prospecting, evaluation of deposits of diamonds, precious and non-ferrous metals: Collection of abstracts of the VIII International Scientific and Practical Conference], 2018, 128–129.
5. Zaitseva M. N., Kuznetsov V. V., Konkin V. D., Seravina T. V., Inyakin A. V., Bogoslavets N. N., Khachaturov M. M. Obstanovki formirovaniya mestorozhdenii svintsya i tsinka Angaro-Bol'shepitskoi mineragenicheskoi zony, Eniseiskii kryazh [Scientific and methodological foundations of forecasting, exploration, evaluation of deposits of diamonds, precious and non-ferrous metals: Collection of abstracts of the VIII International Scientific and Practical Conference], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2020, No 3, pp. 52–67. (In Russ.).
6. Ponomarev V. G., Zabirov Yu. A. Poiskovye priznaki i otsenochnye kriterii svintsovo-tsinkovogo orudneniya Eniseiskogo kryazha [Search signs and evaluation criteria of lead-zinc mineralization of the Yenisei ridge], Novosibirsk, IGI SO AN SSSR Publ., 1988, 141 p.
7. Ponomarev V. G., Akimtsev V. A., Zabirov Yu. A., Saraev S. V. Metodologicheskie printsipy modelirovaniya stratiformnykh svintsovo-tsinkovykh proyavlenii v terrigenno-karbonatnykh tolshchakh. Geneticheskie modeli stratiformnykh mestorozhdenii svintsya i tsinka [Methodological principles of modeling stratiform lead-zinc manifestations in terrigenous-carbonate strata. Genetic models of stratiform deposits of lead and zinc], *Trudy instituta geologii i geofiziki im. 60-letiya Soyuzha SSR* [Proceedings of the Institute of Geology and Geophysics named after the 60th anniversary of the USSR], 1991, Vyp. 784, pp. 13–41. (In Russ.).
8. Saraev S. V. Litologiya, geokhimiya i fatsial'nyi analiz rifeiskikh otlozhenii Moryanikho-Merkurikhinskogo rudnogo polya (Eniseiskii kryazh) [Lithology, geochemistry and facies analysis of Riphean deposits of the Moryanicho-Merkurikhinsky ore field (Yenisei Ridge)], *Basseinovy litogenez i minerageniya* [Basin lithogenesis and minerageny], Novosibirsk, IGI SO AN SSSR Publ., 1989, pp. 62–104. (In Russ.).

### Автор

**Зайцева Мария Николаевна**

научный сотрудник  
zaytseva@tsnigri.ru

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

### Author

**Maria N. Zaitseva**

Researcher  
zaytseva@tsnigri.ru

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

## **Базиты Вилюйско-Мархинского дайкового пояса (Вилюйский палеорифт) и их соотношения с кимберлитами Накынского поля**

### **Basites of Vilyui-Markhinsky dike belt (Vilyui paleorift) and their relations with Nakyn field kimberlites**

**Черенков В. Г., Корнилова В. П.,  
Голубева Ю. Ю., Герасимова М. В.**

**Cherenkov V. G., Kornilova V. P.,  
Golubeva Yu. Yu., Gerasimova M. V.**

Возникший в результате девонского рифтинга на восточной окраине Сибирской платформы Вилюйско-Мархинский дайковый пояс (ВМДП) – краевая часть (область рассеянного рифтогенеза) Вилюйской палеорифтовой структуры. Накынное поле расположено в центральной части пояса, но контролируется независимой от него системой тектонических нарушений северо-северо-восточного направления. Дайка пояса интрузирует кимберлитовую трубку Ньюрбинская. На их контакте образовались своеобразные брекчии – результат взаимодействия продуктов дегазации базитовой магмы с кимберлитами. Дolerиты дайки термально метаморфизуют брекчии, в которых возникли высокотемпературные новообразования андрадита, Al-лизардита и клинохризотила. Базиты ВМДП представляют собой единую ассоциацию, в которой выделяются два ряда пород: умеренно-титанистые ( $\text{TiO}_2 \sim 2,5$  мас. %) с нормальной щёлочностью и низким содержанием  $\text{P}_2\text{O}_5$  и высокотитанистые ( $\text{TiO}_2 \sim 4,4$  мас. %), изредка с умеренной щёлочностью. Различия вещественного состава даек незначительны. Определение возраста базитов пояса  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  методом показывает, что они образовались в узком временном интервале, отвечающем верхам франского – фаменскому ярусу верхнего девона (368,5–376,3 млн лет). Размещение базитов и кимберлитов Накынского поля контролируют разломы различных типа, ориентировки, возрастов. Первыми образовались кимберлиты, интрузии ВМДП – вторыми.

Ключевые слова: девонский палеорифт, дайковый пояс, взрывные брекчии, базиты, кимберлиты, трубки, дайки, тектонический контроль, возраст.

The Vilyui-Markhinsky dike belt (VMDB), which was formed as a result of Devonian rifting on the eastern margin of the Siberian Platform, is the marginal part (area of scattered rifting) of the Vilyui paleorift structure. The Nakyn field is located in the central part of the belt, but is controlled by an independent system of NNE-trending tectonic faults. The belt dyke intrudes the Nyurbinskaya kimberlite pipe. On their contact, specific breccias were formed resulting from the interaction between degassing products of basic magma with kimberlites. The typical zonality of the dyke endocontact indicates a later dyke introduction. Dolerite dikes thermally metamorphosed breccias in which high-temperature neoplasms of andradite, Al-lizardite, and clinochrysoilite were generated. VMDB basites represent a single association, in which two series of rocks are distinguished: moderate-titanium ( $\text{TiO}_2 \sim 2.5$  wt. %) with normal alkalinity and low  $\text{P}_2\text{O}_5$  content, and high-titanium ( $\text{TiO}_2 \sim 4.4$  wt. %), occasionally with moderate alkalinity. The differences in the dike composition are insignificant and are the result of natural variations in the composition of individual bodies.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of the VMDB basites, the method characterized by the best results convergence, shows that they formed in a narrow timeframe corresponding to the Upper Frasnian – Famennian stage of the Upper Devonian (368.5 to 376.3 Ma). The location of the Nakyn field basites and kimberlites is controlled by faults of various types, orientation and age. Kimberlites formed first, and VMDB intrusions followed.

Keywords: Devonian paleorift, dikebelt, explosive breccias, basites, kimberlites, kimberlite pipes, dikes, tectonic control, age.

Для цитирования: Черенков В. Г., Корнилова В. П., Голубева Ю. Ю., Герасимова М. В. Базиты Вилюйско-Мархинского дайкового пояса (Вилюйский палеорифт) и их соотношения с кимберлитами Накынского поля. Руды и металлы. 2021. № 4. С. 85–108. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10030.

For citation: Cherenkov V. G., Kornilova V. P., Golubeva Yu. Yu., Gerasimova M. V. Basites of Vilyui-Markhinsky dike belt (Vilyui paleorift) and their relations with Nakyn field kimberlites. Ores and metals, 2021, № 4, pp. 85–108. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10030.

В среднем палеозое восточная часть Сибирской платформы подверглась интенсивной тектоно-магматической активизации, связанной с возникновением Вилюйской палеорифтовой структуры (Патомско-Вилюйский авлакоген) [1, 9].

Процесс рифтогенеза сопровождался формированием многочисленных разрывных нарушений, образующих краевые (Вилюйско-Мархинская и Чаро-Синская) и фронтальную (Контайско-Джербинская) зоны разломов [6, 16]. Наиболее масштабна первая из них, образовавшаяся на северо-западном крыле рифта. Её протяжённость более 700 км, ширина от 20–40 км на юге до 150 км на северо-востоке (рис. 1). Разломы интродуцированы дайками основного состава, хорошо выделяющимися в магнитном поле; их сообщество рассматривается как Вилюйско-Мархинский дайковый пояс (ВМДП). Форма зоны типа «конского хвоста» и её строение, характеризующееся многочисленными пересекающимися сбросами, сдвигами, мелкими грабенами и горстами, позволяет относить её к структуре типа пулл-апарт (pull-apart), связанной с зоной региональных субмеридиональных северо-восточных сдвигов [12, 22]. Особую значимость зоне придаёт пространственная связь с ней двух из четырёх главных алмазоносных кимберлитовых полей Якутии – Мало-Ботуобинского и Накынского, а также убогоалмазоносного Сюльдюкарского, что, по достаточно распространённым представлениям, позволяет рассматривать её как кимберлитоконтролирующую структуру [2, 6, 7, 14; В. И. Шаталов и др., 2005 г.].

После открытия Накынского поля в границах зоны был выполнен огромный объём геологоразведочных работ. Ожидаемого результата они не дали, но позволили детально исследовать её с применением обширного комплекса геофизических работ разных масштабов, бурения и опробования. При этом, по материалам Ю. А. Дукардта, В. И. Леухина, Ю. Д. Молчанова, В. М. Судакова, В. И. Шаталова, Ю. Т. Яныгина и др., в составе ВМДП М. Д. Мащакон [10] были выделены три магматических комплекса, связанных с системами

вмещающих их разломов определённых направлений, – среднемархинский, вилюйско-мархинский и дьяхтарский, вошедших затем в Легенду Анабаро-Вилюйской серии ГГК-1000 [8]. Тем не менее остаётся достаточно много дискуссионных вопросов, связанных с возрастом магматитов и их систематикой. Несмотря на то что эксплуатационным карьером в настоящее время вскрыта зона пересечения кимберлитовой трубки и дайки базитов, нет даже общепринятого представления относительно их соотношения с кимберлитами. Всё это, с учётом гипотетической роли Вилюйско-Мархинской зоны как структуры, контролирующей размещение кимберлитов, делает её изучение заслуживающим внимания.

Задачи настоящей работы – установление характера пересечения трубки Нюрбинская с дайкой базитов, выяснение возможности выделения в составе ВМДП отдельных магматических комплексов и оценка значения пояса как структуры, контролирующей размещение проявлений кимберлитового магматизма.

Работы проводились в Накынском поле, в том числе в эксплуатационном карьере Нюрбинский, в котором вскрыта зона пересечения кимберлитов и базитов, а также в долинах рек Марха и Чимидикян.

Накынское поле, в которое входит трубка Нюрбинская, относится к числу полей ярко выраженного линейного типа. Оно находится в центральной части ВМДП, но связано с системой тектонических нарушений, не совпадающей с ориентировкой разломов пояса, один из которых пересекает трубку. Пять из шести известных к настоящему времени кимберлитовых тел поля связаны с разломом Диагональный длиной ~ 12 км, одно тело – с параллельным ему разломом Параллельный. Оба разлома интродуцированы дайками кимберлитов, местами выходящими на доюрский эрозионный уровень (рис. 2).

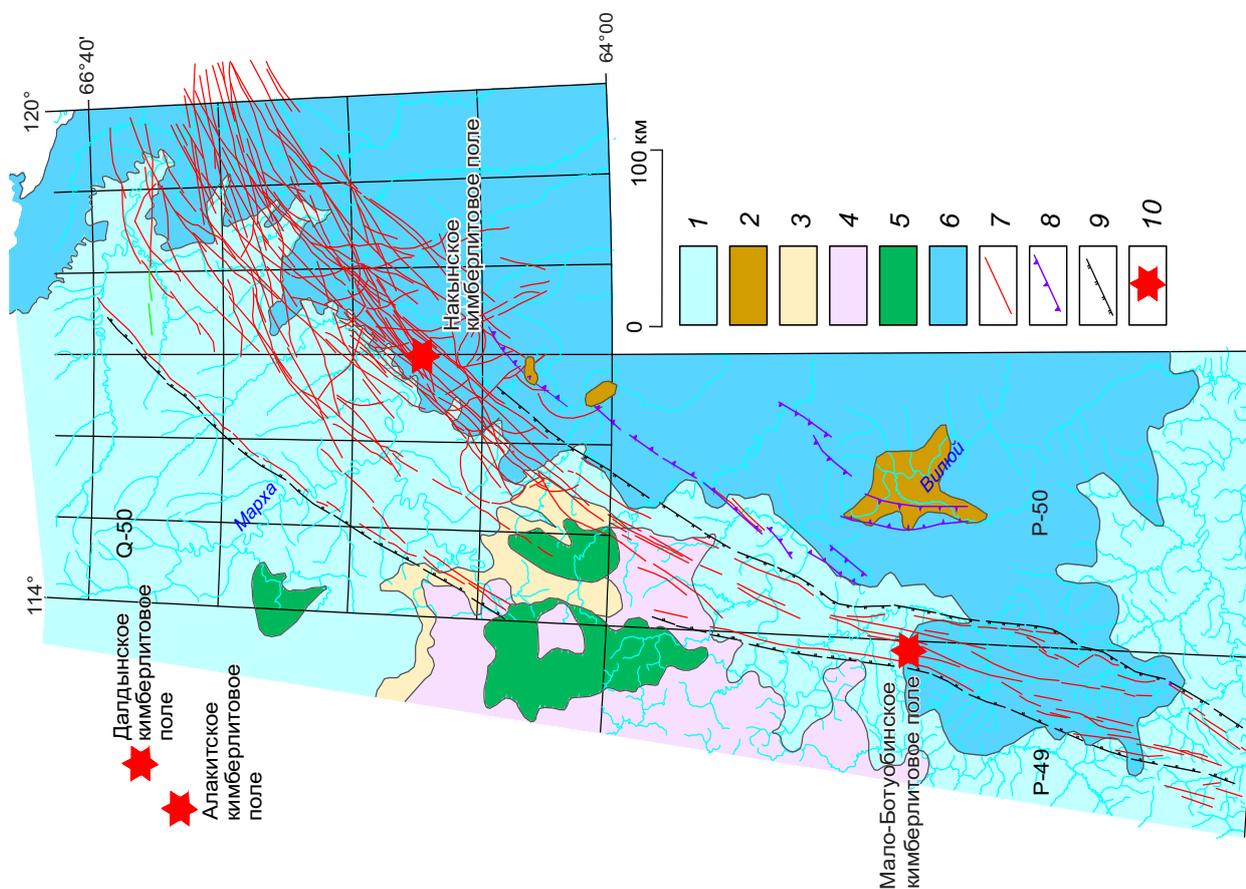
Зона пересечения кимберлитовой трубки и дайки базитов изучалась на горизонте -117 м карьера, где она вскрыта полностью. Трубка, имеющая удлинённую форму, вытянута вдоль контролирующего разлома Диагональный с простиранием на северо-северо-восток 15–25°.

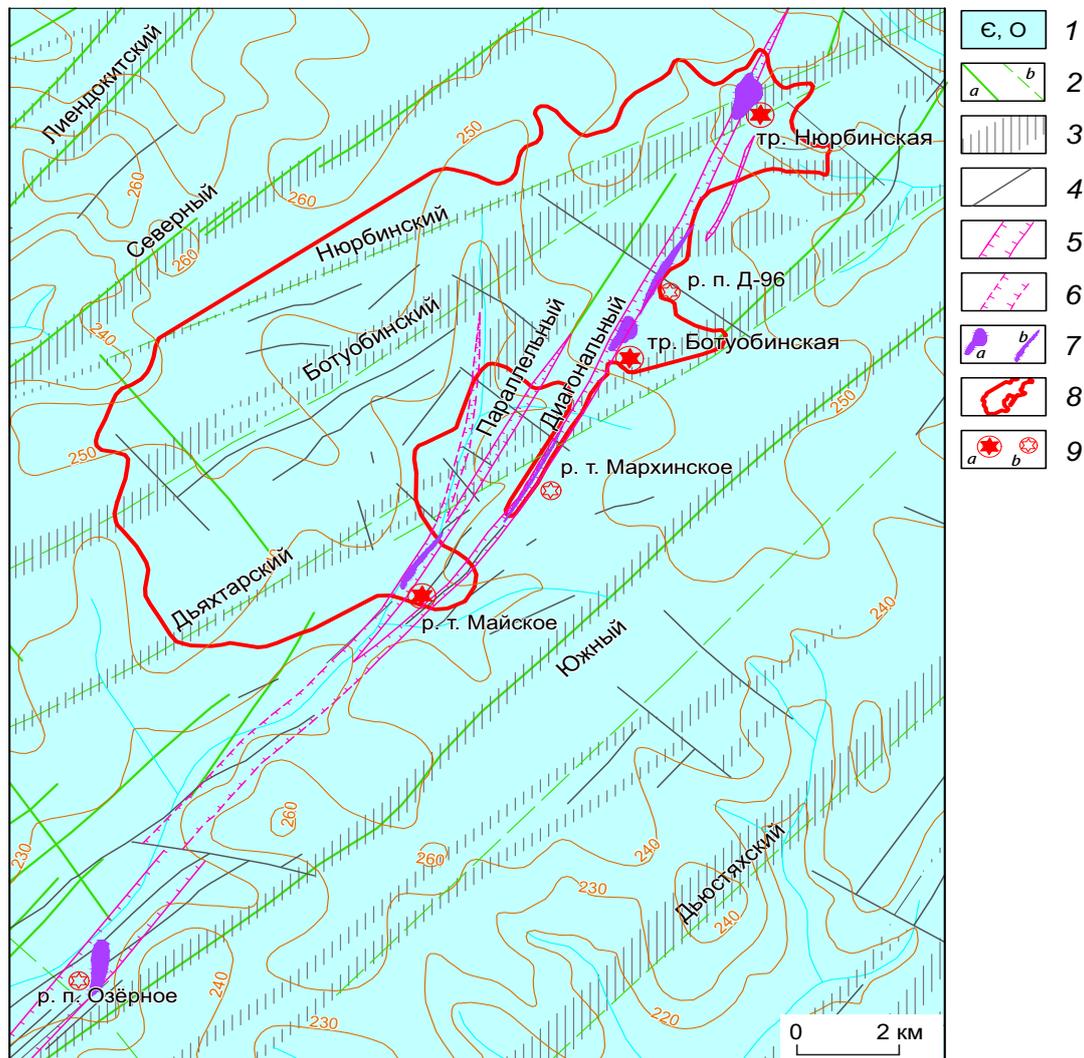
**Рис. 1. Схема геологического строения Вилуйско-Мархинского дайкового пояса (по С. В. Бондаренко, 2008 г., упрощено):**

1 – терригенно-карбонатные отложения венд-силурийского возраста; 2 – рифтогенный вулканогенно-осадочный комплекс среднего-позднего девона; 3 – каменноугольно-пермские терригенные отложения; 4 – вулканогенный комплекс раннего триаса; 5 – интрузивный комплекс раннего триаса; 6 – морские и терригенные отложения юры и мела; 7 – аномалии магнитного поля над дайками ВМДП; 8 – разломы в центральных частях Вилуйского палеорифта; 9 – границы ВМДП; 10 – кимберлитовые поля

**Fig. 1. Scheme of the Vilyui-Marxinsky dike belt (after S. V. Bondarenko, 2008, simplified):**

1 – Vendian-Silurian terrigenous-carbonate deposits; 2 – Middle-Late Devonian riftogenic volcanogenic-sedimentary sequence; 3 – Carboniferous-Permian terrigenous deposits; 4 – Early Triassic volcanogenic sequence; 5 – Early Triassic intrusive sequence; 6 – Jurassic and Cretaceous marine and terrigenous deposits; 7 – magnetic anomalies above VMDB dikes; 8 – faults in the Vilyui paleorift central parts; 9 – VMDB boundaries; 10 – kimberlite fields





**Рис. 2. Схематическая геологическая карта Накынского поля (со снятым чехлом юрских отложений) (по Э. А. Масленниковой, 2013 г.):**

1 – карбонатные и терригенные морские отложения кембрия и ордовика (Є, О); 2 – дайки ВМДП (долериты, габбродолериты): уверенно выделяемые в магнитном поле (а), с низкой намагниченностью, прерывистые (b); 3 – зоны разрывных нарушений, полностью или фрагментарно интродуцированные дайками долеритов; 4 – тектонические нарушения второстепенные; кимберлитоконтролирующие нарушения: 5 – установленные (Диагональный и Параллельный разломы), 6 – предполагаемые; 7 – кимберлитовые тела: трубки взрыва (а), дайки (b); 8 – контур погребённой Нюрбинской россыпи; 9 – месторождения алмазов с промышленными запасами (а), недостаточно изученные (b)

**Fig. 2. Sketch geological map of the Nakyn field (with Jurassic sedimentary cover removed) (after E. A. Maslennikova, 2013):**

1 – Cambrian and Ordovician carbonate and terrigenous marine deposits (Є, О); 2 – VMDB dikes (dolerite, gabbro-dolerite): distinctly identifiable in a magnetic field (a), low-magnetic, discontinuous (b); 3 – fault zones completely or partially intruded by dolerite dikes; 4 – minor tectonic faults; kimberlite-controlling faults: 5 – identified (Diagonal and Parallel faults), 6 – inferred; 7 – kimberlite bodies: volcanic pipes (a), dikes (b); 8 – contour of the buried Nyurbinskaya placer; 9 – diamond deposits: economic (a), underexplored (b)

Она разделена на Северный и Южный блоки (являющиеся, видимо, отдельными «лопастями» диатремы) дайкой базитов, интрузирующей разлом Ботуобинский.

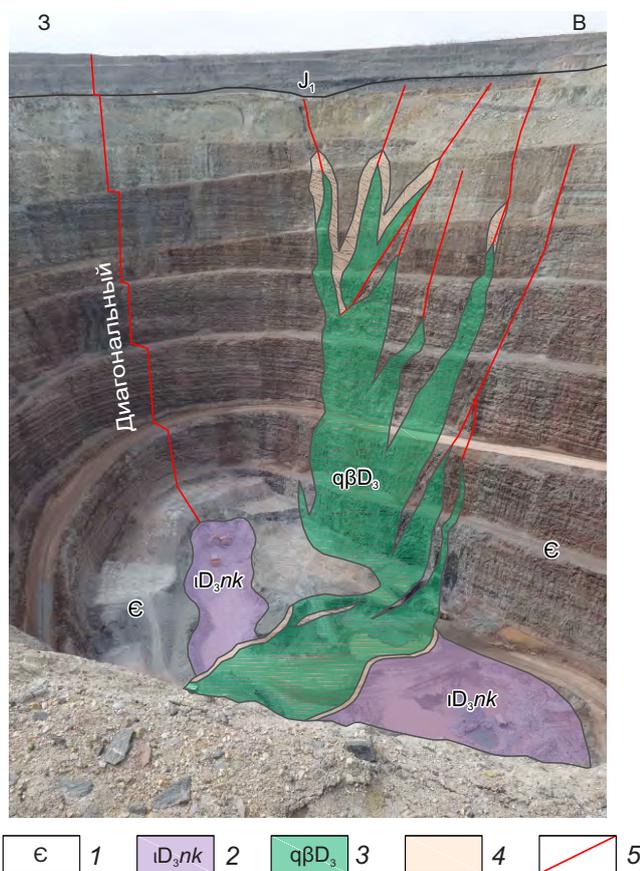
Диагональный разлом имеет весьма простое строение, почти всегда присущее нарушениям, вмещающим кимберлиты: он вертикальный, выполнен дайкой порфиривого кимберлита (мощность 0,5–2 м) с ровными контактами, практически лишёнными следов воздействия кимберлитовой магмы на вмещающие породы кембрия.

Разлом Ботуобинский имеет общее северо-восточное (~ 55–65°) простирание; он значительно мощнее и характеризуется сложным строением, представляя собой зону тектонического меланжа обрушения мощностью 50–70 м, выполненную множеством хаотически расположенных обломков и крупных (10–30 м) бло-

ков вмещающих пород. Естественно, что и интрузирующая его дайка имеет весьма сложную морфологию, далёкую от предполагавшейся по результатам разведочного бурения. На глубинах более 400 м от дневной поверхности она представляет собой единое тело переменной (от 30 до 150 м) мощности. Выше этой отметки приобретает весьма сложную форму, «расщепляясь» на 4–6 субвертикально ориентированных тел мощностью 3–45 м и длиной до 150 м, которые образуют систему слегка извилистых узких апофиз (рис. 3); одна из них отходит от дайки под углом ~ 70°. Ни одна из апофиз не достигает доюрской палеоповерхности, не доходя до неё около 150 м.

Начальные признаки «расщепления» дайки в теле трубки хорошо видны в дне карьера, где в долеритах отчётливо выделяются несколько узких (0,5–5 м) полос северо-восточного простирания длиной до 25 м, сложенных зеленовато-серыми экзоконтактовыми брекчиями (см. рис. 3). Вмещающие породы на контактах с более мощными апофизами осветлены, приобретают зеленовато-серый цвет вследствие интенсивной хлоритизации и серпентинизации; мощность зоны изменения 0,1–3 м. Воздействие маломощных апофиз на вмещающие породы выражено значительно слабее.

Что касается непосредственного контакта долеритов с кимберлитами, то его, по-видимому, не существует: во всех случаях, наблюдавшихся как нами, так и другими исследовате-



**Рис. 3. Дайка долеритов, прорывающая кимберлитовую трубку Нюрбинская. Карьер Нюрбинский, гор. -117 м:**

1 – вмещающие породы кембрия (€); 2 – кимберлиты ( $iD_{2-3}nk$ ); 3 – долериты, микродолериты, габбро-долериты ( $q\beta D_3$ ); 4 – контактовые карбонат-базитовые брекчии; 5 – разрывные нарушения

**Fig. 3. Dolerite dike cutting Nyurbinskaya kimberlite pipe. Nyurbinsky pit, -117 m horizon:**

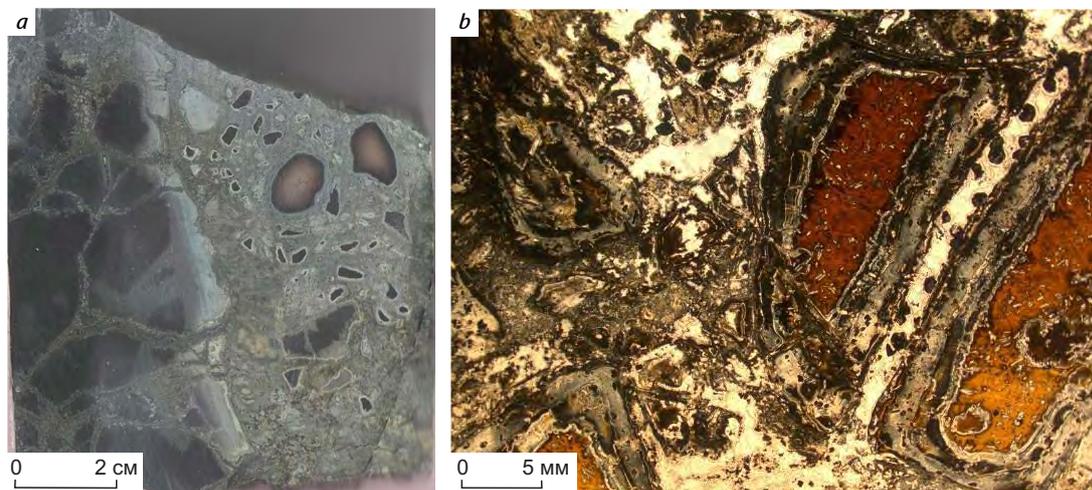
1 – Cambrian host rocks (€); 2 – kimberlites ( $iD_{2-3}nk$ ); 3 – dolerite, microdolerite, gabbro-dolerite ( $q\beta D_3$ ); 4 – contact carbonate-basite breccias; 5 – faults

лями на более высоких уровнях; (М. Д. Томшин, 2004 г.), он сопровождается зоной разделяющих их брекчий. Эти породы, выявленные ещё на первых этапах разведки трубки Нюрбинская, были вскрыты многочисленными скважинами; за ними закрепилось название «карбонат-базитовые взрывчатые брекчии» (М. Д. Томшин, 2004 г.). Эти своеобразные породы встречаются на контактах базитов как с кимберлитами, так и с вмещающими породами; генезис их до настоящего времени дискуссионен, поскольку они в значительной мере являются ключом для понимания соотношений кимберлитов и базитов.

Брекчии на контактах базитов с карбонатными вмещающими породами кембрия тяготеют к апикальным частям апофиз дайки, где они выполняют линейные и трубообразные тела мощностью до 10–15 м и протяжённостью десятки метров. Их состав меняется в зависимости от близости к дайке или к вмещающим породам от существенно базитового до карбо-

натного (М. Д. Томшин, 2004 г.). Граница брекчий с базитами обычно чёткая, резкая (рис. 4, *a*), с вмещающими породами – постепенная, через зону трещиноватости; иногда брекчии образуют в них апофизы.

Вблизи контакта с дайкой брекчии сложены обломками долеритов с гиалопилитовой, интерсертальной структурами, аналогичными породам краевой фации интрузий (см. рис. 4, *b*), с единичными мелкими обломками вмещающих пород; содержание обломков в них до 90 % объёма породы. Форма обломков обычно округло-угловатая, размеры от долей миллиметра до первых метров. По направлению от дайки размеры обломков базитов уменьшаются; в том же направлении возрастает доля обломков вмещающих пород и, соответственно, в цементирующей основной массе сокращается количество магматической составляющей. Ввиду интенсивного метасоматоза карбонатные обломки сильно корродированны. Обломки магматических пород имеют реакционные каймы

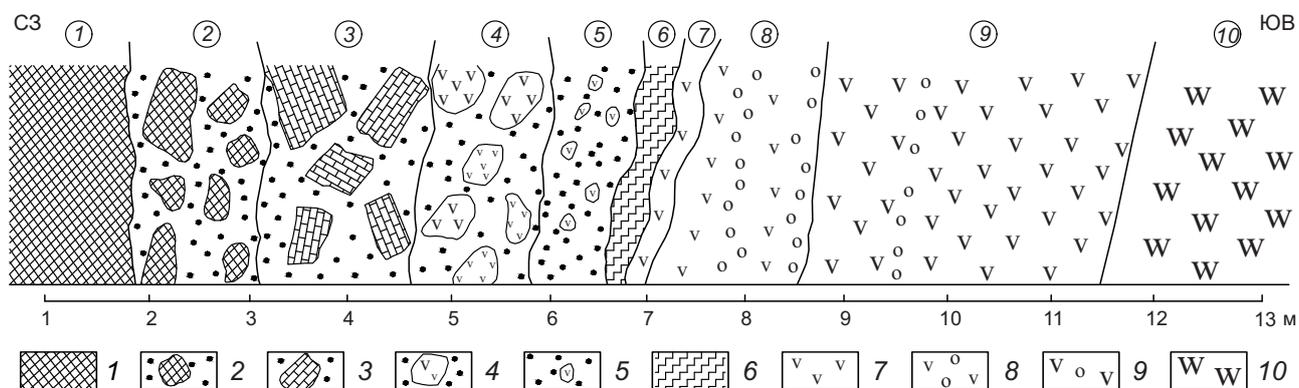


**Рис. 4. Контакт взрывчатой карбонат-базитовой брекчии и долерита:**

*a* – контакт афанита (слева) с брекчией (справа). Скв. 508, глубина 278 м. Фото; *b* – карбонат-базитовая брекчия. Обломки базитов бурого цвета с реакционной оторочкой в кальцит-хлоритовом цементе. Шлиф, без анализатора (по С. А. Захарову, 2016 г.)

**Fig. 4. Contact of explosive carbonate-basite breccias and dolerite:**

*a* – contact of aphanites (left) and breccias (right). Drillhole 508, 278 m depth. Photo; *b* – carbonate-basite breccias. Fragments of brown basite with a reaction margin in calcite-chlorite cement. Polished section, no analyzer (after S. A. Zakharov, 2016)



**Рис. 5. Строение зоны контакта кимберлитов, дайки базитов и карбонат-базитовых эксплозивных брекчий (забой карьера Нюрбинский, гор. -117 м, точка наблюдения 1):**

1 – автолитовые кимберлитовые брекчий; 2 – «вторичные» карбонат-кимберлитовые брекчий; 3 – брекчий с глыбами пород рамы и кимберлитов; 4 – брекчий с округлыми глыбами долеритов и осадочных пород; 5 – брекчий с мелкими изменёнными обломками долеритов; 6 – сливная фарфоровидная карбонат-хлорит-серпентиновая порода; 7 – долериты с витрофировой структурой; 8 – микродолериты тонко- и мелкозернистые, миндалекаменные; 9 – долериты среднезернистые, иногда миндалекаменные; 10 – габбродолериты средне- и крупнозернистые

**Fig. 5. Structure of kimberlite, basite dike and carbonate-basite explosive breccias contact zone (Nyurbinsky pit face, -117 m horizon, observation point 1):**

1 – autolith kimberlite breccias; 2 – “secondary” carbonate-kimberlite breccias; 3 – breccias with enclosing rock and kimberlite blocks; 4 – breccias with rounded dolerite and sedimentary rock blocks; 5 – breccias with minor altered dolerite fragments; 6 – porcelaneous carbonate-chlorite-serpentine rock; 7 – vitrophyric dolerite; 8 – fine-grained amygdaloid microdiorite; 9 – medium-grained, occasionally amygdaloid dolerite; 10 – medium-grained and coarse-grained gabbro-dolerite

толщиной 20–30 мм, обогащённые серпентином и хлоритом (см. рис. 4, а), в них снижаются содержания  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ , общего железа,  $\text{TiO}_2$  и резко (в два раза) повышаются –  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  и летучих компонентов.

Цемент брекчий мелкозернистой серпентин-хлорит-карбонатного состава с примесью талька и кварца, иногда гипса; в тяжёлой фракции протолочных проб встречаются пирит, магнетит, андрадит, ильменит (С. А. Захаров и др., 2016; М. Д. Томшин и др., 2004 г.). Отмечаются жилы и гнёзда, в которых развивается флогопит. В целом в цементирующей массе очень высокие содержания  $\text{Mg}$ ,  $\text{Ca}$  и летучих компонентов и низкие –  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ , иногда железа [15].

Брекчий в зоне контакта базитов с кимберлитами отличаются от описанных выше; они детально изучены нами на боковых контактах

дайки с южным телом трубки на горизонте -117 м. Им свойственна определённая зональность (рис. 5).

Граница брекчий с базитами очень резкая, чёткая, с мелкими выступами каждой из этих пород в другую, создающими впечатление взаимного прорывания (рис. 6, а). Однако их соотношения однозначно определяются тем, что базиты образуют в брекчиях апофизы мощностью 1–30 см (см. рис. 6, б) и протяжённостью первые метры.

Непосредственно на контактах с базитами брекчий представляют собой плотную, сливную фарфоровидную породу светло-серого цвета, содержащую 10–30 % как бы «растаченных» включений тёмно-серого цвета размером 2–50 мм, сложенных базитовым материалом (см. рис. 6, с). Они изменены, имеют

витрофирующую, гиалопилитовую структуры, границы их с основной массой расплывчатые. В более крупных обломках базиты приобретают характерную «петельчатую» текстуру, в них изредка сохраняются реликты порфировых выделений плагиоклаза.

Цементирующая масса сложена серпентином с мелкими скоплениями тонкозернистого карбоната. Вблизи контакта с долеритами в брекчиях нередко развиваются скопления мелких скелетных кристаллов андрадита, образующих характерные радиально-лучистые «снежинки»; их возникновение объясняется термальным воздействием долеритов. Мощность этой зоны 0,2–0,7 м.

Далее по направлению от контакта в брекчиях появляются округлые обломки долеритов размером до 0,3 м, обычно тонко- и мелкозернистых, идентичных слагающим дайку (см. рис. 5, 5). Все они окаймлены реакционными каймами толщиной 5–20 мм серого цвета, в которых долериты интенсивно серпентинизированы и карбонатизированы.

По мере удаления от контакта на 2–3 м в брекчиях наряду с долеритами появляются сначала мелкие обломки, а затем всё более крупные (до 1,5 м) округлые блоки вмещающих пород с коричнево-жёлтой реакционной каймой (см. рис. 5, 4). Они сложены породами, формирующими осадочный чехол: известняками, мергелями, песчаниками, алевролитами, иногда со следами волноприбойной ряби, обломками слоёв гипса мощностью до 30 см.

В 4–5 м от контакта начинают встречаться единичные обломки кимберлитов. Далее их размер и содержание в породе растут, а доля ксенолитов вмещающих пород снижается. Около контакта с вмещающими кимберлитами порода приобретает облик «вторичной» кимберлитовой брекчии с незначительной примесью ксеногенного материала (см. рис. 5, 2, 3).

Состав цементирующей массы брекчий изменяется в том же направлении – от преобладания тонкодисперсного базитового материала через зону смешанного базит-кимберлит-карбонатного к существенно кимберлитовому.

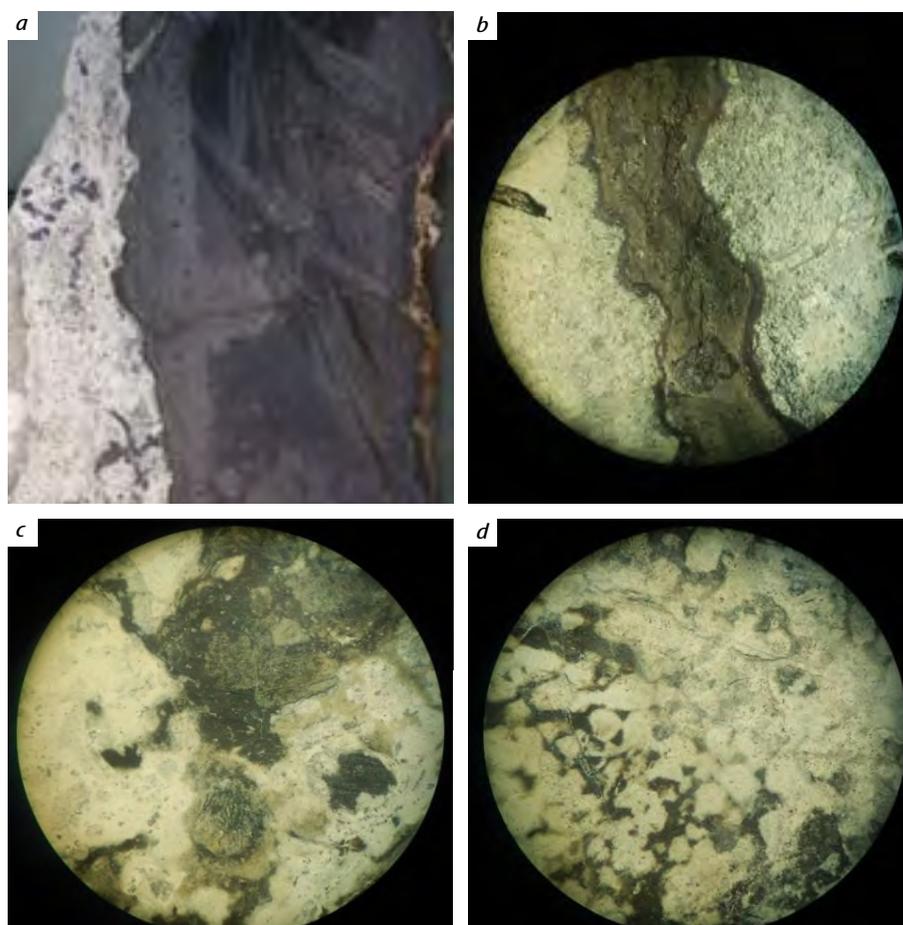
Зона эндоконтакта дайки всюду имеет отчётливое зональное строение, выражающееся

в постепенной смене крупнокристаллических габбродолеритов центральных частей (рис. 7, d) всё более мелкозернистыми, часто миндалекаменными долеритами – вплоть до афанитов непосредственно на контакте (см. рис. 7, a, b); это является несомненным свидетельством более позднего по отношению к брекчиям формирования долеритов. Границы между указанными разностями пород нечёткие, постепенные, общая мощность контактовой зоны дайки до 5–7 м.

Аналогичное строение зона контакта трубки и дайки имеет на всём её протяжении – как на контакте с южным, так и с северным телом (лопастью) кимберлитовой трубки.

Рентгеноструктурный анализ брекчии, выполненный Л. В. Лисковой (НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО)), показал, что она сложена агрегатом серпентина и кальцита, содержащим рентгеноаморфные смектиты, незначительные количества полевых шпатов, ильменит (табл. 1). Серпентин представлен Al-лизардитом и клинохризотилом, свидетельствующими о высокотемпературном воздействии долеритов на брекчии и сильном изменении последних. В долеритах вблизи контакта, помимо плагиоклаза и пироксена, присутствуют сапонит, монтмориллонит и Fe-хлорит, что является показателем (авто)метасоматического воздействия брекчий на них.

Анализ химического состава образцов, отобранных нами в карьере Нюрбинский в зоне контакта из кимберлитов, умеренно-щелочных долеритов и разделяющих их брекчий, показал, что среди последних в зависимости от положения проб в контактовой зоне выделяются разности, по уровню обогащения главными и редкими элементами тяготеющие или к щелочным долеритам, или к кимберлитам (рис. 8, табл. 2). Это – чёткое свидетельство гибридного характера брекчий, в составе которых участвует как кимберлитовый, так и долеритовый материал. При этом очевидно, что сами брекчии оказывали автометасоматическое воздействие на долериты, о чём свидетельствуют закономерное повышение содержания  $K_2O$  от 0,94–2,24 в центре дайки до 3,4–4,6 % на контакте с брекчиями, снижение в



**Рис. 6. Карбонат-базитовая брекчия и её контакты с базитами:**

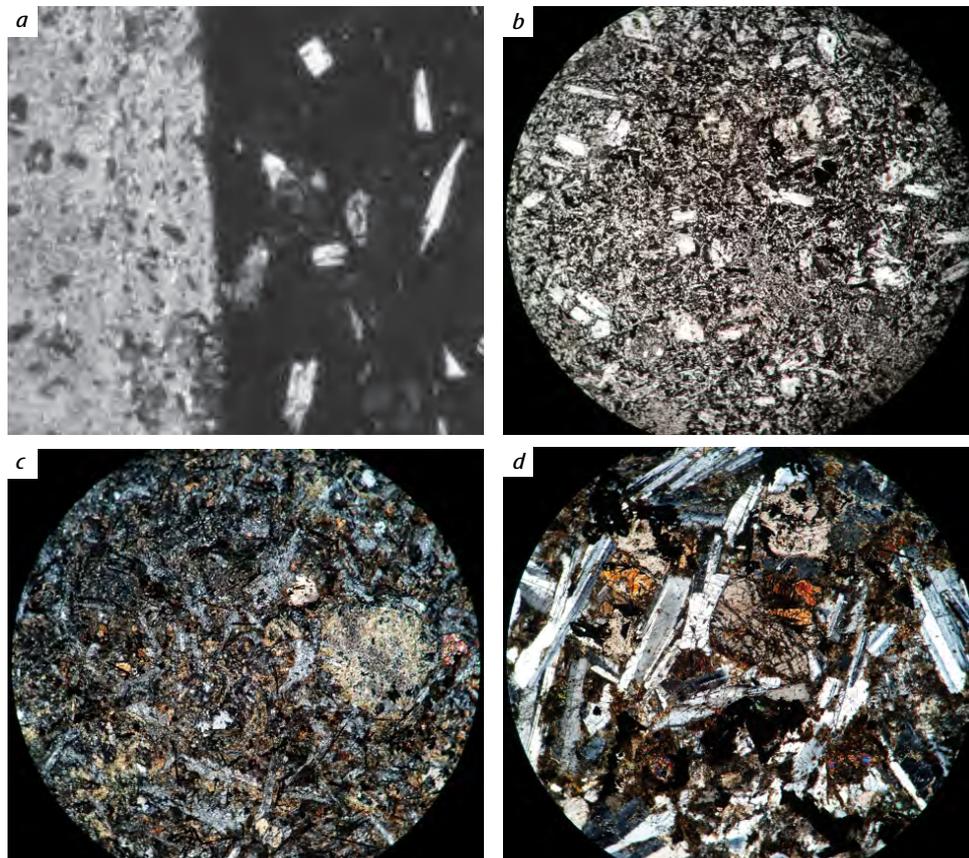
*a* – контакт долерита (справа) и брекчии. В долерите – реакционная кайма серого цвета, чёрные обособления в брекчии – фрагменты изменённого долерита. Обр.1/1, м-б 1 : 1, фото; *b* – жилка витрофирового долерита в брекчии. Обр. 1/1а, м-б 1 : 1, фото; *c, d* – хлорит-карбонат-серпентиновая масса брекчии (белый фон) с мелкими дислоцированными фрагментами долерита вблизи контакта с дайкой. Шлиф 1/11, м-б 1 : 10, без анализатора

**Fig. 6. Carbonate-basite breccias and its contacts with basite:**

*a* – dolerite (right) and breccia contact. Dolerite contains gray reaction margin, black segregations in breccia are altered dolerite fragments. Sample 1/1a. 1 : 1 scale, photo; *b* – vitrophyric dolerite veinlet in breccia. Sample 1/1. 1 : 1 scale, photo; *c, d* – chlorite-carbonate-serpentine breccia mass (white background) with minor dislocated dolerite fragments near dike contact. Polished section 1/11, 1 : 10 scale, no analyzer

том же направлении MgO от 8,9 до 7–6 %, рост P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> от 0,59 до 0,78 %. Брекчии оказывают также существенное воздействие на кимберлиты: в них вблизи контакта понижены содержания K<sub>2</sub>O, Rb, Ba, повышены – P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Та же закономерность характерна и для брекчий с преобла-

данием кимберлитового материала. Брекчии, обогащённые ксенолитами долеритов, приближаются к ним по содержаниям редких элементов; в них снижаются также содержания K<sub>2</sub>O, Ba, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и Sr. Всё это, по-видимому, связано с более высокой степенью проницаемос-



**Рис. 7. Зональность эндоконтакта дайки долеритов на контакте с брекчией:**

*a* – контакт долерита с гиалопилитовой структурой с брекчией. Шлиф 11/6, 1 : 20, без анализатора; *b* – микродолерит с плагиофировой интерсертальной структурой в 0,5 м от контакта. Шлиф 1/4, 1 : 20, без анализатора; *c* – миндалекаменный мелкозернистый долерит в 1,5 м от контакта. Шлиф 1/5, 1 : 10, с анализатором; *d* – крупнозернистый оливинсодержащий габбродолерит в 4 м от контакта. Шлиф 1/8, 1 : 10, с анализатором

**Fig. 7. Dolerite dike endocontact zonation at breccia contact:**

*a* – contact of hyalopilitic dolerite and breccia. Polished section 11/6, 1 : 20 scale, no analyzer; *b* – plagiophyric intersertal dolerite in 0,5 m from contact. Polished section 1/4, 1 : 20 scale, no analyzer; *c* – amygdaloid fine-grained dolerite in 1,5 m from contact. Polished section 1/5, 1 : 10 scale, analyzer; *d* – coarse-grained olivine-rich gabbro-dolerite in 4 m from contact. Polished section 1/8, 1 : 10 scale, analyzer

ти кимберлитовых пород, метасоматизирующим и термальным воздействием на них эксплозивных брекчий, содержащих агрессивные газово-жидкие продукты дегазации умеренно-щелочных долеритов, прорывающих кимберлитовую трубку.

Последовательность формирования пород в изученном разрезе представляется следую-

щей: кимберлиты – брекчии – долериты, причём образование двух последних компонентов было практически одновременным. Убеждает в этом также сам факт присутствия на контакте достаточно мощной зоны брекчий – пород, обладающих всеми признаками контактовых образований, совершенно не свойственных кимберлитам (характеризующимся всегда ми-

**Табл. 1. Минеральный состав карбонат-базитовых брекчий на контакте с долеритами**

Table 1. Mineral composition of carbonate-basite breccias at contact with dolerite

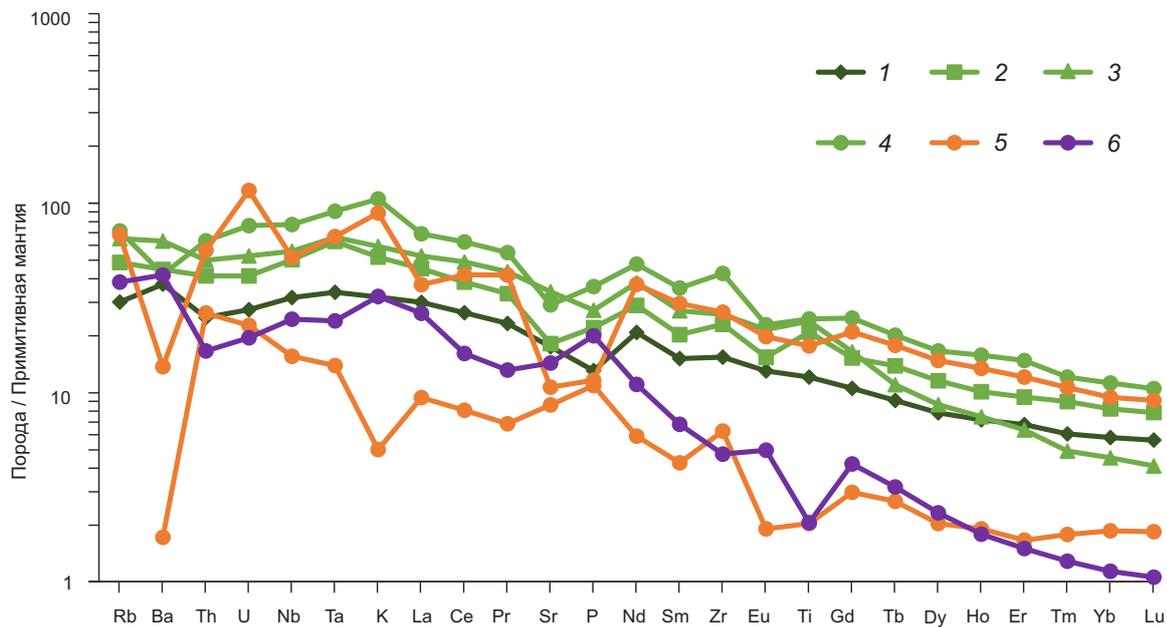
Номера образцов	Тип пород	Содержание минералов, %										
		Al-лизардит	Клинохризотил	Хлорит	Смектит (рентгено-аморфный)	Тальк	Полевые шпаты	Кальцит	Апатит, хантит, галит, сидерит	Гётит	Магнетит	Ильменит
1/11	Основная карбонатная масса	46	23	–	16	–	–	9	6	–	–	–
1/11	Брекчия с обломками долерита	45	10	9	12	–	11	5	5	2	–	1
1/1	Основная карбонатная масса	57	19	+	11	–	Сл.	9	4	–	–	–
1/1	Брекчия с обломками долерита	48	16	7	13	–	Сл.	9	4	–	–	3
11/3	Брекчия базит-карбонатная	57	13	1	9	2	–	10	2	–	5	1

Примечание. Сл. – следы; «–» отсутствует; «+» – присутствует.

нимальным воздействием на вмещающие породы – как термальным, так и метасоматическим), но обычных в экзоконтактовых зонах тел базитов.

Обсуждая вопрос о генезисе рассматриваемых брекчий, следует заметить, что они часто понимаются как производные самостоятельного, наиболее позднего этапа эволюции магмы основного состава, связанные с глубинными магматическими очагами и прорывающие весь комплекс магматитов – как базитов, так и кимберлитов. При этом они выделяются в автономный гидротермально-метасоматический комплекс и отделяются от времени становления базитов весьма существенным (~ 20 млн лет) интервалом времени [17]. Основание для такого суждения – результаты определения их изотопного возраста, а также приписываемые им признаки интенсивного воздействия на базиты. Изредка отмечаемое в них присутствие минералов-индикаторов кимберлитов дало основание подозревать даже их некое генетическое сродство с кимберлитовой магмой (М. Д. Томшин и др., 2004 г.).

Однако изложенное выше убеждает в том, что формирование этих брекчий следует связывать с дегазацией базитовой магмы, произошедшей при достижении магматической колонной в ходе подъёма к дневной поверхности критической глубины, на которой давление летучих в расплаве становится выше литостатического. Дегазация расплава носила, видимо, взрывной характер и сопровождалась дроблением пород рамы, в том числе и консолидированных ранее на большей глубине частей дайки. Вследствие большей подвижности флюидизированные продукты дегазации опережали продвижение магматической колонны в зоне разлома, формируя брекчии, которые почти сразу были интродуцированы фронтальными частями дайки. В это же время шла консолидация периферических частей дайки; в приповерхностных условиях, при невысоких давлениях и температуре этот процесс шёл достаточно быстро с образованием в краевых частях даек почти нераскристаллизованных витрофировых пород, в то время как в центральных частях тел, обогащённых



**Рис. 8. Распределение редких элементов (ppm), нормированное к составу примитивной мантии, в долеритах, кимберлитах и карбонат-базитовых брекчиях Накынского района:**

1 – долериты нормального ряда вилуйско-мархинского комплекса и базальты аппайнской свиты; умеренно-щелочные долериты; 2 – среднемархинского комплекса (карьер Лиендокит), 3 – Вилуйско-Мархинского дайкового пояса, 4 – дьяхтарского комплекса; 5 – контактовые карбонат-базитовые брекчии; 6 – кимберлиты трубки Нюрбинская

**Fig. 8. Distribution of rare elements (ppm) normalized to primitive mantle composition in dolerite, kimberlite and carbonate-basite breccias of the Nakyn area:**

1 – normal series dolerite (Vilyui-Markhinsky sequence) and Appainskaya suite basalt; moderately alkaline dolerite; 2 – Sredne-Markhinsky sequence (Liendokit quarry), 3 – Vilyui-Markhinsky dike belt, 4 – Dyakhtarsky sequence; 5 – contact carbonate-basite breccias; 6 – Nyurbinskaya pipe kimberlites

летучими, сохранялись участки расплава с более высокими температурами и формировались более крупнозернистые разности, вплоть до габброидов.

В генетическом отношении брекчии как первого, так и второго типов связаны с заключительным этапом образования тел базитов и представляют собой единый с ними комплекс, различаясь только особенностями, обусловленными различным составом субстрата. Они свойственны базитам с повышенной щёлочностью – независимо от их принадлежности к тому или иному комплексу, выделявшемуся в работе [10]. Но лучше они изучены в связи с дайками дьяхтарского комплекса как в труб-

ке Нюрбинская, так и в зонах Ботуобинского и Дьяхтарского разломов вне трубки (С. А. Захаров и др., 2016 г.). Их следует рассматривать как образования последнего этапа становления умеренно-щелочных интрузий, сопутствующие им и практически синхронные по времени формирования.

Несомненно также и то, что базиты имеют с брекчиями активные контакты, образуя в них апофизы, а также зоны термального воздействия. Вместе с тем базиты также подвергались воздействию со стороны созданной ими агрессивной среды, какой являются флюидные компоненты дегазации основной магмы; с этих позиций это воздействие

**Табл. 2. Содержания показательных оксидов в базитах Вилуйско-Мархинского дайкового пояса, кимберлитах трубки Нюрбинская и карбонат-базитовых взрывчатых брикциях (мас. %)**

Table 2. Distinct oxide content in VMDB basite, Nyurbinskaya pipe kimberlites and carbonate-basite explosive breccias (weight %)

№ п/п	Номера проб	Комплекс	Ориентировка	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	FeO <sub>общ.</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>Долериты ВМДП в долине р. Марха и в районе Накынского поля (карьер Лиендокит)</b>										
1	1017/1	D <sub>3sm</sub>	20°	48,5	2,71	15,5	9,91	2,18	1,13	0,26
2	11/2		Силл	49,4	2,29	13,9	10,2	2,16	1	0,24
3	1001/1		280°	38,4	4,93	23,5	2,8	1,23	2,15	0,52
4	2/1		275°	47,3	4,9	13,3	9,61	2,63	1,57	0,58
5	1001/2		280°	46,9	4,69	14	9,11	2,36	1,59	0,57
6	4/5		355° (Лиенд)	48,4	3,8	15,2	8,01	2,01	1,47	0,42
7	4/6		355° (Лиенд)	47,9	4,6	18,4	8,24	1,84	1,54	0,49
8	1036	D <sub>3vm</sub>	40°	49	2,33	14,8	10,6	2,14	1,06	0,25
9	1022/1		45°	48,2	2,56	15,2	9,52	2,18	1,13	0,26
10	8/3		45°	49,3	2,26	12,4	10,3	2,34	0,97	0,24
11	1014/2		Силл	47,8	2,07	13,7	10,3	2,01	1	0,22
12	23/1	D <sub>3dh</sub>	65°	49,3	2,38	14,8	10,2	2,1	1,01	0,26
13	21/2		85°	48,8	2,34	14,7	8,44	2,37	1,89	0,26
14	2/2		95°	46,8	4,66	13,3	9,45	2,39	1,54	0,58
<b>Долериты ВМДП в долине р. Тюнг</b>										
15	3022/3	D <sub>3sm</sub>	120°	47,7	2,55	13,1	11,2	2,18	0,74	0,24
16	3022/2		120°	47,8	2,34	13,5	10,4	2,27	0,87	0,26
17	11/2a	D <sub>3vm</sub>	Силл	45,4	2,27	15,4	11,1	2,28	1,05	0,23
18	3011/2		Силл	49,4	2,67	14,1	10,4	2,89	0,60	0,30
19	4005/1		75°	45,9	2,78	16,0	10,4	2,28	0,79	0,28
20	4002/1	D <sub>3dh</sub>	85°	46,6	4,11	16,0	6,5	2,56	1,12	0,45
21	4002/2		85°	44,5	4,17	17,0	7,66	2,83	2,43	0,41
22	4003/5		100°	45,7	3,32	17,4	9,79	2,32	0,98	0,32
23	4003/6		85°	44,1	4,29	17,0	9,13	2,65	1,55	0,38
24	3014/8		Обломок	42,1	4,52	22,1	3,75	2,1	1,2	0,49
<b>Долериты дайки, прорывающей трубку Нюрбинская (дьяхтарский комплекс)</b>										
25	1/1	D <sub>3dh</sub> (Контакт)	55–60°	47	5,07	15,6	5,65	1,68	3,36	0,78
26	1/2	D <sub>3dh</sub> (1 м)	55–60°	46,6	5,02	14,6	3,99	1,41	4,6	0,8
27	1/3	D <sub>3dh</sub> (2 м)	55–60°	46	4,9	15	8,28	1,7	1,86	0,75
28	1/4	D <sub>3dh</sub> (3 м)	55–60°	46,6	5,2	17,6	5,49	1,53	3,6	0,78
29	1/5	D <sub>3dh</sub> (5 м)	55–60°	47,1	5,18	17,2	5,66	1,9	2,3	0,78
30	1/6	D <sub>3dh</sub> (7 м)	55–60°	45,5	5,07	16,1	7,89	1,67	2,33	0,64
31	1/7	D <sub>3dh</sub> (10 м)	55–60°	46,2	4,38	16,1	5,59	1,49	0,94	0,59

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
32	1/8	Обломок	55–60°	46,6	5,06	14,9	6,02	1,77	2,87	0,76
33	12	D <sub>3</sub> dh (Центр дайки)	55–60°	48,2	3,67	13,9	9,05	2,13	1,76	0,72
34	12/2	D <sub>3</sub> dh (Обломок)	55–60°	45,5	5,39	14,3	5,8	1,81	2,33	0,74
35	5/4	D <sub>3</sub> dh (Центр дайки)	55–60°	45,9	4,67	10,3	8,17	0,41	5,42	0,72
36	5/5	D <sub>3</sub> dh (Центр дайки)	55–60°	50,2	3,19	17,3	6,56	2,1	2,25	1,46
<b>Карбонат-базитовые эксплозивные брекчии</b>										
37	1/11			35,1	0,31	8,39	5,17	<.1	0,13	0,16
38	5/1			39,5	4,25	5,36	14,2	0,13	1,63	<.05
39	1/11a			33,1	0,51	3,87	6,7	0,44	0,16	0,29
40	12/1			35,7	2,85	8,43	9,73	0,41	3,5	0,48
<b>Кимберлиты трубки Нюрбинская (накынский комплекс)</b>										
41	1/13	D <sub>3</sub> nk		32	0,59	7,25	13,3	<.1	0,78	0,58
42	5			35,5	0,5	8,85	6,16	<.1	0,15	0,46
43	5/0			30,9	0,38	5,97	14	<.1	0,21	0,43
44	5/2			10,6	0,9	8,47	31,1	<.1	1,11	1,5
45	8/1			33,7	0,4	7,75	7,86	<.1	0,93	0,45

Примечание. В таблице приведены только содержания оксидов, типоморфных для выделенных комплексов. Анализы проводились в ЦАЛ ВСЕГЕИ (аналитик В. Н. Кириллов).

можно рассматривать как автометасоматическое.

Следует также признать несостоятельность предположений о некоем генетическом родстве этих брекчий с кимберлитовой магмой, основанных на находках в них минералов-индикаторов кимберлитов (М. Д. Томшин и др., 2004 г.). Они встречались в брекчиях, но только в непосредственной близости от кимберлитовых тел, будучи, по-видимому, захвачены базитами на более глубоких уровнях, где они могли пересекать кимберлитовые тела.

Подобного рода образования, в районе Накынского поля имеющие локальное распространение, отнюдь не уникальны; они развиты достаточно широко в вулканических областях Тунгусской синеклизы. Так, в бассейнах правых притоков р. Нижняя Тунгуска – Туру, Кочучумо, Ямбукан, Чискова – во время проведения ГС и ГГС м-ба 1 : 200 000 была изу-

чена, в том числе нами, огромная система так называемых ЗКИ – зон каналов извержений, представляющая собой полосу субширотного простирания протяжённостью более 600 км и шириной до 30 км (В. Г. Черенков и др., 1976 г.). С ней связаны многочисленные вулканические структуры трещинного типа, в результате деятельности которых сформировалась верхняя, эффузивная, часть вулканогенной толщи синеклизы. Подводящие каналы этих структур сложены гиперстеновыми долеритами, относящимися к наиболее позднему интрузивному комплексу. С ними ассоциируют мощные (до сотен метров) зоны метасоматически изменённых эффузивов и пирокластитов, наиболее интенсивно проявленные в верхних частях вулканических построек в интервале глубин 200–300 м. Они относятся к тому же типу образований, что и эксплозивные брекчии Накынского поля, имея, естественно, иной мине-

ральный состав, что связано с различным составом пород рамы. Обломочная часть сложена витрофировыми миндалекаменными базальтами, обычно почти полностью изменёнными, хлоритизированными, а цементирующая масса представлена в основном хлоритом, цеолитами и карбонатом (рис. 9).

Для решения задачи, касающейся систематизации интрузий ВМДП, нами было проведено их изучение в Накынском поле, а также в долинах рек Марха и Чимидикян.

Существующая систематика интрузивных образований пояса [8] основана на комплексе критериев, к которым относятся петрохимические особенности пород, их возраст, а также ориентировка даек в пространстве. Последнее не менее важно, поскольку большинство даек не обнажаются не только на дневной поверхности, но и на доюрском эрозионном уровне, и определить их принадлежность к тому или иному комплексу можно только по ориентировке связанных с ними аэромагнитных аномалий. Однако проведённый нами анализ показал, что эти критерии не являются ни универсальными, ни достаточно надёжными.

Прежде всего, следует заметить, что состав пород пояса крайне однообразен. В этом отношении Вилюйский палеорифт отличается от структур подобного рода, которым свойственна обычно обширная гамма магматитов как интрузивных, так эффузивных и эксплозивных, включающая породы от ультраосновного до кислого состава, от типичных щелочных до пород с нормальной щёлочностью. Это

может объясняться, скорее всего, незавершёностью эволюции рифта, остановившейся на континентальной стадии развития, а также постоянной, достаточно высокой скоростью растяжения литосферы [3]. Кроме того, это однообразие может быть связано и с тем, что комплекс магматитов ВМДП подвергся глубокому размыву, в результате чего его верхние части, которым свойственна обычно более высокая степень дифференциации, были эродированы, и на дневной поверхности обнажаются более глубокие его горизонты, характеризующиеся меньшей степенью дифференцированности исходной магмы.

Интрузии, входящие в ВМДП, имеют весьма близкие характеристики. Они сложены ограниченным набором пород, среди которых преобладают призматически-офитовые долериты и габбродолериты с постоянным присутствием позднемагматического кварца (до 5–6 об. %), содержащие 3–5 % продуктов ранней кристаллизации магмы: битовнит ( $An_{88-80}$ ), хризолит-гиалосидерит ( $Fa_{21-35}$ ), иногда магнезиальный клинопироксен ( $Wo_{35-37}En_{54-52}Fs_{11-12}$ ). Обычны роговая обманка, биотит, КППШ. Изредка встречаются обособления анортозитовых габбродолеритов, являющихся, видимо, производными этапа глубинной докамерной дифференциации (М. Д. Томшин, 2004 г.). При этом встречаются как оливин-нормативные, так и кварц-нормативные породы при преобладании последних. Процессы внутрикамерной дифференциации проявлены слабо, они свойственны лишь наиболее мощным дай-



**Рис. 9. Эксплозивная контактовая брекчия в ЗКИ эффузивной толщи. Обломки базальта с гиалопилитовой структурой в карбонат-хлорит-цеолитовой основной массе. Долина р. Чискова. Шлиф 1965, м-б 1 : 20, без анализатора**

**Fig. 9. Explosive contact breccia hosted by effusive strata. Fragments of hyalopilitic basalt in carbonate-chlorite-zeolite groundmass. Chiskova river valley. Polished section 1965, 1 : 20 scale, no analyzer**



кам, в центральных частях которых кристаллизуются габбро. На этом фоне выделяется только одна дайка – та, что прорывает трубку Нюрбинская; она дифференцирована от долеритов до габбродолеритов и кварцевых монзонит-порфиоров. Стоит отметить, что такой тип дифференциации установлен только в этой единственной дайке; это связано, возможно, с контаминацией веществом кимберлитов, химизм которых сильно отличается от пород кембрия. Приконтактные зоны всех тел сложены разновидностями с тонко- и мелкозернистой структурой, миндалекаменной текстурой.

Столь же близки и химические составы пород всех комплексов. На вариационных диаграммах фигуративные точки их составов образуют единое поле, отвечающее насыщенным толеитам известково-щелочной серии нормальной щёлочности; породы с несколько повышенной суммой щелочей встречаются достаточно редко, а типичные породы щелочной серии отсутствуют совершенно. Среди них по петрогеохимическим особенностям достаточно уверенно выделяются два ряда (серии) пород, различающиеся по содержаниям  $TiO_2$  и  $P_2O_5$ , реже  $K_2O$ :

- умеренно-титанистые долериты ( $TiO_2$  в среднем 2,5 мас. %); принадлежат к калиево-натровой ( $Na_2O / K_2O = 1,8–3$ ) серии, имеют нормальную щёлочность ( $K_2O + Na_2O \leq 3$  мас. %), нормальную магнезиальность (5,1–8 мас. %  $MgO$ ). Породы характеризуются пониженными содержаниями  $P_2O_5$  (в среднем 0,3 мас. %), Sr (в среднем 360 ppm), повышенным содержанием Cr (85 ppm), низким фракционированием REE ( $La / Yb$  7,4), сглаженным графиком распределения REE без хорошо выраженных аномалий (см. рис. 8);

- высокотитанистые долериты ( $TiO_2$  3–5, в среднем 4,4 мас. %). Они обычно также имеют нормальную, изредка умеренную щёлочность, занимая граничное положение между нормальными и умеренно-щелочными ( $K_2O + Na_2O$  2,5–5,8 мас. % при граничных содержаниях суммы щелочей 4,5–22). Принадлежат к породам калиево-натровой и только в одной дайке (прорывающей кимберлитовую труб-

ку) – к калиевой серии ( $Na_2O / K_2O < 1$ ). С повышенным содержанием  $TiO_2$  в них всегда чётко коррелируют повышенные содержания  $P_2O_5$  (0,6–0,78 до 1,42 мас. %), менее отчётливо повышенные содержания  $K_2O$  (2–3,6 до 5,42 мас. %); содержания Cr понижены (47 ppm). Породы характеризуются более высокой степенью обогащения высокочargedными некогерентными элементами (Rb, Th, U, Zr, Nb, Ta) и редкоземельными элементами: содержания Zr, Nb, Ta, LREE в два раза выше, чем в умеренно-титанистых долеритах (см. рис. 8). Степень фракционирования REE в этих породах выше, чем в умеренно-титанистых ( $La / Yb$  9,8).

Как показывают полученные нами результаты, высокотитанистые породы характерны в основном для даек в Накынском поле и на востоке пояса, в бассейне р. Тюнг (см. табл. 2, ан. 20–24), где они относятся к дьяхтарскому комплексу. Особенно высоки концентрации  $TiO_2$  в зоне контакта дайки с карбонат-базитовыми брекчиями (см. табл. 2, ан. 25–36); но содержания  $K_2O$  в долеритах центральной части этой дайки (см. табл. 2, ан. 31, 36) оказываются иногда существенно ниже (0,94–2,25 %). Однако в долине р. Марха дайки, относимые к дьяхтарскому комплексу (см. табл. 2, ан. 12, 13), характеризуются обычно невысокими содержаниями  $TiO_2$  (2,3–2,4 %),  $P_2O_5$  (0,26 %) при сопоставимых содержаниях других компонентов.

Прямо противоположная закономерность в содержании  $TiO_2$  свойственна породам среднемархинского комплекса. В долине р. Марха и в районе Накынского поля (см. табл. 2, ан. 3–7) это преимущественно высокотитанистые породы, почти всегда с высоким содержанием фосфора, изредка калия (до 2,15 %  $K_2O$ ). В восточной части ВМДП в бассейне р. Тюнг они отличаются только несколько повышенными содержаниями  $Fe_{общ.}$  (14,9–16,2 %) при низких –  $TiO_2$ ,  $P_2O_5$  и  $K_2O$  (см. табл. 2, ан. 15, 16).

Причиной подобной инверсии химизма даек различной ориентировки могут, вероятно, являться латеральная гетерогенность состава пород верхней мантии и (или) изменение глубины генерации базитовых магм в ходе эволюции рифтовой структуры [3, 6, 21].

Химизм пород, слагающих тела вилъюско-мархинского комплекса, ближе всего к долеритам нормального ряда. Для них характерны наиболее низкие значения  $TiO_2$  (2,07–2,67 %),  $P_2O_5$  (0,23–0,30 %) и  $K_2O$  (0,60–1,13 %) и только изредка несколько повышенные значения  $Fe_{общ.}$  (до 16,0 %).

Особенности вещественного состава пород комплексов очень незначительны и могут быть результатом естественных вариаций состава индивидуальных тел. Данные съёмочных, поисковых и тематических работ показывают, что все типы пород могут входить в состав интрузий любого из комплексов.

Прямые геологические данные для определения возраста базитов позволяют установить только нижний возрастной предел для даек умеренно-щелочного состава Накынского поля восточно-северо-восточного простириания (~ 60–65°), отнесённых к дьяхтарскому комплексу. Одна из них прорывает кимберлитовую трубку Нюрбинская, вследствие чего не может быть древнее франского времени, поскольку в кимберлитах трубки содержатся ксенолиты пород со среднедевонским (конец живетского яруса) комплексом конодонтов [11]. Абсолютный возраст всех трёх интрузивных комплексов базируется на результатах пяти определений изохронным Sm-Nd методом.

Возраст наиболее раннего комплекса, среднемархинского, определён этим методом для его петротипа – хонолита – в карьере Лиендокит; он составляет  $426 \pm 42$  млн лет (поздний силур) [10]. Многочисленные датировки K-Ar методом долеритов силлов и даек в Накыском районе дали результаты от 400 до 496 млн лет (конец кембрия – начало девона) [15, 16]. Результат датирования U-Pb SHRIMP методом по циркону долерита, отобранного нами из центральной части хонолита в том же карьере Лиендокит, –  $397 \pm 5$  млн лет, что отвечает верхам раннего девона.

Столь же неопределённо выглядят Sm-Nd датировки пород вилъюско-мархинского комплекса по пробам из даек северо-восточного простириания, вскрытых скважинами в Накыском поле, –  $377 \pm 40$  и  $376 \pm 42$  млн лет [9]. K-Ar датировки долеритов даек того же

направления и силлов в средней части ВМДП составляют от  $359 \pm 12$  до  $338 \pm 6$  млн лет. Данные Rb-Sr метода для «дотрубочных» базитов из дайки, секущей трубку Нюрбинская, дали изохронный возраст  $703 \pm 82$  млн лет, а K-Ar анализ по тем же пробам показал для одного образца позднерифейский возраст, для двух других – раннекаменноугольный (С. М. Саблуков, 2014 г.).

Возраст дьяхтарского комплекса по результатам Sm-Nd датирования даек в районе Накынского поля составляет  $321 \pm 36$  и  $331 \pm 47$  млн лет, что соответствует средней части каменноугольного периода [10]. Однако в северо-восточной части ВМДП в бассейнах рек Чимидикян и Тюнг для даек, отнесённых к нему по составу и восточно-северо-восточному простирианию, K-Ar методом получены весьма противоречивые результаты – от  $412 \pm 2$  до  $322 \pm 8$  млн лет [10]. Результат по нашей пробе из одной из этих даек U-Pb методом по циркону равен  $290,3 \pm 9,6$  млн лет – ранняя пермь.

Такие результаты нельзя признать удовлетворительными. Кроме того, они явно противоречат декларируемой не только Легендой-2009, но и абсолютным большинством других источников принадлежности всего комплекса интрузивных магматитов ВМДП к рифтовому этапу развития этого региона, который столь же уверенно относится к среднему и позднему девону [4, 5]. Однако систематика, принятая в Легенде-2009, априори признавая связь магматитов пояса с рифтингом, образование наиболее ранней части этой ассоциации – среднемархинского комплекса – связывает с неким гипотетическим событием в позднем силуре, а наиболее поздней – дьяхтарского комплекса – с ранним карбоном, и только один из них, вилъюско-мархинский комплекс, относит к позднему девону. При этом силурийский и каменноугольный периоды на Сибирской платформе характеризуются как практически амагматичные, со спокойной, лишённой заметных проявлений дизъюнктивной тектонической активности обстановкой [13].

Кроме того, применение для определения возраста магматитов ВМДП изотопных методов осложняется из-за высокой степени изме-

нённости пород в результате мощного воздействия постмагматических процессов, снижающих их точность, а также сближенности времени формирования не только всей популяции базитов, но и кимберлитов. В частности, точность Sm-Nd метода для среднемархинского комплекса составляет  $\pm 42$  млн, вилуйско-мархинского –  $\pm 40$ – $42$  млн, дьяхтарского – до  $\pm 47$  млн лет, что значительно больше разницы между датировками этих комплексов. Существует большое количество определений, выполненных и другими методами, расхождение результатов которых сопоставимы с приведёнными [8, 10, 17, 18, 20].

Оценка обширного материала по изотопным датировкам базитов ВМДП показывает, что лучшей сходимостью результатов, полученных в разное время и в разных лабораториях, характеризуются данные  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  метода. Возраст даек ВМДП по ним оценивается в интервале от 368,5 до 376,3 млн лет, что соответствует верхам франского – фаменскому ярусу верхнего девона [18, 19] (преобладают значения от 373,7 до 376,3 млн лет). Хорошо соответствует этому результат датирования дайки, прорывающей трубку Нюрбинская, составляющий  $374,4 \pm 3,5$  млн лет [6]. Эти данные лучше всего сочетаются с общегеологическими представлениями об эволюции Вилуйского палеорифта. Подчеркнём, что они относятся к ВМДП в целом как к единому комплексу.

В качестве идентификационного признака при выделении комплексов используется также ориентировка даек; считается, что для каждого из них она индивидуальна. В средней его части, в районе Накынского поля, дайки среднемархинского комплекса имеют простирание от северо-западного ( $330^\circ$ ) до северо-северо-восточного ( $10^\circ$ ), вилуйско-мархинского –  $40$ – $50^\circ$ , дьяхтарского –  $55$ – $65^\circ$ . Оно меняется в пределах пояса; тела различной ориентировки часто пересекаются и при этом более поздние должны, естественно, иметь с более ранними активные контакты.

Однако полевые наблюдения в низовьях р. Ханья, на одном из немногих хорошо обнажённых участков пояса, показали, что в местах сочленения даек различных простираний

в обнажениях не наблюдалось ни признаков прорывания, ни каких-либо изменений вещественного состава, которые могли бы свидетельствовать о разновременности их внедрения (М. Д. Томшин и др., 2004 г.; Э. А. Масленникова и др., 2013 г.).

На закрытых участках пояса предпринимались попытки определить последовательность внедрения интрузий путём изучения характера сочленения связанных с ними магнитных аномалий в точке пересечения. Большинство геофизических исследований, выполненных подразделениями АК «АЛРОСА» (в том числе в работе С. В. Бондаренко и др., 2008 г., в которой интерпретированы данные практически всех съёмок на площади ВМДП), показывают, что аномалии северо-восточного простирания (вилуйско-мархинский и дьяхтарский комплексы) обычно смещаются аномалиями северо-западной, северо-северо-западной и субмеридиональной ориентировки (среднемархинский комплекс), что свидетельствует о более позднем возрасте даек, связанных с ними. Аналогичный результат был получен и на востоке пояса в бассейне р. Тюнг (Ю. А. Дуккардт и др., 2002 г.). На некоторых участках ВМДП (в том числе в бассейнах рек Тюнг и Тюкян) установить последовательность образования разноориентированных даек оказалось невозможным. В работе В. И. Шаталова и др. (2005 г.), послужившей одним из главных источников при составлении Легенды-2009, также нет однозначной трактовки таких пересечений.

Кроме того, схема, предполагающая, что образование наиболее древней (среднемархинской) системы разломов, в общем случае ортогональной к оси рифта, связано с самостоятельным длительным этапом его развития, плохо коррелирует с рифтовой концепцией природы ВМДП. Известно, что разломы в рифтовых структурах возникают под действием растягивающих напряжений, иногда имеющих сдвиговую составляющую, а в случае изменения направления структуры – в режиме pull-apart [22]. При этом поперечные нарушения в рифтах, каковыми и являются трансформные разломы, не связаны с автономными эпизодами растяжения, всегда сопутствуют

продольным нарушениям, ограничивая вместе с ними тектонические блоки в рифтовой зоне, образующиеся из-за различных скоростей растяжения на разных её участках.

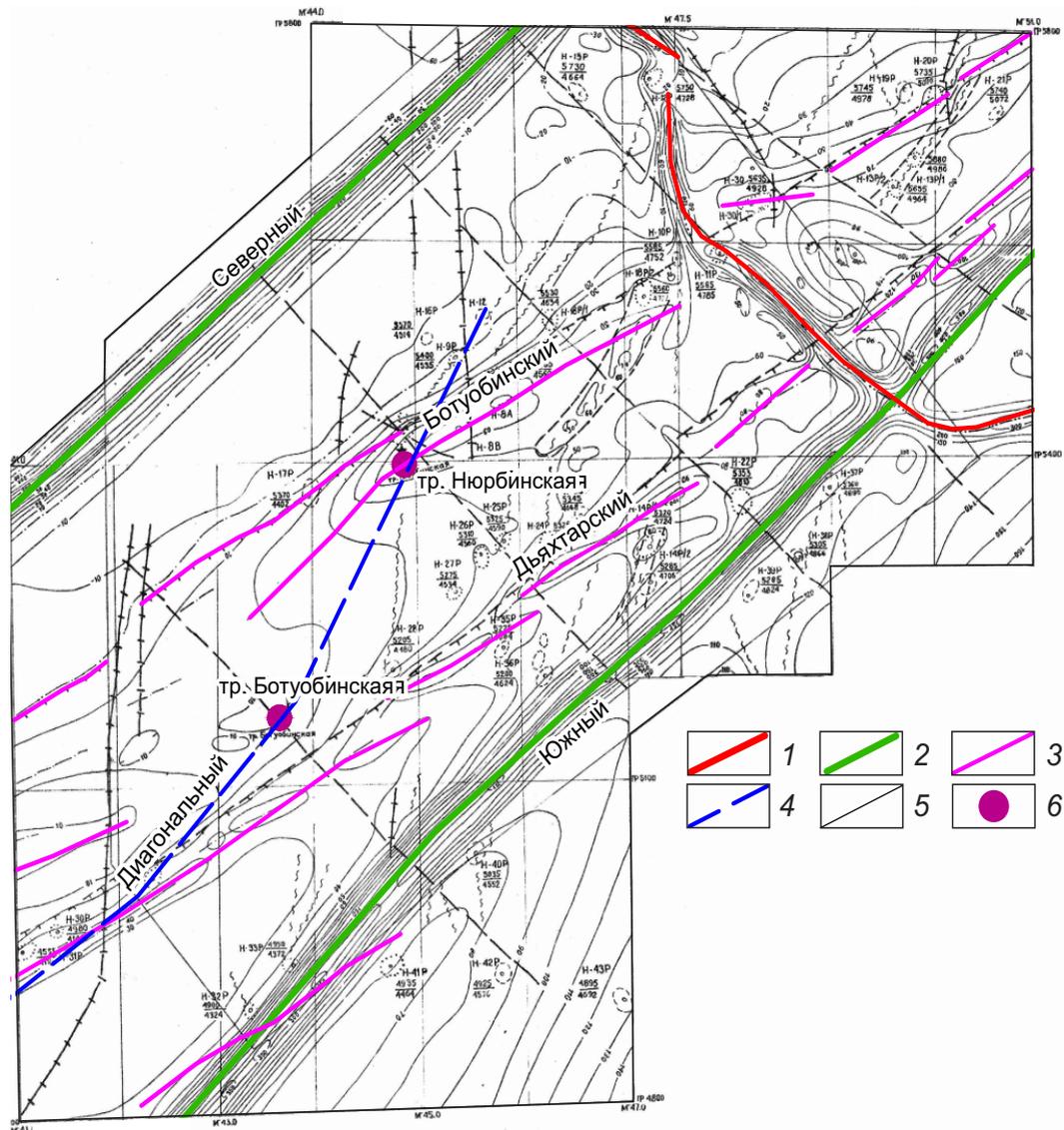
Нами была проанализирована карта магнитного поля м-ба 1 : 25 000 района Накынского кимберлитового поля (рис. 10), где развиты интрузии всех упомянутых направлений. Аномалии, отвечающие интрузиям, представлены двумя резко различающимися типами. К первому из них отнесены протяжённые прямолинейные аномалии северо-восточного ( $45^\circ$ ) простирания (виллюско-мархинский комплекс) с амплитудой 300–370 нТл шириной 50–100 м, уверенно трассирующиеся в пределах всего участка и почти не меняющие своих параметров и морфологии (разломы Северный и Южный). К тому же типу относится и аномалия общего северо-западного ( $\sim 315^\circ$ ) простирания (средне-мархинский комплекс), имеющая аналогичные параметры, но несколько меньшую (25–40 м) ширину и интенсивность. Она без смещений и изменения параметров сочленяется под прямым углом с аномалией Южного разлома, что свидетельствует об идентичности магнитных свойств и состава вызывающих их интрузивных тел и соответствует упомянутым выше данным в низовьях р. Ханья.

Аномалии второго типа (Дьяхтарский и Ботубинский разломы) выражены значительно менее чётко. Имея северо-восточное простирание  $\sim 55\text{--}65^\circ$  и амплитуду 10–30 нТл, они прослеживаются в виде отрезков длиной 2–4 км, расположенных кулисообразно; их морфология расплывчата. В точке пересечения Дьяхтарского разлома с северо-западным разломом аномалия, соответствующая последнему, сохраняет все свои параметры, в то время как аномалия Дьяхтарского разлома прерывается и меняет форму. Это говорит, скорее всего, о том, что аномалообразующий объект северо-западного направления сформировался позже объекта северо-восточного простирания. Но в 2,5 км к северо-западу, при пересечении с Ботубинским разломом, свои параметры меняют обе аномалии, что не позволяет корректно оценить их возрастные соотношения в этой точке.

**Заключение.** Проведёнными исследованиями было установлено, что дайка базитов, пересекающаяся с трубкой Нюрбинская, вскрытая в карьере, прорывает её с образованием зоны своеобразных контактовых флюидно-эксплозивных брекчий, представляющих собой продукты завершающего этапа становления умеренно-щелочных интрузий, практически синхронные им по времени формирования. Полученные авторами результаты с привлечением данных других исследователей показывают, что популяция даек базитов ВМДП, в которую входит изученная дайка, представляют собой единую ассоциацию, образовавшуюся в достаточно узком интервале времени, ограниченном  $\sim 10$  млн лет; он отвечает второй половине позднего девона – периоду наибольшей активности магматизма Палеовиллюского рифта.

Процесс формирования ВМДП нельзя, разумеется, считать одномоментным – некая последовательность в возникновении отдельных тел и/или их совокупностей, видимо, существует. Однако корректно установить её с помощью доступных методов в столь ограниченном отрезке геологического времени не представляется возможным, и в целом ассоциацию интрузивных образований основного состава ВМДП следует рассматривать как единый магматический комплекс. Вместе с тем следует заметить, что возрастной подход к их систематике не имеет особого смысла с точки зрения ни их контролирующей роли для кимберлитов, ни возможной связи с ними иногда ассоциирующей с базитами сульфидной минерализации. Значительно более конструктивно выделение различных петрологических типов пород, связанных с минерагеническими особенностями глубинных магматических очагов и условиями дифференциации магм.

Что касается временных соотношений базитов ВМДП и кимберлитов, то твёрдо установленным можно считать только факт пересечения последних дайкой базитов с северо-восточным простиранием ( $55\text{--}65^\circ$ ). Как было показано выше, дайки этой ориентировки составляют часть единого магматического комплекса, который, таким образом, следует



**Рис. 10. Соотношения аномалий магнитного поля над дайками ВМДП различной ориентировки (район Накынского поля):**

дайки долеритов: 1 – аз. прост. СЗ 320–350° (среднемархинский комплекс); 2 – аз. прост. СВ 45° (вилюйско-мархинский комплекс); 3 – аз. прост. СВ 55–65° (дьяхтарский комплекс); 4 – кимберлитоконтролирующий разлом Диагональный; 5 – изолинии напряжённости магнитного поля  $\Delta T_a$  (сечение для аномалий северо-восточного направления – 40 нТл, для аномалий восточно-северо-восточного направления – 10 нТл); 6 – кимберлитовые трубки

**Fig. 10. Relations of magnetic anomalies above variously oriented VMDB dikes (Nakyn field area):**

dolerite dikes: 1 – strike azimuth NW 320–350° (Sredne-Markhinsky sequence); 2 – strike azimuth NE 45° Vi-lyui-Markhinsky sequence); 3 – strike azimuth NE 55–65° (Dyakhtarsky sequence); 4 – Diagonal kimberlite-controlling fault; 5 – magnetic field intensity ( $\Delta T_a$ ) isolines (section for NE-trending anomalies is 40 nTl and 10 nTl for ENE-trending anomalies); 6 – kimberlite pipes

рассматривать в целом как посткимберлитовый. Из этого следует, что система разломов северо-восточного простирания не может контролировать ничего, кроме интрузирующих её даек базитов; считать её контролирующей для кимберлитов нет оснований. Один из признаков, косвенным образом подтверждающих это, – полное отсутствие в кимберлитах ксенолитов базитов, несмотря на их очень широкое распространение в районе Накынского поля. Можно утверждать почти с полной уверенностью, что ни в одной из разновидностей кимберлитовых пород всех известных кимберлитовых тел поля обломки базитов, несмотря на их активные поиски в связи с этой проблемой, обнаружить не удалось (кроме обломков в эксплозивных брекчиях и пород, относящихся к заведомо более древним – 0,7–1,8 млрд лет – комплексам). Заметим, что эту мысль высказал М. Д. Мащак в статье [10], послужившей основой для Легенды-2009 с соответствующей интерпретацией и предположением о том, что возраст кимберлитов может быть более древним, чем базитов всех ком-

плексов ВМДП, но она не нашла отражения в Легенде.

Отметим также рассмотренное выше резкое различие характера тектонических нарушений, вмещающих дайки базитов и кимберлитов. Если первые из них использовали ранее образовавшиеся мощные разломы листрического типа, выполненные брекчиями обрушения, то вторые внедрялись, видимо, в тонкие «чистые» трещины, возникшие непосредственно перед интрузией кимберлитовой магмы.

Структурой, определившей образование Накынского поля, является, несомненно, система разломов Диагональный и Параллельный, интрузированных дайками кимберлитов, вмещающая все тела поля и определяющая его субмеридиональное удлинение, соответствующее, видимо, ориентировке глубинной кимберлитогенерирующей структуры. По нашему убеждению, именно такие тектонические структуры, к сожалению, труднодиагностируемые, и должны рассматриваться как объекты поиска при планировании ГРП на алмазы в районе Накына.

## Список литературы

1. Зоненшайн Л. П., Кузьмин М. И., Натанов Л. М. Тектоника литосферных плит территории СССР. Т. 2. – М.: Недра, 1990. – 334 с.
2. Емельянов В. С., Толстов А. В., Борис Е. И. Новые данные о перспективах коренной алмазоносности Вилюйско-Мархинской зоны разломов // Вопросы методики прогнозирования и поисков месторождений полезных ископаемых (применительно к объектам ГРП АК АЛРОСА). – Якутск: ЯНИГП ЦНИГРИ, 2004. – С. 115–123.
3. Казьмин В. Г. Рифтовые структуры Восточной Африки – раскол континента и зарождение океана. – М.: Наука, 1987. – 204 с.
4. Кузьмин М. И., Ярмолук В. В. Мантийные плюмы Северо-Восточной Азии и их роль в формировании эндогенных месторождений // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55, № 2. – С. 153–184.
5. Киселев А. И., Ярмолук В. В., Егоров К. Н., Чернышов Р. А., Никифоров А. В. Среднепалеозойский базитовый магматизм северо-западной части Вилюйского рифта: состав, источники, геодинамика // Петрология. – 2006. – № 6. – С. 660–682.
6. Киселев А. И., Ярмолук В. В., Иванов А. В., Егоров К. Н. Пространственно-временные отношения среднепалеозойских базитов и алмазоносных кимберлитов на северо-западном плече Вилюйского рифта (Сибирский кратон) // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55 (2). – С. 185–196.
7. Константинов К. М., Яковлев А. А., Антонова Т. А., Константинов И. К., Ибрагимов Ш. З., Артёмова Е. В. Петро- и палеомагнитные характеристики структурно-вещественных комплексов месторождения алмазов трубка Нюрбинская (Средне-Мархинский район, Западная Якутия) // Геодинамика и тектонофизика. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 135–169.
8. Легенда Анабаро-Вилюйской серии листов Государственной геологической карты РФ масштаба 1 : 1 000 000 (третье поколение). Объяснительная записка / Глав. ред. Мащак М. С., сост. Мащак М. С., Кропачев А. П., Сотникова Г. Г., Сме-

- танникова Л. И., Чеканов В. И., Оленникова Е. В. – СПб. : ВСЕГЕИ, 2009. – 60 с.
9. Масайтис В. Л., Михайлов М. В., Селивановская Т. В. Вулканизм и тектоника Патомско-Виллюйского среднепалеозойского авлакогена. – М. : Недра, 1975. – 183 с.
  10. Мащак М. С., Наумов М. В., Леухин В. И., Молчанов Ю. Д., Шаталов В. И., Яныгин Ю. Т. Среднепалеозойский базитовый магматизм Мархатюнгского междуречья (Накынское кимберлитовое поле) // Региональная геология и металлогения. – 2004. – № 20. – С. 122–138.
  11. Тарабукин В. П., Реймерс А. Н., Нефедова Е. В. Оценка эрозионного среза кимберлитовых трубок Накынского поля // Отечественная геология. – 2003. – № 6. – С. 84–85.
  12. Тевелев Ал. В., Тевелев Арк. В. Сдвиговые магматические дуплексы // Тектоника, геодинамика, процессы магматизма и метаморфизма : материалы Тектонического совещания. – М. : Геос, 1999. – С. 189–193.
  13. Тесаков Ю. И., Симонов О. И., Ковалевская Е. О. [и др.] Силур северо-запада Сибирской платформы. – Новосибирск : СО РАН, Гео, 2002. – 405 с.
  14. Толстов А. В., Минин В. А., Василенко В. Б., Кузнецова Л. Г., Разумов А. Н. Новое тело высокоалмазоносных кимберлитов в Накынском поле Якутской алмазоносной провинции // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50, № 3. – С. 227–240.
  15. Томшин М. Д., Фомин А. С., Корнилова В. П., Черный С. Д., Яныгин Ю. Т. Особенности магматических образований Накынского кимберлитового поля Якутской провинции // Геология и геофизика. – 1998. – Т. 39. – С. 1693–1703.
  16. Томшин М. Д., Константинов К. М., Прокопьев А. В. Среднепалеозойский Виллюйский палеорифт и последовательность магматических событий // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту) : материалы совещания. – Иркутск : ИЗК СО РАН, 2016. – Вып. 14. – С. 277–279.
  17. Томшин М. Д., Похиленко Н. П., Тарских Е. В. Морфология кимберлитовой трубки и её взаимоотношение с долеритовой дайкой // Доклады академии наук. – 2017. – Т. 477 (5). – С. 600–605.
  18. Томшин М. Д., Копылова А. Г., Константинов К. М., Гоголева С. С. Базиты виллюйского палеорифта. Геохимия и последовательность становления // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59, № 10. – С. 1503–1518.
  19. Courtillot V., Kravchinsky V. A., Quidelleur X., Renne P. R., Gladkochub D. P. Preliminary dating of the Viluy traps (Eastern Siberia): Eruption at the time of Late Devonian extinction events? // Earth Planetary Science Letters. – 2010. – V. 300. – P. 239–245.
  20. Lapin A. V., Tolstov A. V., Antonov A. V. Sr and Nd isotopic compositions of kimberlites and associated rocks of the Siberian craton // Doklady Earth Sciences. – 2007. – V. 414, № 1. – P. 557–560
  21. Lapin A. V., Tolstov A. V., Vasilenko V. B. Petrogeochemical characteristics of the kimberlites from the middle Markha region with application to the problem of the geochemical heterogeneity of kimberlites // Geochemistry International. – 2007. – V. 45, № 12. – P. 1197–1209.
  22. Sylvester A. G. Strike-slip faults // Geological Society of America Bulletin. – 1988. – V. 100. – P. 1666–1703.

## References

1. Zonenshain L. P., Kuz'min M. I., Natapov L. M. Tektonika litosfernykh plit territorii SSSR. T. 2. [Tectonics of lithospheric plates of the USSR territory. Vol. 2], Moscow, Nedra Publ., 1990, 334 p.
2. Emel'yanov V. S., Tolstov A. V., Boris E. I. Novye dannye o perspektivakh korennoi almazonosnosti Vilyuisko-Markhinskoi zony razlomov [New data on the prospects of the indigenous diamond bearing of the Vilyuysko-Markhinskaya fault zone], Voprosy metodiki prognozirovaniya i poiskov mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh (primenitel'no k ob'ektam GRR AK ALROSA) [Questions of the methodology of forecasting and prospecting for mineral deposits (in relation to the objects of exploration of AK ALROSA)], Yakutsk, YANIGP TSNIGRI Publ., 2004, pp. 115–123.
3. Kaz'min V. G. Riftovye struktury Vostochnoi Afriki – raskol kontinenta i zarozhdenie okeana [Rift structures of Eastern Africa – continental rift and the birth of the ocean]

- tures of East Africa – the split of the continent and the origin of the ocean], Moscow, Nauka Publ., 1987, 204 p.
4. Kuz'min M. I., Yarmolyuk V. V. Mantiinye plyumy Severo-Vostochnoi Azii i ikh rol' v formirovanii endogennykh mestorozhdenii [Mantle plumes of Northeast Asia and their role in the formation of endogenous deposits], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2014, V. 55, No 2, pp. 153–184. (In Russ.).
  5. Kiselev A. I., Yarmolyuk V. V., Egorov K. N., Chernyshov R. A., Nikiforov A.V. Srednepaleozoiskii bazitovyi magmatizm severo-zapadnoi chasti Vilyuiskogo rifta: sostav, istochniki, geodinamika [Middle Paleozoic basal magmatism of the northwestern part of the Vilyui Rift: composition, sources, geodynamics], *Petrologiya [Petrology]*, 2006, No 6, pp. 660–682. (In Russ.).
  6. Kiselev A. I., Yarmolyuk V. V., Ivanov A. V., Egorov K. N. Prostranstvenno-vremennye otnosheniya srednepaleozoiskikh bazitov i almazonosnykh kimberlitov na severo-zapadnom pleche Vilyuiskogo rifta (Sibirskii kraton) [Spatial-temporal relations of Middle Paleozoic basites and diamond-bearing kimberlites on the northwestern arm of the Vilyui Rift (Siberian craton)], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2014, V. 55 (2), pp. 185–196. (In Russ.).
  7. Konstantinov K. M., Yakovlev A. A., Antonova T. A., Konstantinov I. K., Ibragimov Sh. Z., Artemova E. V. Petro- i paleomagnetnye kharakteristiki strukturalno-veshchestvennykh kompleksov mestorozhdeniya almazov trubka Nyurbinskaya (Sredne-Markhinskii raion, Zapadnaya Yakutiya) [Petro- and paleomagnetic characteristics of structural and material complexes of the Nyurbinskaya tube diamond deposit (Sredne-Markhinsky district, Western Yakutia)], *Geodinamika i tektonofizika [Geodynamics & Tectonophysics]*, 2017, V. 8, No 1, pp. 135–169. (In Russ.).
  8. Legenda Anabaro-Vilyuiskoi serii listov Gosudarstvennoi geologicheskoi karty RF masshtaba 1 : 1 000 000 (tret'e pokolenie). Ob'yasnitel'naya zapiska, [Legend of the Anabaro-Vilyuiskaya series of sheets of the State Geological Map of the Russian Federation scale 1: 1,000,000 (third generation). Explanatory note], St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2009, 60 p.
  9. Masaitis V. L., Mikhailov M. V., Selivanovskaya T. V. Vulkanizm i tektonika Patomsko-Vilyuiskogo srednepaleozoiskogo avlakogena [Volcanism and tectonics of the Patomsko-Vilyuysky Middle Paleozoic avlakogen], Moscow, Nedra Publ., 1975, 183 p.
  10. Mashchak M. S., Naumov M. V., Leukhin V. I., Molchanov Yu. D., Shatalov V. I., Yanygin Yu. T. Srednepaleozoiskii bazitovyi magmatizm Markhatsyungskogo mezhdurech'ya (Nakynskoe kimberlitovoe pole) [Srednepaleozoic basal magmatism of the Marha-Tung interfluve (Nakyn kimberlite field)], *Regional'naya geologiya i metallogeniya [Regional Geology and Metallogeny]*, 2004, No 20, pp. 122–138. (In Russ.).
  11. Tarabukin V. P., Reimers A. N., Nefedova E. V. Otsenka erozionnogo sreza kimberlitovykh trubok Nakynskogo polya [Assessment of the erosion section of kimberlite pipes of the Nakyn field], *Otechestvennaya geologiya [National Geology]*, 2003, No 6, pp. 84–85. (In Russ.).
  12. Tevelev Al. V., Tevelev Ark. V. Sdvigovye magmaticheskie dupleksey [Shear magmatic duplexes], *Tektonika, geodinamika, protsessy magmatizma i metamorfizma: Materialy Tektonicheskogo soveshchaniya [Tectonics, geodynamics, magma processes and metamorphism: Materials of the Tectonic Council]*, Moscow, Geos Publ., 1999, pp. 189–193. (In Russ.).
  13. Tesakov Yu. I., Simonov O. I., Kovalevskaya E. O. [et al.] Silur severo-zapada Sibirskoi platformy [Silurus of the northwest Siberian platform], Novosibirsk, SO RAN Publ., 2002, 405 p.
  14. Tolstov A. V., Minin V. A., Vasilenko V. B., Kuznetsova L. G., Razumov A. N. Novoe telo vysokoalmazonosnykh kimberlitov v Nakynskom pole Yakutskoi almazonosnoi provintsii [A new body of highly diamond-bearing kimberlites in the Nakyn field of the Yakut diamond-bearing province], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2009, V. 50, No 3, pp. 227–240. (In Russ.).
  15. Tomshin M. D., Fomin A. S., Kornilova V. P., Chernyi S. D., Yanygin Yu. T. Osobennosti magmaticheskikh obrazovaniy Nakynskogo kimberlitovogo polya Yakutskoi provintsii [Features of magmatic formations of the Nakyn kimberlite field of the Yakut province], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 1998, V. 39, pp. 1693–1703. (In Russ.).
  16. Tomshin M. D., Konstantinov K. M., Prokop'ev A. V. Srednepaleozoiskii Vilyuiskii paleorift i posledovatel'nost' magmaticheskikh sobytii [The Middle Paleozoic Vilyui paleorift and the sequence of magmatic events], *Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfe-*

- ry Tsentral'no-Aziatskogo podvizhnogo poiyasa (ot okeana k kontinentu): Materialy soveshchaniya [Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from ocean to continent): Materials of the meeting], Irkutsk, IZK SB RAS Publ., 2016, V. 14, pp. 277–279. (In Russ.).
17. Tomshin M. D., Pokhilenko N. P., Tarskikh E. V. Morfologiya kimberlitovoi trubki i ee vzaimootnoshenie s doleritovoi daikoi [Morphology of a kimberlite tube and its relationship with a dolerite dyke], *Doklady akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*, 2017, V. 477 (5), pp. 600–605. (In Russ.).
  18. Tomshin M. D., Kopylova A. G., Konstantinov K. M., Gogoleva S. S. Basites of the Vilyui paleorift. Geochemistry and the sequence of formation [Bazity vilyuiskogo paleorifta. Geokhimiya i posledovatel'nost' stanovleniya], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2018, V. 59, No 10, pp. 1503–1518. (In Russ.).
  19. Courtillot V., Kravchinsky V. A., Quidelleur X., Renne P. R., Gladkochub D. P. Preliminary dating of the Viluy traps (Eastern Siberia): Eruption at the time of Late Devonian extinction events?, *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, V. 300, pp. 239–245.
  20. Lapin A. V., Tolstov A. V., Antonov A. V. Sr and Nd isotopic compositions of kimberlites and associated rocks of the Siberian craton, *Doklady Earth Sciences*, 2007, V. 414, No 1, pp. 557–560.
  21. Lapin A. V., Tolstov A. V., Vasilenko V. B. Petrogeochemical characteristics of the kimberlites from the middle Markha region with application to the problem of the geochemical heterogeneity of kimberlites, *Geochemistry International*, 2007, V. 45, No 12, pp. 1197–1209.
  22. Sylvester A. G. Strike-slip faults, *Geological Society of America Bulletin*, 1988, V. 100, pp. 1666–1703.

## Авторы

### Черенков Владимир Георгиевич

ведущий геолог<sup>1</sup>  
v.cherenkov@mfvsegei.ru

### Корнилова Виктория Петровна

кандидат геолого-минералогических наук  
ведущий геолог<sup>1</sup>  
kornilova\_v@mail.ru

### Голубева Юлия Юрьевна

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

### Герасимова Марина Викторовна

ведущий геолог<sup>1</sup>  
m.gerasimova@mfvsegei.ru

<sup>1</sup> Московский филиал ФБГУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского», г. Москва

<sup>2</sup> ФБГУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва

## Authors

### Vladimir G. Cherenkov

Leading Geologist<sup>1</sup>  
v.cherenkov@mfvsegei.ru

### Viktoria P. Kornilova

PhD  
Leading Geologist<sup>1</sup>  
kornilova\_v@mail.ru

### Yulia Yu. Golubeva

PhD  
Leading Researcher<sup>2</sup>  
golubeva@tsnigri.ru

### Marina V. Gerasimova

Leading Geologist<sup>1</sup>  
m.gerasimova@mfvsegei.ru

<sup>1</sup> FSBI A. P. Karpinsky Russian Research Geological Institute, Moscow branch, Russia

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

## Акцессорные минералы золота и серебра в ультрамафитах Кызыр-Бурлюкского массива (Западный Саян)

### Gold and silver accessory minerals in ultramafites of the Kyzyr-Burlyuksky ultramafic massif (Western Sayan)

Юричев А. Н.

Yurichev A. N.

Объектом исследования являются акцессорные минералы золота и серебра (самородное серебро, медистое золото, луанхеит ( $\text{Ag}_3\text{Hg}$ ), неназванная минеральная фаза ( $\text{Cu,Ag,Hg}$ )), впервые диагностированные в дунитах и аподунитовых серпентинитах Кызыр-Бурлюкского ультрамафитового массива, входящего в состав Куртушибинского офиолитового пояса Западного Саяна. Выявленные рудные минералы в основном отмечаются в виде единичных гипидиоморфных, неправильных микроскопических выделений (0,5–3,0 мкм) преимущественно внутри магнетита, значительно реже в зёрнах аваруита. Охарактеризованы их типоморфные и химические особенности, показана естественная обстановка нахождения в породообразующей силикатной матрице. Формирование и концентрирование рассмотренных акцессорных минералов связываются с наложенными низкотемпературными процессами преобразования (гидратации) исходных ультраосновных пород. При этом присутствие луанхеита и неназванной фазы ( $\text{Cu,Ag,Hg}$ ), наряду с обнаруженным ранее потаритом ( $\text{PdHg}$ ), вероятно, является свидетельством низкотемпературных условий минералообразования при проявлении эпигенетических процессов серпентинизации (низкоградного метаморфизма) за счёт растворов, обогащённых ртутью. Не исключается, что источником таких растворов могли выступать внедрявшиеся позднее в основное ультрамафитовое тело интрузивы габбрового состава.

Ключевые слова: Западный Саян, офиолиты, Кызыр-Бурлюкский массив, реститовые ультрамафиты, золото, серебро, химизм, генезис.

The study focuses on gold and silver accessory minerals (native silver, cuprous gold, luanheite ( $\text{Ag}_3\text{Hg}$ ), unspecified mineral phase ( $\text{Cu,Ag,Hg}$ ), first diagnosed in dunitites and apodunite serpentinites of the Kyzyr-Burlyuksky ultramafic massif, which is part of the Kurtushibin ophiolite belt of Western Sayan. The revealed ore minerals are mainly observed in the form of single hypidiomorphic, irregular microscopic precipitates (0.5–3.0  $\mu\text{m}$ ) mainly inside magnetite, much less often in grains of avaruite. Typomorphic and chemical features of ore minerals, their natural setting in rock-forming silicate matrix are characterized. Formation and concentration of these accessory minerals is associated with superimposed low-temperature transformation (hydration) processes affecting original ultramafic rocks. At the same time, the presence of luanheite and an unnamed phase ( $\text{Cu,Ag,Hg}$ ), along with the previously identified potarite ( $\text{PdHg}$ ), is probably evidence of low-temperature conditions of mineral formation during the manifestation of epigenetic processes of serpentization (low-grade metamorphism) due to solutions enriched in mercury. The source of such solutions could be gabbro intrusions that penetrated later into the main ultramafic body.

Keywords: Western Sayan, ophiolites, Kyzyr-Burlyuksky massif, restite ultramafic rocks, gold, silver, chemism, genesis.

Для цитирования: Юричев А. Н. Акцессорные минералы золота и серебра в ультрамафитах Кызыр-Бурлюкского массива (Западный Саян). Руды и металлы. 2021. № 4. С. 109–120. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10031.

For citation: Yurichev A. N. Gold and silver accessory minerals in ultramafites of the Kyzyr-Burlyuksky ultramafic massif (Western Sayan). Ores and metals, 2021, № 4, pp. 109–120. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10031.

Минералы золота и серебра в составе реститовых ультрамафитов офиолитовых комплексов относятся к числу крайне редких находок. До настоящего времени они слабо изучены и характеризуются неоднозначной генетической интерпретацией, очевидно, из-за сложности их поиска и последующего анализа (микроскопические, до ~ 10 мкм, размеры выделений и незначительные, до ~ 0,1 %, содержания).

При изучении вещественного состава рудной аксессуарной минерализации в аншлифах, изготовленных из образцов дунитов и их серпентинизированных разностей Кызыр-Бурлюкского массива, автором впервые были диагностированы микроскопические включения минералов золото-серебряной специализации. В статье приводится химическая типизация выявленных минералов и делается предположение о механизме их образования. Отражена естественная обстановка нахождения установленной минерализации в породообразующей матрице.

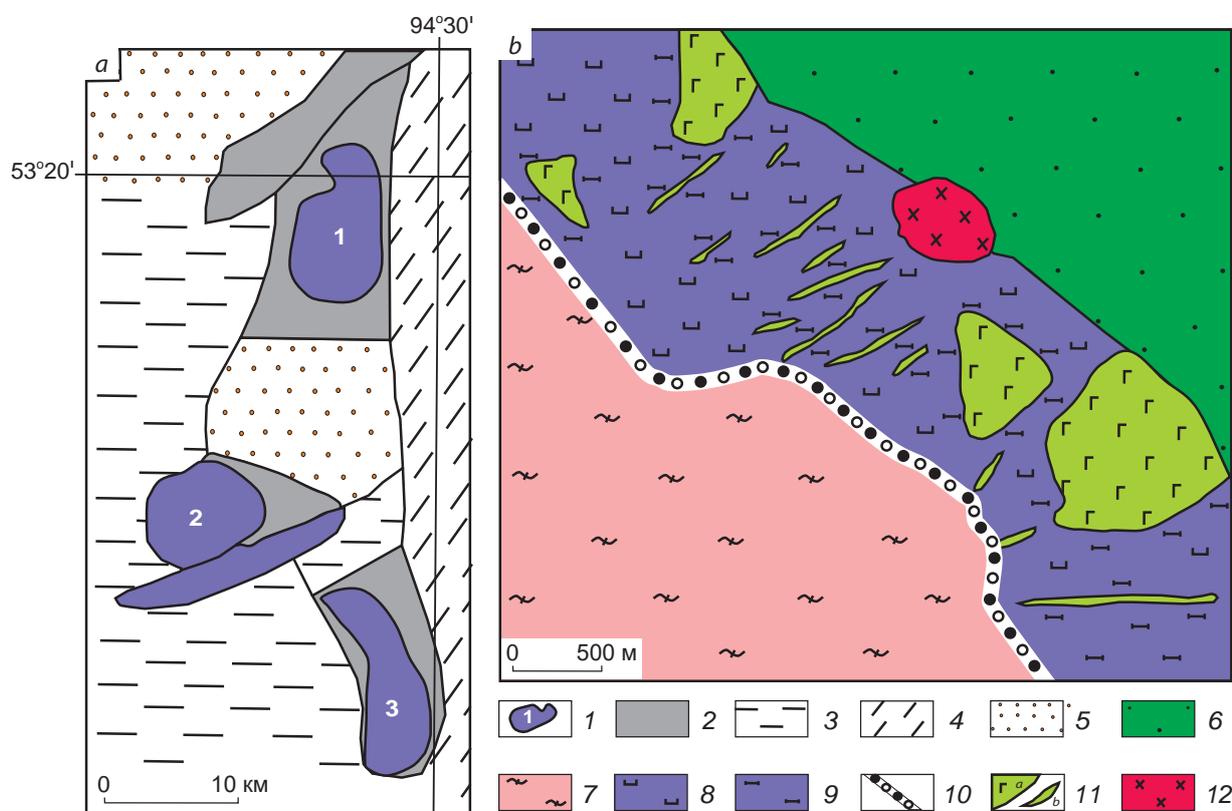
*Геологическое строение исследуемого массива.* Кызыр-Бурлюкский ультрамафитовый массив расположен на западном склоне хребта Эргак-Таргак-Тайга и является фрагментом Куртушибинского офиолитового пояса Западного Саяна [4, 18]. Он имеет удлинённую форму, ориентированную в северо-западном направлении с крутым погружением на северо-восток (рис. 1). Мощность массива составляет от 1 до 2,5 км. Вдоль его юго-западного контакта с вмещающими зелёными сланцами венд-кембрийского возраста картируется зона серпентинитового меланжа. С северо-востока массив перекрывается более молодыми осадочными отложениями позднесилурийского возраста.

Массив сложен преимущественно реститовыми дунитами и их серпентинизированными разностями с редкими жильными телами ортопироксенитов [13]. Дуниты прорываются многочисленными мелкими субизометрическими интрузивными телами и дайками габброидов. Последние имеют субнормальную ориентировку по отношению к простиранию массива и, вероятно, образовались при внедре-

нии расплава вдоль трещин отрыва, появившихся при поперечном сдавливании массива. В экзоконтактовых зонах габброидов постоянно прослеживаются породы верлит-клинопироксеновой ассоциации, которые, очевидно, являются реакционно-метасоматическими образованиями, возникшими в результате воздействия высокотемпературных основных расплавов на консолидированные дуниты. В эндоконтактовых частях массива и вдоль разломов отмечается интенсивная серпентинизация (антигоритизация).

Дуниты имеют преимущественно крупнозернистое строение и постоянно обнаруживают признаки пластических деформаций, выражающиеся в неоднородном субблоковом и мозаичном погасании зёрен оливина, в характерных полосах сброса и проявлении по краям зёрен синтетектонической рекристаллизации. По химическому составу оливин занимает пограничное положение между форстеритом и хризолитом ( $Fa = 10,5-10,9 \%$ ) [13]. Зёрна хромшпинелидов встречаются редко, в виде аксессуарной вкрапленности, их размер менее 0,5 мм. Они имеют субизометрическую, реже эвгедральную форму и по классификации Н. В. Павлова [10] соответствуют преимущественно хромпикотитам и реже субферриалюмохромитам.

*Методика исследования.* В соответствии с задачами настоящего исследования использовался традиционный подход минераграфического изучения рудных минералов с определением химического состава фаз рентгеноспектральным микроанализом, с применением метода растровой электронной микроскопии [23]. Последний метод включал изучение отдельных зёрен и их агрегатов на сканирующем электронном микроскопе с дальнейшими энергодисперсионным и волнодисперсионным микроанализами. Использовались следующая аппаратура: электронные микроскопы Tescan Mira 3 LMU с энергодисперсионным детектором UltimMax100 (Oxford Instruments), Tescan Vega II LMU с энергодисперсионной (с детектором Si(Li) Standard) INCA Energy 350 и волнодисперсионной INCA Wave 700 приставками. Перед исследованием из отобранных об-



**Рис. 1. Схемы геологического строения Куртушибинского офиолитового пояса Западного Саяна [4] (a), Кызыр-Бурлюкского массива [13] (b):**

1 – ультрамафитовые массивы (1 – Эргакский, 2 – Калнинский, 3 – Кызыр-Бурлюкский); 2 – вулканогенно-осадочные толщи (метабазальты, плагиориолиты, сланцы кремнистые, углистые, глаукофановые); каледонские складчатые системы: 3 – Западно-Саянская, 4 – Хемчикско-Систигхемская; 5 – среднепалеозойские впадины; 6 – осадочные отложения; 7 – сланцы по основным вулканитам; 8 – дуниты; 9 – верлиты; 10 – зона меланжа; 11 – габбро (a – штоки, b – дайки); 12 – диориты

**Fig. 1. Geological structure schemes: a – Kurtushibinsky ophiolite belt, Western Sayan [4], b – Kyzыр-Burlyuysky massif [13]:**

1 – ultramafic massifs (1 – Ergaksky, 2 – Kalninsky, 3 – Kyzыр-Burlyuysky); 2 – volcano-sedimentary strata (metabasalt, plagioryolite, siliceous, carbonaceous, glaucophane shales); Caledonian fold systems: 3 – Western Sayan, 4 – Khemchiksko-Sistighemskaya; 5 – Middle Paleozoic depressions; 6 – sedimentary deposits; 7 – shale formed on basic volcanic rocks; 8 – dunite; 9 – verlite; 10 – mélangé zone; 11 – gabbro (a – stocks, b – dikes); 12 – diorite

разцов дунитов и хромититов были изготовлены плоскопараллельные аншлифы толщиной 3–4 мм с последующим напылением на изучаемые поверхности слоя углерода (~ 25–30 нм). Измерения проводились на вольфрамовом катоде при ускоряющем напряжении 20 кВ, текущем токе 15 нА и времени набора спектра

120 с. Диаметр пучка зонда составил 1–2 мкм. В качестве эталонов сравнения применялись стандарты МАС (55 Standard Universal Block Layout + F/Cup № 6835): для Au, Ag, Cu, Fe, Pd, Pt – чистые металлы; для Hg – HgTe. Используются аналитические линии: La для Au, Ag, Pd и Pt; Ka для Fe и Cu; Ma для Hg.

Все анализы выполнены в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ (г. Томск, аналитик Е. В. Корбовяк). Расчёты химических составов проводились по программе INCA-Issue 18b и по дополнительным авторским программам.

*Анализ полученных результатов.* В процессе изучения аншлифов главных типов пород Кызыр-Бурлюкского массива акцессорные минералы золота и серебра были диагностированы только в дунитах и аподунитовых серпентинитах. В ортопироксенитах, верлитах и габброидах данный тип минерализации не выявлен. Учитывая микроскопический размер выделений минерализации, её обнаружение и диагностика представились возможными только путём трудоёмкого детального изучения всей рабочей поверхности аншлифов под микроскопом. Выявленные акцессорные минералы в основном присутствуют в виде единичных гипидиоморфных, неправильных микроскопических выделений (0,5–3,0 мкм), главным образом внутри магнетита, значительно реже в зёрнах аваруита. По химическому составу установлены самородное серебро, медистое золото, луанхеит (Ag<sub>3</sub>Hg) и неназванная фаза (Cu,Ag,Hg).

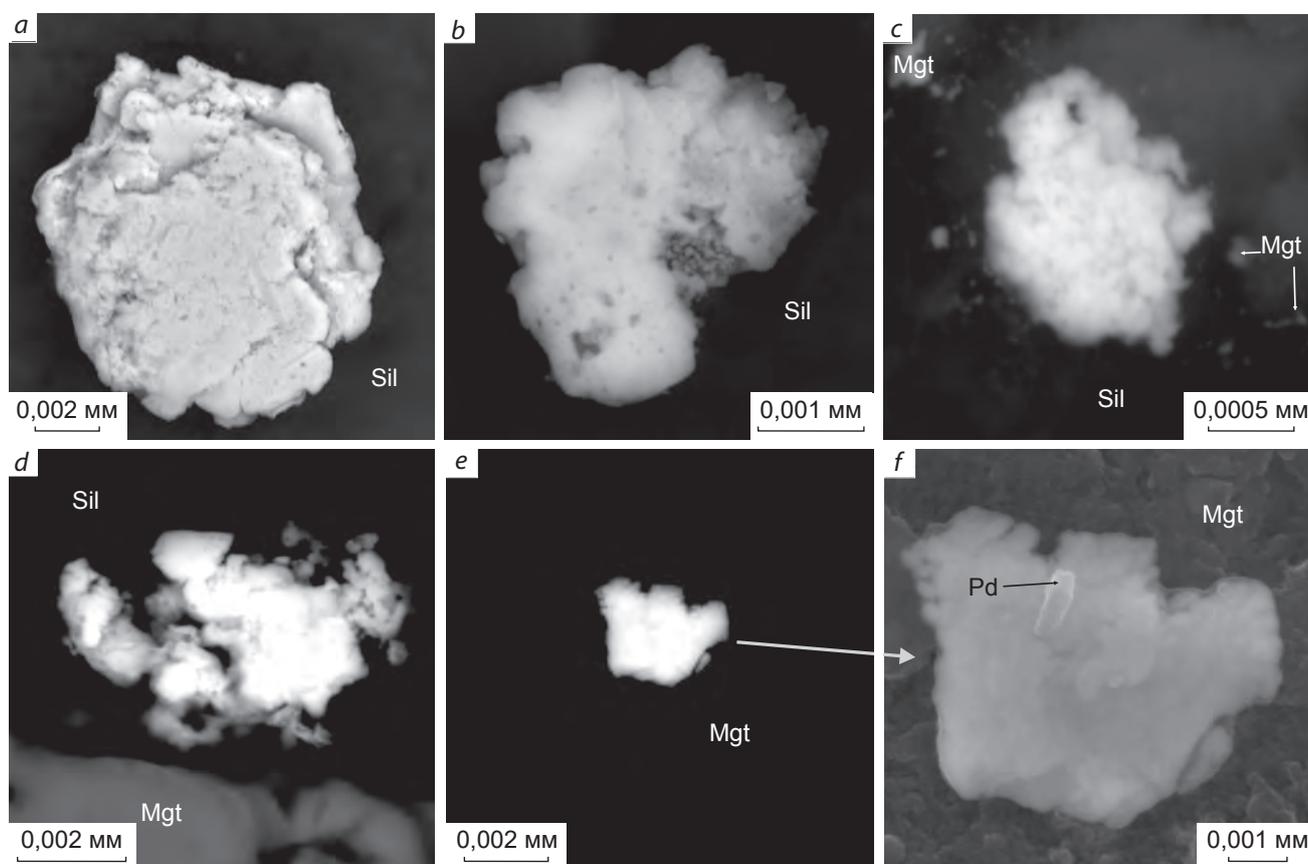
Самородное серебро – наиболее распространённый из выделенных минералов, наблюдается как в неизменённых дунитах, так и в их серпентинизированных разновидностях. При этом в первых серебро образует отдельные обособленные сгустковидные выделения пластинчатой округлой формы в основной силикатной матрице (рис. 2, *a, b*), а в составе вторых часто отмечается в виде более разуплотнённых и дезинтегрированных выделений в тесном парагенезисе с магнетитом или внутри его крупных неправильных зёрен (см. рис. 2, *c–f*). Размер таких выделений достигает 10 мкм. В «свежих» дунитах химический состав минерала характеризуется практически полной «стерильностью» за исключением незначительной примеси железа (до 2,8 %); в серпентинизированных разновидностях наблюдается тенденция к возрастанию в составе роли железа (до 8,2 %) и появлению примесей меди (до 5,0 %) и палладия (до 1,1 %) (таблица). При

этом, если медь – обычная примесь для серебра, и Ю. А. Волченко [12] ранее выявлял даже медистое серебро в альпинотипных ультрамафитах, то примеси железа и палладия менее типичны. Автор склонен относить их к механическим, «загрязняющим» химический состав самородного серебра путём вхождения в него в виде тонкодисперсных включений. В пользу данного предположения свидетельствует обнаружение обособленного микроскопического выделения самородного палладия внутри одного из выделений самородного серебра (см. рис. 2, *e, f*).

Медистое золото (купроаурид?) выявлено только в аподунитовых серпентинитах, имеет неправильную комковатую форму, с вмятопластичной и чешуйчатой скульптурой отдельных индивидов (рис. 3, *a, b*). Минерал фиксируется исключительно в виде микроскопических (до 2 мкм) выделений в магнетите. В его химическом составе существенно преобладают два компонента: золото (52–61 %) и медь (30–40 %), а серебро диагностируется в виде постоянной примеси (7–9 %) (см. табл.). Также отмечено, что при достаточно широких границах смесимости золота и меди часто сохраняется их пропорциональное соотношение, стремящееся к Au / Cu = 2 / 1. Выявленное медистое золото обнаруживает значительное сходство с подобными природными сплавами из хромититов Харчерузского и Войкаро-Сыньинского массивов (Полярный Урал) и хромититов арсенидного никель-кобальтового месторождения Бени-Буазера (Марокко) (рис. 4) [16, 21].

Луанхеит чаще образует мелкие (до 1 мкм) гипидиоморфные, округлые включения исключительно в зёрнах магнетита (см. рис. 3, *c*). Постоянно в химическом составе минерала встречаются примеси никеля (до 5,1 %), меди (до 1,9 %) и палладия (до 2,0 %) (см. табл.), которые, с учётом «стерильности» вмещающего магнетита и полученных пересчётов на формулу луанхеита, автор склонен относить к механическим.

Неизвестная фаза (Cu,Ag,Hg) редка, выявлена в виде очень мелких (до 0,6 мкм) вытянутых выделений в краевых частях зёрен ава-



**Рис. 2.** Микрофотографии самородного серебра в дунитах (*a, b*) и аподунитовых серпентинитах (*c–f*) Кызыр-Бурлюкского массива:

*a–e* – режим BSE; *f* – режим SE; Sil – силикатная матрица; Mgt – магнетит; Pd – палладий

**Fig. 2.** Microphotographs of native silver in dunite (*a, b*) and apodunite serpentinite (*c–f*) of Kyzыр-Burlyuisky massif:

*a–e* – BSE mode; *f* – SE mode; Sil – silicate matrix; Mgt – magnetite; Pd – palladium

руита  $Ni_3Fe$  (см. рис. 3, *d*). Часто в химическом составе триады диагностируется незначительная (менее 1 %) примесь палладия (см. табл.).

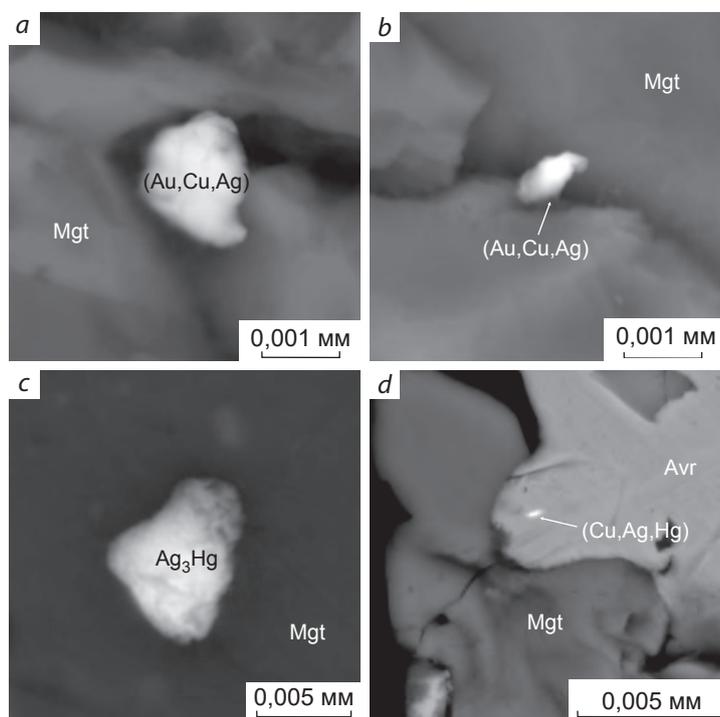
**Выводы.** Полученные данные – первое свидетельство наличия акцессорной золото-серебряной минерализации в дунитах и аподунитовых серпентинитах Кызыр-Бурлюкского ультрамафитового массива Западного Саяна. Впервые в данных породах установлены и охарактеризованы самородное серебро, медистое золото, луанхеит и неназванная минеральная фаза (Cu,Ag,Hg).

Самородное серебро – большая редкость для ультраосновных пород. К настоящему времени известно всего несколько сообщений о находках данного металла в реститовых ультрамафитах Урала [7, 12, 15]. При этом информация о химическом составе серебра авторами сообщений из-за малых размеров выделений практически не приводится. В настоящей работе описан химический состав самородного серебра как в «свежих» дунитах, так и в серпентинизированных разностях. Во-первых, минерал характеризуется практически

**Химический состав аксессуарной золото-серебряной минерализации из дунитов и аподунитовых серпентинитов Кызыр-Бурлюкского ультрамафитового массива, вес. %**

Chemical composition of accessory gold-silver mineralization from dunite and apodunite serpentinite, Kyzыр-Burlyuisky ultramafic massif, weight %

Ag	Au	Pd	Cu	Ni	Fe	Hg	Сумма	Формула
<b>Самородное серебро (Ag)</b>								
Дуниты								
99,41	–	–	–	–	0,74	–	100,15	Ag <sub>0,99</sub> Fe <sub>0,01</sub>
99,36	–	–	–	–	0,78	–	100,14	Ag <sub>0,99</sub> Fe <sub>0,01</sub>
97,08	–	–	–	–	2,30	–	99,38	Ag <sub>0,96</sub> Fe <sub>0,04</sub>
98,09	–	–	–	–	1,78	–	99,87	Ag <sub>0,97</sub> Fe <sub>0,03</sub>
96,56	–	–	–	–	2,83	–	99,39	Ag <sub>0,95</sub> Fe <sub>0,05</sub>
Аподунитовые серпентиниты								
93,57	–	–	–	–	6,10	–	99,67	Ag <sub>0,89</sub> Fe <sub>0,11</sub>
91,46	–	–	–	–	8,26	–	99,72	Ag <sub>0,85</sub> Fe <sub>0,15</sub>
96,51	–	–	–	–	2,80	–	99,31	Ag <sub>0,95</sub> Fe <sub>0,05</sub>
93,61	–	–	4,37	–	0,80	–	98,78	Ag <sub>0,91</sub> Cu <sub>0,07</sub> Fe <sub>0,02</sub>
93,66	–	–	5,00	–	1,02	–	99,69	Ag <sub>0,90</sub> Cu <sub>0,08</sub> Fe <sub>0,02</sub>
94,01	–	–	4,63	–	1,14	–	99,78	Ag <sub>0,90</sub> Cu <sub>0,08</sub> Fe <sub>0,02</sub>
96,43	–	0,90	–	–	0,90	–	98,22	Ag <sub>0,97</sub> Fe <sub>0,02</sub> Pd <sub>0,01</sub>
97,15	–	0,96	–	–	0,83	–	98,94	Ag <sub>0,97</sub> Fe <sub>0,02</sub> Pd <sub>0,01</sub>
98,25	–	0,89	–	–	1,02	–	100,16	Ag <sub>0,97</sub> Fe <sub>0,02</sub> Pd <sub>0,01</sub>
95,69	–	0,91	–	–	2,27	–	98,88	Ag <sub>0,95</sub> Fe <sub>0,04</sub> Pd <sub>0,01</sub>
96,19	–	1,15	–	–	2,20	–	99,55	Ag <sub>0,95</sub> Fe <sub>0,04</sub> Pd <sub>0,01</sub>
96,02	–	–	–	–	3,31	–	99,33	Ag <sub>0,94</sub> Fe <sub>0,06</sub>
96,39	–	–	–	–	3,12	–	99,51	Ag <sub>0,94</sub> Fe <sub>0,06</sub>
96,00	–	2,69	–	–	0,86	–	99,55	Ag <sub>0,94</sub> Fe <sub>0,05</sub> Pd <sub>0,01</sub>
96,65	–	2,38	–	–	1,08	–	100,10	Ag <sub>0,94</sub> Fe <sub>0,05</sub> Pd <sub>0,01</sub>
93,08	–	5,25	–	–	0,97	–	99,29	Ag <sub>0,89</sub> Fe <sub>0,10</sub> Pd <sub>0,01</sub>
96,20	–	–	–	–	2,15	–	98,35	Ag <sub>0,96</sub> Fe <sub>0,04</sub>
97,26	–	–	–	–	2,31	–	99,57	Ag <sub>0,96</sub> Fe <sub>0,04</sub>
<b>Медистое золото (Au,Cu,Ag)</b>								
Аподунитовые серпентиниты								
7,24	53,28	–	39,66	–	–	–	100,18	Cu <sub>0,65</sub> Au <sub>0,28</sub> Ag <sub>0,07</sub>
7,85	51,69	–	40,43	–	–	–	99,97	Cu <sub>0,65</sub> Au <sub>0,27</sub> Ag <sub>0,08</sub>
9,02	61,09	–	30,07	–	–	–	100,19	Cu <sub>0,55</sub> Au <sub>0,36</sub> Ag <sub>0,09</sub>
9,13	60,54	–	30,26	–	–	–	99,92	Cu <sub>0,55</sub> Au <sub>0,35</sub> Ag <sub>0,10</sub>
<b>Луанхейт Ag<sub>3</sub>Hg</b>								
Дунит								
56,55	–	1,73	1,24	4,7	–	35,43	99,64	Ag <sub>2,97</sub> Ni <sub>0,45</sub> Cu <sub>0,11</sub> Pd <sub>0,09</sub> Hg <sub>1,00</sub>
57,27	–	1,66	1,59	4,38	–	35,15	100,06	Ag <sub>3,02</sub> Ni <sub>0,43</sub> Cu <sub>0,14</sub> Pd <sub>0,09</sub> Hg <sub>1,00</sub>
55,37	–	1,5	1,55	5,13	–	35,32	98,87	Ag <sub>2,92</sub> Ni <sub>0,49</sub> Cu <sub>0,14</sub> Pd <sub>0,08</sub> Hg <sub>1,00</sub>
56,21	–	1,74	1,91	5,01	–	35,25	100,12	Ag <sub>2,97</sub> Ni <sub>0,48</sub> Cu <sub>0,17</sub> Pd <sub>0,09</sub> Hg <sub>1,00</sub>
56,35	–	2,02	1,32	4,84	–	35,59	100,12	Ag <sub>2,95</sub> Ni <sub>0,46</sub> Cu <sub>0,12</sub> Pd <sub>0,11</sub> Hg <sub>1,00</sub>
<b>Фаза (Cu,Ag,Hg)</b>								
Аподунитовые серпентиниты								
42,73	–	–	41,38	–	–	15,52	99,63	Cu <sub>0,58</sub> Ag <sub>0,35</sub> Hg <sub>0,07</sub>
39,7	–	0,72	44,48	–	–	14,4	99,3	Cu <sub>0,61</sub> Ag <sub>0,32</sub> Hg <sub>0,06</sub> Pd <sub>0,01</sub>
37,67	–	0,87	47,7	–	–	14,04	100,29	Cu <sub>0,64</sub> Ag <sub>0,29</sub> Hg <sub>0,06</sub> Pd <sub>0,01</sub>



**Рис. 3. Микрофотографии акцессорной золото-серебряной минерализации в ультрамафитах Кызыр-Бурлюкского массива (режим BSE):**

Mgt – магнетит; Avr – аваруйт

**Fig. 3. Microphotographs of accessory gold-silver mineralization in Kyzыр-Burlyuksky massif ultramafite (BSE mode):**

Mgt – magnetite; Avr - avaruit

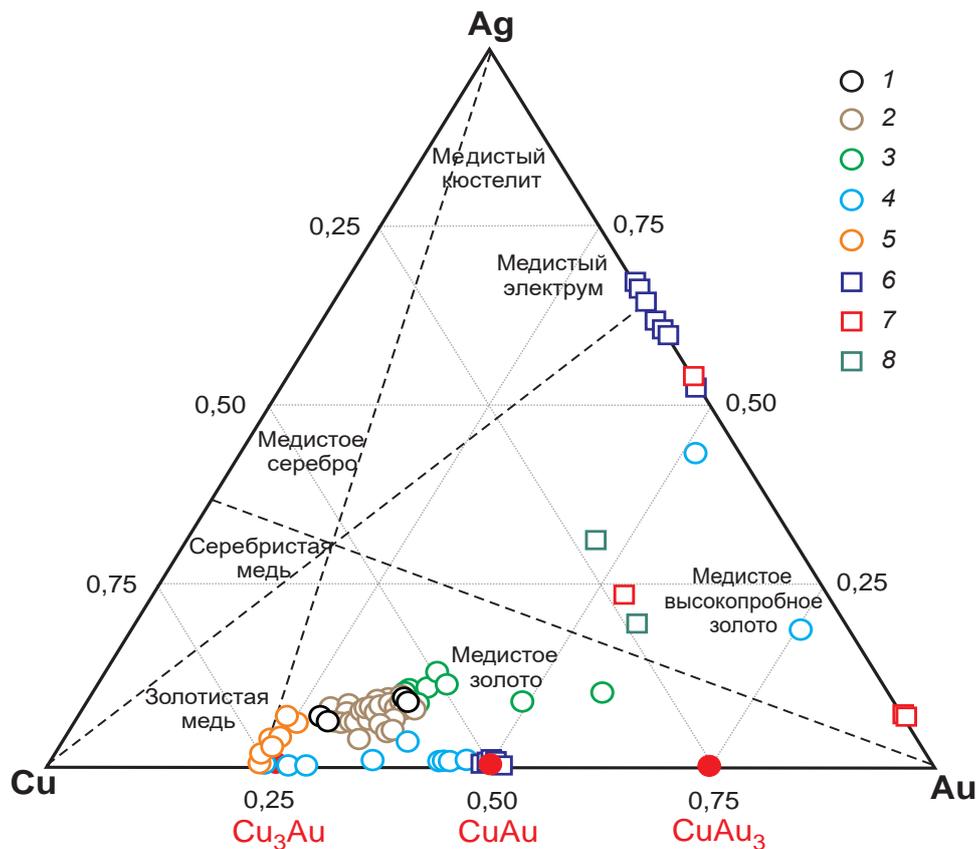
полной «стерильностью» с незначительной примесью железа (до 2,8 %), во-вторых, по мере увеличения степени серпентинизации вмещающих ультрамафитов отмечаются возрастание в составе серебра роли железа (до 8,2 %), а также появление примесей меди (до 5,0 %) и палладия (до 1,1 %). Необычное для серебра повышенное содержание железа ранее также подчёркивалось А. Б. Макеевым в массиве Рай-Из (Полярный Урал) [7]. Автор склонен связывать это обстоятельство, наряду с примесью палладия, с механическим «загрязнением» химического состава самородного серебра этими элементами путём их вхождения в него в виде самородных тонкодисперсных включений в результате процессов серпентинизации.

Химический состав диагностированного медистого золота в аподунитовых серпентинитах Кызыр-Бурлюкского массива отличается от такового ранее выявленных золотин в реститовых ультрамафитах (преимущественно серпентинитах) Южного Урала, Восточного Саяна и Южной Тувы (см. рис. 4). Состав последних соответствует электруму или ме-

дистому высокопробному золоту и характеризуется существенно меньшим содержанием меди в триаде. Однако изученные золотины обнаруживают высокое сходство с подобными природными сплавами из хромититов Полярного Урала (Россия) и Марокко.

Луанхеит относится к числу достаточно редких минералогических находок, что, очевидно, связано с его незначительными размерами и выявлением только при микроскопическом изучении аншлифов. Он известен в золотоносной россыпи р. Луанхе (КНР) [19] и в золото-полиметаллических рудах рудопроявления «Полярная Надежда» (Полярный Урал, Россия) [8]. Подобная находка вместе с находками медистого золота в ультрамафитах Кызыр-Бурлюкского массива позволяет предположить возможность обнаружения в массиве золотоносной минерализации.

Формирование и концентрирование рассмотренных акцессорных минералов золота и серебра автор склонен связывать с наложенными низкотемпературными процессами преобразования (гидратации) исходных ультраосновных пород [7, 16]. При этом присутствие



**Рис. 4. Тройная диаграмма Cu–Au–Ag с составами (ат. доли) трёхкомпонентных природных сплавов золота, меди и серебра из различных ультрамафитовых объектов:**

1 – аподунитовые серпентиниты Кызыр-Бурлюкского массива (Западный Саян); 2 – хромититы Харчерузского массива (Полярный Урал) [16]; 3 – хромититы арсенидного никель-кобальтового месторождения Бени-Буазера (Марокко) [21]; 4 – родингиты золоторудного месторождения Золотая Гора (Карабашский массив, Южный Урал) [9, 20]; 5 – хромититы Войкаро-Сыньинского массива (Полярный Урал) [6, 14]; 6 – хромититы и серпентиниты Агардагского массива (Южная Тува) [5]; 7 – мафит-ультрамафиты Хурай-Жалгинского массива (Восточный Саян) [3]; 8 – ультрамафиты Оспинско-Китойского массива (Восточный Саян) [1, 2]; красными кружками на диаграмме отмечено положение теоретических составов известных природных сплавов меди и золота

**Fig. 4. Triple Cu–Au–Ag plot showing compositions (at. %) of three-component natural gold, copper and silver alloys from various ultramafite massifs:**

1 – apodunite serpentinite of Kyzyr-Burlyuksky massif (Western Sayan); 2 – chromitite of Kharcheruzsky massif (Polar Urals) [16]; 3 – chromitite of the Beni-Buazera arsenide Ni-Co deposit (Morocco) [21]; 4 – rodingite of the Zolotaya Gora gold deposit (Karabashsky massif, South Urals) [9, 20]; 5 – chromitite of Voikaro-Syninsky massif (Polar Urals) [6, 14]; 6 – chromitite and serpentinite of Agardagsky massif (South Tuva) [5]; 7 – mafite-ultramafites of Khurai-Zhalginsky massif (Eastern Sayan) [1, 2]; red circles show position of theoretical compositions of the known natural copper and gold alloys

луанхеита и неназванной фазы (Cu,Ag,Hg), наряду с выявленным здесь же ранее потаритом PdHg [17], вероятно, указывает на то, что их формирование происходило в условиях невысоких температур [11, 22], при проявлении эпигенетических процессов серпентинизации

(низкоградного метаморфизма) за счёт растворов, обогащённых ртутью. Не исключается, что источником таких растворов могли быть внедрившиеся позднее в основное ультрамафитовое тело интрузивы габбрового состава.

## Список литературы

1. Григорьева А. В., Дамдинов Б. Б., Служеникин С. Ф. Рудная минерализация в ультрабазитах и метасоматитах Оспинско-Китойского массива (Восточный Саян) // Геология рудных месторождений. – 2018. – Т. 60, № 2. – С. 141–163.
2. Дамдинов Б. Б. Нетрадиционные типы благороднометалльной минерализации в офиолитах Восточно-Саянского и Джидинского поясов: специальность 25.00.11. «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения»: автореф. дис. на соискание учёного степен. канд. геол.-минерал. наук / Дамдинов Булат Батуевич. – Улан-Удэ: Геологический институт СО РАН, 2004. – 24 с.
3. Жмодик С. М., Миронов А. Г., Жмодик А. С. Золотоконцентрирующие системы офиолитовых поясов (на примере Саяно-Байкало-Муйского пояса). – Новосибирск: Гео, 2008. – 304 с.
4. Кривенко А. П., Подлипский М. Ю., Кубышев А. И., Катанов С. Г. Перспективы хромитонности и платиноносности гипербазитов Верхнеамыльского района в Западном Саяне // Минеральные ресурсы Красноярского края. – Красноярск: РИЦ КНИИГиМС, 2002. – С. 314–324.
5. Кудрявцева А. И., Кудрявцев В. И. Проявление медистого и серебристого золота в благороднометалльном оруденении Южно-Тувинского гипербазитового комплекса // Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. Геоэкология природной среды и общества. – Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2003. – С. 45–48.
6. Кузнецов С. К., Онищенко С. А., Котельников В. Г., Филиппов В. Н. Медно-золото-палладиевая минерализация в ультрабазитах Полярного Урала // Доклады академии наук. – 2007. – Т. 414, № 1. – С. 67–69.
7. Макеев А. Б. Минералогия альпинотипных ультрабазитов Урала. – СПб.: Наука, 1992. – 197 с.
8. Набелкин О. А., Смирнов Д. И., Крапива Л. Я. Микрогубчатый электрум и ртутьсодержащие минералы золота в рудах золото-полиметаллического рудопроявления «Полярная Надежда» на Полярном Урале // Минералогия во всем пространстве сего слова: проблемы укрепления минерально-сырьевой базы и рационального использования минерального сырья: Материалы Годичного собрания РМО и Фёдоровской сессии – 2012. – СПб.: Лема, 2012. – С. 199–200.
9. Новгородова М. И., Цепин А. И., Горшков А. И., Кудревич И. М., Вяльсов Л. Н. Новые данные по кристаллохимии и свойствам природных интерметаллических соединений системы медь – золото // Записки Всесоюзного минералогического общества. – 1977. – Ч. 106, вып. 5. – С. 540–552.
10. Павлов Н. В. Химический состав хромшпинелидов в связи с петрографическим составом пород ультраосновных интрузивов // Труды Геологического института РАН. – 1949. – Вып. 103, № 3. – С. 1–91.
11. Спиридонов Э. М., Орсов Д. А., Арискин А. А., Николаев Г. С., Кислов Е. В., Кортаева Н. Н., Янакурт В. О. Hg- и Cd-содержащие минералы Pd, Pt, Au, Ag сульфидоносных базитов и гипербазитов Йоко-Довыренского интрузива в байкалидах Северного Прибайкалья // Геохимия. – 2019. – Т. 64, № 1. – С. 43–58.
12. Строение, эволюция и минерагения гипербазитового массива Рай-Из / отв. ред. В. Н. Пучков, Д. С. Штейнберг. – Свердловск [Екатеринбург]: УрО АН СССР, 1990. – 228 с.
13. Чернышов А. И., Воробьёва А. В., Юричев А. Н. Петрология Кызыр-Бурлюкского мафит-ультрамафитового массива (северо-восток Западного Саяна) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 8. – С. 199–207.

14. Шайбеков Р. И., Кузнецов С. К., Гайкович М. М., Шевчук С. С. Сульфидная и благороднометалльная минерализация в хромовых рудах Латоргинско-Кершорской площади Войкаро-Сыньинского массива (Полярный Урал) // Литосфера. – 2015. – № 1. – С. 75–85.
15. Юричев А. Н. Акцессорные самородные металлы и их оксиды из массивных хромититов Кемпирсайского ультрамафитового массива (Южный Урал, Казахстан) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 7. – С. 84–92.
16. Юричев А. Н. Акцессорная золото-серебряная минерализация из хромититов Харчерузского ультрамафитового массива (Полярный Урал) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332, № 3. – С. 229–236.
17. Юричев А. Н. Акцессорная благороднометалльная минерализация в ультрамафитах Кызыр-Бурлюкского массива (Западный Саян) // Металлогения древних и современных океанов – 2021. Сингенез, эпигенез и гипергенез. Научное издание. – Миасс : ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 2021. – С. 109–113.
18. Юричев А. Н., Чернышов А. И. Платиноносность хромититов Куртушибинского офиолитового пояса, Западный Саян: новые данные // Записки Российского минералогического общества. – 2019. – Т. 148, № 5. – С. 113–125.
19. Dianxin S., Jianxiong Z., Jianhong Z., Daxi B. Luanheite – a new mineral // Acta Mineral. – Sinica. – 1984. – V. 4. – P. 97–101.
20. Murzin V. V., Chudnenko K. V., Palyanova G. A., Varlamov D. A., Naumov E. A., Pirajno F. Physicochemical model of formation of Cu–Ag–Au–Hg solid solutions and intermetallic alloys in the rodingites of the Zolotaya Gora gold deposit (Urals, Russia) // Ore Geology Reviews. – 2018. – Vol. 93. – P. 81–97.
21. Oen I. S., Kieft C. Nickeline with pyrrhotite and cubanite exsolutions, Ni–Co rich loellingite and an AuCu alloy in Cr–Ni ores from Beni-Bousera, Morocco // Neues Jahrbuch Fur Mineralogie, Monatshefte. – 1974. – P. 1–8.
22. Prichard H. M., Ixer R. A., Lord R. A., Maynard J., Williams N. Assemblages of platinum-group minerals and sulfides in silicate lithologies and chromite-rich rocks within the Shetland ophiolite // The Canadian Mineralogist. – 1994. – Vol. 32. – P. 271–294.
23. Reed S. J. B. Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology. – N. Y. : Cambridge University Press, 2005. – 189 p.

## References

1. Grigor'eva A. V., Damdinov B. B., Sluzhenikin S. F. Rudnaya mineralizatsiya v ul'trabazitakh i metasomatitakh Ospinsko-Kitoiskogo massiva (Vostochnyi Sayan) [Ore mineralization in ultrabasites and metasomatites of the Ospino-Kitoy massif (Eastern Sayan)], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits], 2018, V. 60, No 2, pp. 141–163. (In Russ.).
2. Damdinov B. B. Netraditsionnye tipy blagorodnometall'noi mineralizatsii v ofiolitakh Vostochno-Sayanskogo i Dzhidinskogo pojasov [Unconventional types of noble metal mineralization in ophiolites of the East Sayan and Jida belts: Extended abstract of candidate's thesis], Ulan-Ude, Geologicheskii institut SO RAN Publ., 2004, 24 p.
3. Zhmodik S. M., Mironov A. G., Zhmodik A. S. Zolotokontsentrirovushchie sistemy ofiolitovykh pojasov (na primere Sayano-Baikalo-Muiskogo poiasa) [Gold-centering systems of ophiolite belts (on the example of the Sayano-Baikal-Mui belt)], Novosibirsk, Geo Publ., 2008, 304 p.
4. Krivenko A. P., Podlipskii M. Yu., Kubyshev A. I., Katanov S. G. Perspektivy khromitonosnosti i platinonosnosti giperbazitov Verkhneamyl'skogo raiona v Zapadnom Sayane [Prospects of chromite and platinum-bearing hyperbasites of the Verkhneamyl'sky district in the Western Sayan], Mineral'nye resursy Krasnoyarskogo kraia [Mineral Resources of the Krasnoyarsk Territory], Krasnoyarsk, RITs KNIIGiMS Publ., 2002, pp. 314–324. (In Russ.).
5. Kudryavtseva A. I., Kudryavtsev V. I. Proyavlenie medistogo i serebristogo zolota v blagorodnometall'nom orudenenii Yuzhno-Tuvinskogo giperbazitovogo kompleksa [The manifestation of copper and silver gold in the noble metal mineralization of the South Tuva hyperbasite complex], Sostoyanie i osvoenie prirodnykh resursov Tuvy i sopredel'nykh regionov Tsentral'noi Azii. Geoekologiya prirodnoi

- sredy i obshchestva [The state and development of natural resources of Tuva and adjacent regions of Central Asia. Geocology of the natural environment and society], Kyzyl, TuvIKOPR SO RAN Publ., 2003, pp. 45–48.
6. Kuznetsov S. K., Onishchenko S. A., Kotel'nikov V. G., Filippov V. N. Medno-zoloto-palladievaya mineralizatsiya v ul'trabazitakh Polyarnogo Urala [Copper-gold-palladium mineralization in ultrabasites of the Polar Urals], *Doklady Akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*, 2007, V. 414, No 1, pp. 67–69. (In Russ.).
  7. Makeev A. B. Mineralogiya al'pinotipnykh ul'trabazitov Urala [Mineralogy of alpine-type ultrabasites of the Urals], St. Petersburg, Nauka Publ., 1992, 197 p.
  8. Nabelkin O. A., Smirnov D. I., Krapiva L. Ya. Mikrosubchatyi elektrum i rtut'soderzhashchie mineraly zolota v rudakh zoloto-polimetallicheskogo rudoproyavleniya "Polyarnaya Nadezhda" na Polyarnom Urale [Microgubbed electrum and mercury-containing gold minerals in the ores of the gold-polymetallic ore occurrence "Polar Hope" in the Polar Urals], *Mineralogiya vo vsem prostranstve sego slova: problemy ukrepleniya mineral'no-syr'evoi bazy i ratsional'nogo ispol'zovaniya mineral'nogo syr'ya: Materiali Godichnogo sobraniya RMO i Fedorovskoi sessii – 2012 [Mineralogy in the whole space of this word: problems of strengthening the mineral resource base and rational use of mineral raw materials: Materials of the Annual Meeting of the RMO and the Fedorov session – 2012]*, St. Petersburg, Lema Publ., 2012, pp. 199–200.
  9. Novgorodova M. I., Tsepin A. I., Gorshkov A. I., Kudrevich I. M., Vyal'sov L. N. Novye dannye po kristallokhimii i svoistvam prirodnykh intermetallicheskiikh soedinenii sistemy med' – zoloto [New data on crystal chemistry and properties of natural intermetallic compounds of the copper – gold system], *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva [Notes of the All-Union Mineralogical Society]*, 1977, V. 106, I. 5, pp. 540–552. (In Russ.).
  10. Pavlov N. V. Khimicheskii sostav khromshpinelidov v svyazi s petrograficheskim sostavom porod ul'traosnovnykh intruzivov [Chemical composition of chrome spinelides in connection with the petrographic composition of ultrabasic intrusive rocks], *Trudy Geologicheskogo instituta RAN [Proceedings of the Geological Institute of the Russian Academy of Sciences]*, 1949, V. 103, No 3, pp. 1–91. (In Russ.).
  11. Spiridonov E. M., Orsoev D. A., Ariskin A. A., Nikolaev G. S., Kislov E. V., Korotaeva N. N., Yapa-skurt V. O. Hg- i Cd-soderzhashchie mineraly Pd, Pt, Au, Ag sul'fidonosnykh bazitov i giperbazitov Ioko-Dovyrenskogo intruziva v baikalidakh Severnogo Pribaikal'ya [Hg- and Cd-containing minerals Pd, Pt, Au, Ag of sulfide-bearing basites and hyperbasites of the Yoko-Dovyren intrusive in the Baikal rocks of the Northern Baikal region], *Geokhimiya [Geochemistry International]*, 2019, V. 64, No 1, pp. 43–58. (In Russ.).
  12. Stroenie, evolyutsiya i minerageniya giperbazitovogo massiva Rai-Iz [Structure, evolution and minerageny of the Rai-Izz hyperbasite massif], Sverdlovsk, UrO AN SSSR Publ., 1990, 228 p.
  13. Chernyshov A. I., Vorob'eva A. V., Yurichev A. N. Petrologiya Kyzyr-Burlyukskogo mafit-ul'tramafitovogo massiva (severo-vostok Zapadnogo Sayana) [Petrology of the Kyzyr-Burluk mafic-ultramafic massif (northeast of Western Sayan)], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]*, 2020, V. 331, No 8, pp. 199–207. (In Russ.).
  14. Shaibekov R. I., Kuznetsov S. K., Gaikovich M. M., Shevchuk S. S. Sul'fidnaya i blagorodnometall'naya mineralizatsiya v khromovykh rudakh Latorginsko-Kershorskoi ploshchadi Voikaro-Syn'inskogo massiva (Polyarnyi Ural) [Sulfide and precious metal mineralization in chrome ores of Latorginsko-Kershorskaya area of Voikaro-Syn'yinsky massif (Polar Urals)], *Litosfera [Lithosphere]*, 2015, No 1, pp. 75–85. (In Russ.).
  15. Yurichev A. N. Aktsessornye samorodnye metally i ikh oksidy iz massivnykh khromititov Kempirsaiskogo ul'tramafitovogo massiva (Yuzhnyi Ural, Kazakhstan) [Accessory native metals and their oxides from massive chromitites of the Kempirsai ultrabasic massif (Southern Urals, Kazakhstan)], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]*, 2019, V. 330, No 7, pp. 84–92. (In Russ.).
  16. Yurichev A. N. Aktsessornaya zoloto-serebryanaya mineralizatsiya iz khromititov Kharcheruzskogo ul'tramafitovogo massiva (Polyarnyi Ural) [Accessory gold-silver mineralization from chromitites of the Kharcheruz ultramafic massif (Polar Urals)], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Poly-*

- technic University. Geo Assets Engineering*], 2021, V. 332, No 3, pp. 229–236. (In Russ.).
17. Yurichev A. N. *Aktsessornaya blagorodnometalnaya mineralizatsiya v ul'tramafitakh Kyzyr-Burlyukского massiva (Zapadnyi Sayan) [Accessory noble-metal mineralization in ultramafic rocks of the Kyzyr-Burliuk massif (Western Sayan)]*, *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov – 2021. Singenez, epigenez i gipergenez. Nauchnoe izdanie [Metallogeny of ancient and modern oceans – 2021. Syngeneses, epigenesis and hypergenesis. Scientific publication]*, Miass, YuU FNTs MiG UrO RAN Publ., 2021, pp. 109–113.
  18. Yurichev A. N., Chernyshov A. I. *Platinonosnost' khromititov Kurtushibinskogo ofiolitovogo poyasa, Zapadnyi Sayan: novye dannye [Platinum-bearing chromitites of the Kurtushibinsky ophiolite belt, Western Sayan: new data]*, *Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva [Notes of the Russian Mineralogical Society]*, 2019, V. 148, No 5, pp. 113–125. (In Russ.).
  19. Dianxin S., Jianxiong Z., Jianhong Z., Daxi B. *Luanheite – a new mineral*, *Acta Mineral, Sinica*, 1984, V. 4, pp. 97–101.
  20. Murzin V. V., Chudnenko K. V., Palyanova G. A., Varlamov D. A., Naumov E. A., Pirajno F. *Physicochemical model of formation of Cu–Ag–Au–Hg solid solutions and intermetallic alloys in the rodingites of the Zolotaya Gora gold deposit (Urals, Russia)*, *Ore Geology Reviews*, 2018, V. 93, pp. 81–97.
  21. Oen I. S., Kieft C. *Nickeline with pyrrhotite and cubanite exsolutions, Ni–Co rich loellingite and an AuCu alloy in Cr–Ni ores from Beni-Bousera, Morocco*, *Neues Jahrbuch Fur Mineralogie, Monatshefte*, 1974, pp. 1–8.
  22. Prichard H. M., Ixer R. A., Lord R. A., Maynard J., Williams N. *Assemblages of platinum-group minerals and sulfides in silicate lithologies and chromite-rich rocks within the Shetland ophiolite*, *The Canadian Mineralogist*, 1994, V. 32, pp. 271–294.
  23. *Reed S. J. B. Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*, N. Y., Cambridge University Press, 2005, 189 p.

## Автор

**Юричев Алексей Николаевич**

кандидат геолого-минералогических наук  
доцент, старший научный сотрудник  
juratur@sibmail.com

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский  
государственный университет», г. Томск

## Author

**Yurichev Alexey Nikolaevich**

PhD  
Associate Professor, senior researcher  
juratur@sibmail.com

Tomsk State University,  
Tomsk, Russia

## Повышение эффективности флотации апатит-штаффелитовых руд с применением режима двухстадиального сгущения шламов

### Apatite-staffelite ore flotation efficiency improvement using two-stage slurry thickening

Морозов В. В., Поливанская В. В.

Morozov V. V., Polivanskaya V. V.

Проведёнными исследованиями показано, что причиной потерь  $P_2O_5$  при обогащении апатит-штаффелитовых руд (АШР) является неселективная флокуляция тонких классов в процессе флотации. В условиях применения сильных флокулянтов необходима специальная подготовка сгущённых шламов к операции флотации, обеспечивающая их дефлокуляцию перед процессом флотации. Разработаны схема и режим подготовки тонких классов к процессу флотации, включающие сгущение сливов классификации с применением сильных анионных флокулянтов и дефлокуляцию сгущённого продукта перед процессом флотации реагентами-диспергаторами, используемыми в базовом режиме флотации. Предложен режим подготовки шламов АШР руд к флотации, включающий сгущение сливов операции классификации с применением анионного флокулянта «Праестол-2540», кондиционирование сгущённого продукта с добавками жидкого стекла и каустической соды в соотношении 1 : 1, разбавление и повторное сгущение дефлокулированных шламов, объединение и флотацию сгущённых шламов и песков. Укрупнёнными лабораторными испытаниями показано, что применение разработанного режима обеспечивает суммарное увеличение извлечения  $P_2O_5$  из руды с 70,1 до 71,5 % при повышении содержания  $P_2O_5$  в апатитовом концентрате с 37,1 до 37,8 %, что делает разработанную технологию перспективной для переработки труднообогатимых АШР на Ковдорском ГОКе.

Ключевые слова: штаффелит, апатит, шламовые классы, сгущение, флокуляция, реагенты-диспергаторы, дефлокуляция, флотация.

The studies were performed suggesting that the cause of  $P_2O_5$  losses during apatite-staffelite ores (ASO) treatment are due to non-selective flocculation of fine classes during flotation. When using strong flocculants, special preparation of condensed slurries is necessary, ensuring their deflocculation before the flotation process. A scheme and mode of preparation of fine classes for the flotation process have been developed, including thickening of the classification overflows using strong anionic flocculants and deflocculation of the thickened product before the flotation process with reagents-dispersants used in the basic flotation mode. A mode of preparation of slimes of ASO ores for flotation is proposed, including thickening of the discharge of the classification operation using the anionic flocculant "Praestol-2540", conditioning of the condensed product with additions of liquid glass and caustic soda in a ratio of 1 : 1, dilution and re-thickening of deflocculated slimes, consolidation and flotation thickened sludge and sand. The big laboratory tests have shown that the application of the developed regime provides a total increase in the extraction of  $P_2O_5$  from ore from 70,1 to 71,5 % with an increase in the  $P_2O_5$  content in apatite concentrate from 37,1 to 37,8 %, which makes the developed technology promising for processing refractory ASO at Kovdorsky GOK.

Keywords: staffelite, apatite, sludge classes, thickening, flocculation, dispersant reagents, deflocculation, flotation.

Для цитирования: Морозов В. В., Поливанская В. В. Повышение эффективности флотации апатит-штаффелитовых руд с применением режима двухстадиального сгущения шламов. Руды и металлы. 2021. № 4. С. 121–131. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10032.

For citation: Morozov V. V., Polivanskaya V. V. Apatite-staffelite ore flotation efficiency improvement using two-stage slurry thickening. Ores and metals, 2021, № 4, pp. 121–131. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10032.

Апатит-штаффелитовые руды (АШР) являются важным источником производства апатитового концентрата на Ковдорском ГОКе [1]. Однако эффективность обогащения апатит-штаффелитовых руд не достигает плановых показателей, что обусловлено значительными потерями апатита и штаффелита с тонкими классами [13, 14]. Для более полного извлечения фосфатных минералов применяется технология сгущения и флотации шламов с использованием сильных флокулянтов класса полиакриламидов [10, 15]. Применение сильных флокулянтов дало положительный эффект при обогащении лежалых хвостов Ковдорского ГОКа [7], но их использование при обогащении желваковых и апатит-штаффелитовых руд сопровождается существенным снижением эффективности флотации [2, 8]. Причиной потерь тонких классов фосфатных минералов при флотации является их неселективная флокуляция с тонкими классами породообразующих минералов, протекающая в операциях сгущения и непосредственно в флотационных машинах [8].

Повышение эффективности флотации шламовых классов фосфатных минералов достигается созданием условий для дефлокуляции сгущенного продукта и условий для последующей селективной флокуляции [4, 11]. Для решения поставленной задачи применяют несколько реагентов-диспергаторов, включая силикат натрия, фосфорную кислоту, органические полимеры [5, 12, 16].

Задача настоящих исследований – разработка схем и режимов подготовки шламовых классов АШР к флотации с использованием сильных флокулянтов и операции дефлокуляции сгущенного продукта реагентами-диспергаторами, используемыми в базовом режиме флотации.

*Характеристика труднообогатимых апатит-штаффелитовых руд.* По механическим свойствам АШР Ковдорского месторождения подразделяют на каменистые и рыхлые. Каменистые АШР имеют среднюю плотность  $2600 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент крепости по Протодьяконову 4–6, естественную влажность 7 %; относятся к хорошо обогатимым. Рыхлые руды

характеризуются пониженной плотностью ( $\sim 2300 \text{ кг/м}^3$ ), меньшей прочностью (коэффициент крепости по Протодьяконову равен 2–3) и повышенной влажностью (12 %). Наиболее труднообогатимая часть руд – тонкие классы (крупность  $-0,02 \text{ мм}$ ). В них преобладают штаффелит (33–38 %), апатит (24–28 %), вермикулит (20–24 %). Шламовые классы массивных руд (класс  $-0,02 \text{ мм}$ ) по содержанию  $\text{P}_2\text{O}_5$  на 12–15 % богаче, чем более крупные классы. Шламовые классы рыхлых измельченных руд по содержанию  $\text{P}_2\text{O}_5$  и минеральному составу близки к рудной массе в целом.

Штаффелит обладает сниженной флотиремостью по сравнению с апатитом (на 3–8 %), при этом мелкие классы штаффелита из рыхлых апатит-штаффелитовых руд флотируются особенно слабо. Извлечение апатита из рыхлых АШР на 3–5 % ниже, чем из массивных руд. Это объясняется, в первую очередь, тем, что тонкие классы апатита и штаффелита появились при измельчении минеральных образований, характеризующихся существенными гипергенными изменениями, произошедшими в рудах [2, 3].

Отличительная особенность труднообогатимых АШР Ковдорского месторождения заключается в присутствии большого количества шламов. Результаты промышленного опробования показывают, что в исходной дроблёной руде крупностью  $-25 \text{ мм}$  содержание класса  $-0,04 \text{ мм}$  составляет до 15 %. Вторичные шламы, образовавшиеся в процессе рудоподготовки, имеют повышенное содержание  $\text{P}_2\text{O}_5$ , составляющее 18,1–26,4 % (табл. 1). Из результатов анализа гранулометрического состава и содержания  $\text{P}_2\text{O}_5$  в апатитовом концентрате видно, что тонкие классы АШР извлекаются слабо и существенно снижают качество концентрата (табл. 2).

Представленные результаты обосновывают важность задачи, решаемой в настоящей работе, нацеленной на выбор режимов, обеспечивающих повышение показателей сгущения и флотации шламовых классов АШР.

*Методики исследований.* Для исследования процессов сгущения шламовых продуктов использовалась установка, обеспечиваю-

щая механическое перемешивание и последующее отстаивание пульпы одновременно в шести цилиндрах, что позволяет определить скорость осаждения шламовых продуктов по границе осветлённой зоны. В ходе эксперимента в водную фазу при перемешивании добавляли реагент-флокулянт, затем мешалку выключали, извлекали её из цилиндра и проводили сгущение слива с контролем границы осветлённой области [9].

При исследовании влияния реагентов-диспергаторов в добавляемую после первичного сгущения и отделения слива водную фазу подавали реагенты-диспергаторы. Дефлокуляция и повторное сгущение шламов осуществлялись в тех же цилиндрах после удаления водной фазы с избытком флокулянта, добавления водной фазы с реагентами-диспергаторами и механического перемешивания. Затем, после извлечения мешалки, проводили процесс повторного сгущения, водную фазу отделяли таким образом, чтобы плотность сгущённого продукта соответствовала требованиям флотации. Отделённая водная фаза, содержащая реагенты-диспергаторы, осветлялась в сгустителе и повторно подавалась в режиме замкнутого водооборота в операцию дефлокуляции сгущённого продукта или в операцию фло-

**Табл. 1. Гранулометрический состав и распределение  $P_2O_5$  по классам крупности вторичных шламов рыхлых АШР**

Table 1. Granulometric composition and  $P_2O_5$  distribution by size classes by size classes of secondary sludge of loose ASO

Классы крупности, мм	Выход, %	Содержание $P_2O_5$ , %	Распределение $P_2O_5$ , %
+0,05	4,9	18,1	3,7
-0,05...+0,032	6,0	19,6	2,4
-0,032...+0,020	3,7	12,4	1,9
-0,020...+0,010	21,4	26,2	22,5
-0,010...+0,005	21,3	26,4	22,7
-0,005	42,7	24,6	45,2
Итого	100,0	23,9	100,0

тации. Сгущённый продукт далее объединялся с песковым продуктом, в них подавались флотационные реагенты и проводился процесс флотации.

Лабораторные исследования обогатимости АШР с применением технологии последовательного сгущения и флотации шламов производились на промышленных продуктах схе-

**Табл. 2. Ситовая характеристика апатитового концентрата флотации АШР и показатели обогатимости классов крупности рыхлых руд**

Table 2. Sieve characteristics of apatite concentrate made by ASO flotation and washability indices of loose ores' size classes

Классы крупности, мм	Доля класса крупности в концентрате, %	Содержание $P_2O_5$ в классе крупности руды, %	Содержание $P_2O_5$ в классе крупности концентрата, %	Извлечение $P_2O_5$ по классу крупности, %
+0,1	32,2	23,3	36,5	69,3
-0,1...+0,074	20,1	24,9	38,9	71,3
-0,074...+0,040	9,2	26,7	42,7	73,4
-0,040...+0,020	8,7	22,5	42,6	68,9
-0,020...+0,010	9,6	22,2	32,2	47,4
-0,010	8,8	22,5	24,6	38,2
-0,05	11,4	16,4	21,3	24,3
Итого	100,0	22,9	34,9	65,6

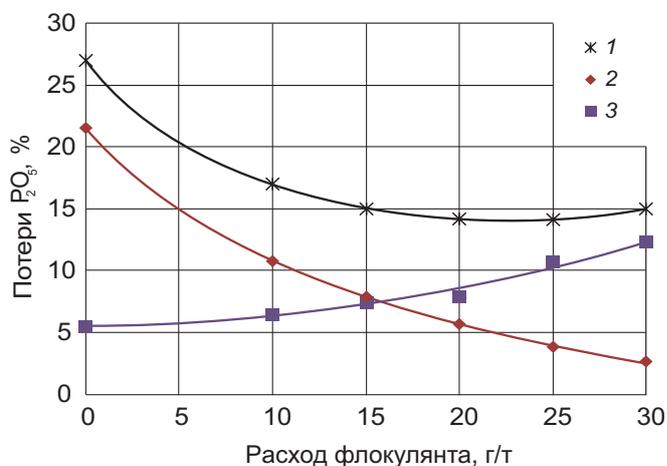
мы переработки, включающей операции дробления, отмывки и классификации руды с удалением первичных шламов, измельчения, классификации, сгущения вторичных шламов, флотации [3, 6]. В ходе замкнутых опытов измельчённая апатит-штаффелитовая руда после операции магнитной сепарации подвергалась доизмельчению и обесшламливанию. Пески классификации поступали на песковую флотацию, шламовый продукт направлялся на сгущение и шламовую флотацию. По альтернативной схеме использовалась схема объединённой флотации песков и шламов. Цикл флотации включал основную, перечистную и контрольную операции. Промпродукты схемы разделяли на концентрат и хвосты, которые объединялись с соответствующими продуктами основной схемы. В качестве реагентов-диспергаторов и одновременно депрессоров пустой породы использовали каустическую соду (расход 300 г/т) и жидкое стекло (расход 300 г/т). В качестве собирателя применяли омыленную ЖКТМ (жирнокислотную фракцию талового масла) (расход 350 г/т), в качестве регулятора вспенивания – реагент М-246 (расход 150 г/т).

При лабораторных исследованиях шламовый продукт сгущали с добавлением флокулянта в радиальном сгустителе, слив отправляли в дренаж. Сгущённый продукт разбавляли оборотной водой шламового цикла, направляли на кондиционирование с реагентами-диспергаторами и разделяли на сгущённый продукт и слив. Сгущённый продукт направляли на флотацию, слив повторного сгущения – на отстаивание; очищенная оборотная вода подавалась для разбавления сгущённых шламов первой стадии сгущения (в замкнутых опытах) и на флотацию.

*Результаты исследования и их обсуждение.* Для выбора оптимальных режимов были поставлены опыты по сгущению и флотации сгущённого шламового класса. Схема опыта включала последовательные операции сгущения шламового класса, полученного в результате классификации измельчённой руды, с применением сильных анионных флокулянтов «Праестол-2530» и «Праестол-2540» и его

флотации с использованием реагентного режима, близкого к режиму флотации измельчённой АШР по проектной схеме переработки. Флотационные опыты на сгущённой пробе шламов показали: зависимости суммарных потерь  $P_2O_5$  от расхода флокулянта в операции сгущения имеют выраженный минимум, что обусловлено возрастанием потерь фосфатных минералов во флотации как при повышении, так и при снижении расхода флокулянта (рис. 1). При расходе флокулянтов «Праестол-2530» и «Праестол-2540» более 15 г/т наблюдается заметное снижение содержания  $P_2O_5$  в апатитовом концентрате (рис. 2).

Снижение качества концентрата, как и увеличение потерь  $P_2O_5$  при повышенных расходах флокулянта, связаны с возрастающей интенсивностью вторичной неселективной флокуляции, протекающей непосредственно во флотационном процессе.

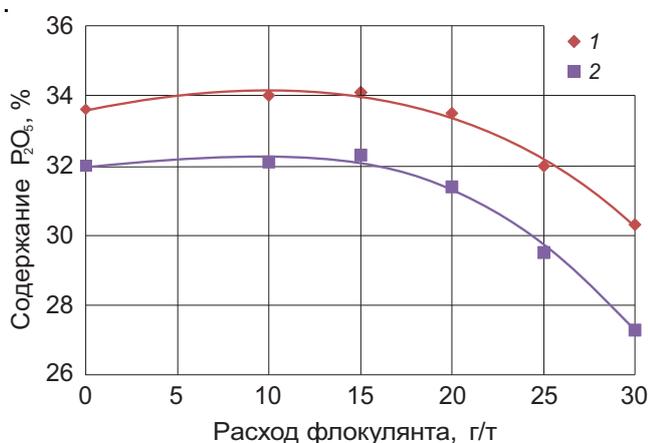


**Рис. 1. Зависимость потерь  $P_2O_5$  при сгущении и флотации шламов от расхода флокулянта «Праестол-2540»:**

1 – общие потери; 2 – потери в операции сгущения; 3 – потери в операции флотации

**Fig. 1. Dependence of  $P_2O_5$  losses during slurry thickening and flotation on “Praestol-2540” consumption:**

1 – total losses; 2 – thickening losses; 3 – flotation losses



**Рис. 2. Зависимость содержания P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> в концентрате при флотации шламов АШР от расхода флокулянтов:**

1 – «Праестол-2530»; 2 – «Праестол-2540»

**Fig. 2. Dependence of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> content in concentrate during ASO sludge flotation on flocculant consumption:**

1 – “Praestol-2530”; 2 – “Praestol-2540”

Для выбора режима сгущения с минимальными потерями тонких классов фосфатных минералов были поставлены седиментационные опыты. Результаты осаждения проб шламов при использовании флокулянта «Праестол-2530» показали, что скорость осаждения, отождествляемая со скоростью увеличения высоты осветлённого слоя, возрастает с повышением расхода как при первичном, так и при вторичном осаждении. Для АШР эффект вторичной флокуляции шламов весьма устойчив и появляется не только при первичном разбавлении сгущённых шламов, но и при последующем (вторичном и третичном) их разбавлении и осаждении.

Эффективность сгущения шламов АШР оценивалась с использованием кинетического показателя флокуляции  $D$ , предложенного в работе [4]:

$$D = \frac{V_{\text{осажд}}^{\text{фл}} - V_{\text{осажд}}^{\circ}}{V_{\text{осажд}}^{\circ}} = \frac{h_{\text{осв}}^{\text{фл}} - h_{\text{осв}}^{\circ}}{h_{\text{осв}}^{\circ}},$$

где:  $V_{\text{осажд}}^{\text{фл}}$  и  $V_{\text{осажд}}^{\circ}$  – скорость осаждения твёрдого при использовании флокулянта и в контрольном опыте (м/с);  $h_{\text{осв}}^{\text{фл}}$  и  $h_{\text{осв}}^{\circ}$  – высота

осветлённого слоя жидкости (м) при использовании флокулянта и в контрольном опыте.

Показатель флокуляции рассчитывали для начальных участков сравниваемых кривых осаждения (для первых 60 с). Оценка интенсивности вторичной флокуляции проводилась сравнением показателя флокуляции  $D$  при повторном и первичном сгущении шламов.

Анализ результатов опытов по сгущению шламов АШР показал, что максимальная скорость осаждения достигается при расходе флокулянтов более 25 г/т шлама (табл. 3). При таком расходе флокулянта показатель флокуляции  $D$  достигает максимума.

При использовании выбранных флокулянтов был получен сгущённый материал высокой плотности (с содержанием твёрдого до 45 %). Сравнение результатов выявило, что интенсивность первичного сгущения тонких классов АШР при применении флокулянта «Праестол-2540» на 5–8 % выше, чем при использовании «Праестол-2530». Скорость вторичной флокуляции при использовании более сильного флокулянта «Праестол-2540» существенно выше, чем при применении «Праестол-2530» (см. табл. 3), что, с одной стороны, подтверждает вывод о его большей эффективности, а с другой – говорит о более интенсивном протекании процесса неселективной вторичной флокуляции и вероятном снижении показателей флотации.

По полученным результатам флокулянт «Праестол-2540» был выбран для применения в операции сгущения шламов цикла измельчения АШР. Для повышения извлечения P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и качества концентрата была поставлена задача снижения интенсивности вторичной флокуляции и, в оптимальном варианте, обеспечения протекания селективной флокуляции шламов. Такой результат может быть достигнут при использовании реагентов-диспергаторов [11].

На начальном этапе исследовалось влияние реагентов-диспергаторов на вторичную флокуляцию шламов при флотации. Методика эксперимента предполагала подачу в сгущённый продукт перед флотацией реагентов-диспергаторов.

**Табл. 3. Значения показателя флокуляции  $D$  процессов седиментации шламовых классов при использовании флокулянта**

Table 3. Values of flocculation index  $D$  for sludge classes sedimentation in flocculant use

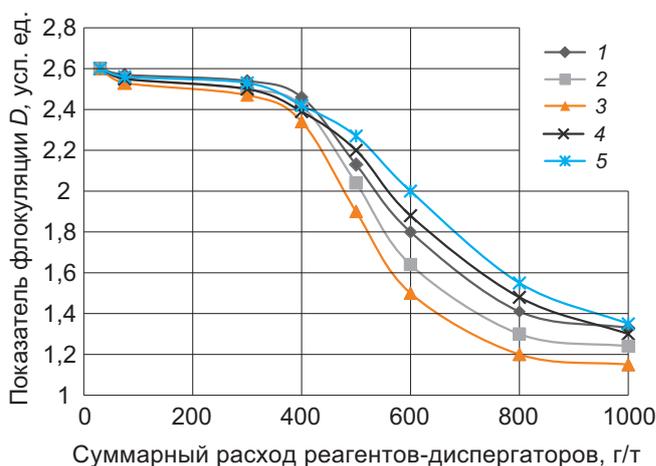
Расход флокулянта, г/т	«Праестол-2530»		«Праестол-2540»	
	Первичное сгущение	Вторичная флокуляция	Первичное сгущение	Вторичная флокуляция
0	1	1,3	1	1,3
5	2,2	1,6	2,4	1,7
10	2,7	1,9	2,8	1,95
15	3,5	2,4	3,7	2,35
20	3,7	2,6	3,9	2,5
25	3,6	2,8	3,75	2,7
30	3,4	2,9	3,5	2,85

С учётом ранее выполненных исследований [7] в качестве реагентов испытывалась смесь жидкого стекла и каустической соды (NaOH). Конкретной задачей было определение оптимальных соотношений реагентов-диспергаторов. Результаты экспериментов показали, что наиболее сильным диспергирующим свойством, оцениваемым по значению показателя флокуляции  $D$ , обладает смесь жидкого стекла и каустической соды при доле компонентов от 40 до 60 % весовых (рис. 3, кривые 2–4).

Данные исследований позволили рекомендовать смесь жидкого стекла и каустической соды в соотношении близком 1 : 1 для дефлокуляции сгущённого продукта и устранения эффекта вторичной флокуляции шламов АШР в операции флотации. Эффект от использования смеси реагентов-диспергаторов превышает эффективность отдельно взятых реагентов при том же общем расходе. Синергетический эффект связан с переводом жидкого стекла в ионную форму ( $\text{HSiO}_3^-$  и  $\text{SiO}_3^{2-}$ ), характеризующуюся высокой химической активностью по отношению к поверхности сульфидных минералов.

Анализ зависимости (см. рис. 3) показал, что реагентную обработку для дефлокуляции шламов необходимо проводить при суммарном расходе реагентов-диспергаторов 600–800 г/т. Однако столь высокая концентрация диспергаторов, обладающих свойствами депрессоров

по отношению к фосфатным минералам, не позволяет их эффективно флотировать. Результаты опробования демонстрируют, что фосфатные минералы хорошо извлекаются в концентрат, если суммарная концентрации жидкого стекла и каустической соды во флотационной пульпе не превышает 300–400 мг/л [7,



**Рис. 3. Зависимость показателя  $D$  для вторичной флокуляции шламов от доли жидкого стекла в смеси диспергаторов:**

1 – 70 %; 2 – 60 %; 3 – 50 %; 4 – 40 %; 5 – 30 %

Fig. 3. Dependences of  $D$  index for secondary slurry flocculation on liquid glass proportion in the dispersant mixture:

1 – 70 %; 2 – 60 %; 3 – 50 %; 4 – 40 %; 5 – 30 %

10]. Поэтому необходимо разбавлять питание шламовой флотации водой или смешивать шламовый продукт с другим продуктом.

Для предотвращения депрессии фосфатных минералов при флотации был использован двухстадиальный режим сгущения шламов, предусматривающий кондиционирование шламовых классов с последовательной подачей сильного флокулянта «Праестол-2540», удаление слива, добавление реагентов-диспергаторов (жидкое стекло + каустическая сода в соотношении 1 : 1), вторую стадию сгущения и объединённую флотацию песковой и шламовой частей исходного питания. Слив второй стадии сгущения после отстаивания направлялся в разбавление сгущённого шлама и на флотацию. Согласно выбранной схеме песковый и шламовый продукты после объединения обрабатывали собирателем и регулятором (ЖКТМ и Неонол). В перечистные операции дополнительно подавали жидкое стекло, в контрольные – собиратель ЖКТМ.

При объединении сгущённых шламов и пескового продукта суммарная концентрация каустической соды и жидкого стекла в водной фазе уменьшилась до 300–400 мг/л, что обе-

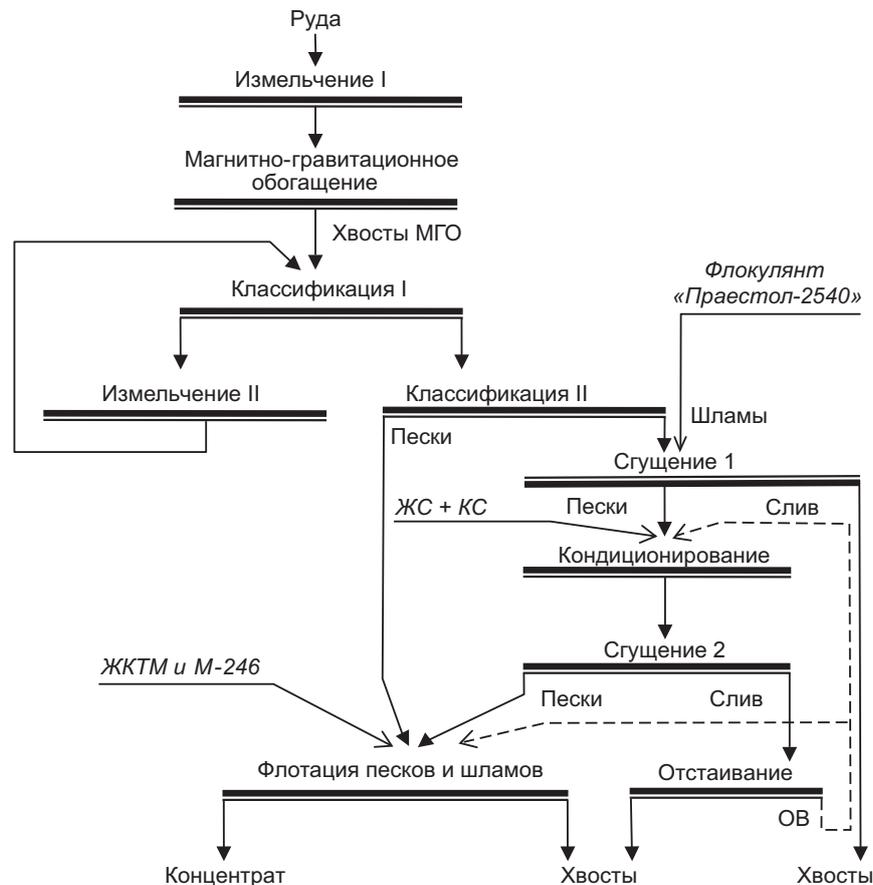
спечило эффективное подавление флотации порообразующих минералов при устойчивой флотации апатита и штаффелита. Таким образом, предложенные схемы и режим подготовки шламов к флотации позволяют, с одной стороны, применить эффективные флокулянты и уменьшить потери фосфатных минералов со сливами операции сгущения, а с другой – предотвратить снижение показателей за счёт неселективной флокуляции тонких классов фосфатных минералов и порообразующих минералов непосредственно в процессе флотации.

Предложенный двухстадиальный режим кондиционирования шламового класса перед флотацией был апробирован в лабораторных условиях в открытых опытах с контролем кинетики флотации. Расход применяемых флокулянта «Праестол-2540» – 20 г/т, реагентов-диспергаторов (каустической соды и жидкого стекла) – по 200 г/т. Результаты экспериментов (табл. 4) показывают, что применение двухстадиального режима сгущения с операцией дефлокуляции сгущённых шламов позволяет существенно увеличить скорость флотации фосфатных минералов и их извлечение, при-

**Табл. 4. Сравнение показателей флотации измельчённых АШР при использовании одностадиального и двухстадиального режимов кондиционирования сгущённых шламов**

Table 4. Comparison of crushed ASO flotation indices in using one-stage and two-stage conditioning modes for thickened slurries

Режим флотации	Класс крупности, мм					
	+ 0,1	+0,074...-0,1	+0,044...-0,074	+0,010...-0,044	-0,010	Среднее
<i>Константа скорости флотации</i>						
Одностадиальный режим сгущения шламов	0,110	0,116	0,130	0,091	0,034	0,110
Двухстадиальный режим сгущения шламов	0,113	0,122	0,131	0,093	0,064	0,124
<i>Извлечение <math>P_2O_5</math> в концентрат флотации, %</i>						
Одностадиальный режим сгущения шламов	91,4	93,5	94,7	83,3	52,4	86,56
Двухстадиальный режим сгущения шламов	91,5	93,7	95,2	87,9	76,5	89,12



**Рис. 4. Схема измельчения и флотации АШР с двухстадийным циклом сгущения шламов:** ЖС – жидкое стекло; КС – каустическая сода; ЖКТМ – жирнокислотная фракция талового масла; ОВ – оборотная вода

**Fig. 4. Scheme of ASO grinding and flotation involving two-stage slurry thickening cycle:**

ЖС – liquid glass; КС – caustic soda; ЖКТМ – tall oil fatty acid fraction; ОВ – recycled water

чём в наибольшей степени – для шламового класса -0,01 мм.

Причина улучшения показателей флотации – разрушение неселективных флокул апатитовых минералов с минералами пустой породы и реализация процесса селективной флокуляции, позволяющей вывести из процесса часть шламовых классов породообразующих минералов на второй стадии сгущения.

Укрупнённые лабораторные исследования режима подготовки шламовых классов измельчённых АШР к флотации проводились по замкнутой схеме, включающей процессы измельчения, классификации, сгущения и флотации. Выделенный в операции классифика-

ции шламовый продукт поступал на операцию сгущения с применением флокулянта «Праестол-2540». Сгущённые шламы с содержанием твёрдого 48 % разбавлялись до 35 % тв. и подвергались кондиционированию с реагентами-диспергаторами при расходе жидкого стекла 400 г/т и каустической соды 400 г/т шламов, повторно сгущались в радиальном сгустителе и направлялись на флотацию.

Слив сгустителя второй стадии содержит бедный по  $P_2O_5$  шламовый продукт (15,4 %), направление которого на флотацию нецелесообразно. Водная фаза слива содержит повышенные концентрации жидкого стекла и оксида натрия (500–600 мг/л), что позволяет

**Табл. 5. Результаты укрупнённых лабораторных исследований по флотации АШР с применением сгущения и дефлокуляции шламов**

Table 5. Laboratory study results for ASO flotation using slurry thickening and deflocculation

Схема измельчения и флотации	Извлечение $P_2O_5$ в концентрат, %	Содержание $P_2O_5$ в концентрате, %
Со сгущением шламов и совмещённой флотацией песков и шламов	70,1	37,1
С двухстадиальным сгущением шламов и совмещённой флотацией песков и шламов	71,5	37,8

использовать её после отстаивания в режиме замкнутого водооборота в технологическом процессе для разбавления сгущённых шламов и в цикле флотации (рис. 4).

В качестве реагентов-диспергаторов использовали каустическую соду и жидкое стекло при расходе 300 и 300 г/т соответственно. В качестве собирателя применяли омыленную ЖКТМ при расходе 350 г/т. Для регулирования вспенивания подавали реагент М-246 (150 г/т). Результаты укрупнённых лабораторных исследований, представленные в табл. 5, показали эффективность разработанного режима подготовки шламового класса АШР к флотации, который позволил повысить извле-

чение  $P_2O_5$  на 1,4 % и получить качественный концентрат (37,8 %  $P_2O_5$ ).

Полученные при укрупнённых испытаниях технологические результаты оказались выше, чем в исходной схеме, как по извлечению  $P_2O_5$ , так и по качеству концентрата, что послужило основанием того, чтобы рекомендовать разработанный режим подготовки измельчённых АШР к флотации для промышленного освоения.

**Выводы.** Проведённые исследования доказали, что применение сильных флокулянтов требует специальной подготовки сгущённых шламов к операции флотации, обеспечивающей комбинирование операций сгущения и дефлокуляции в целях разрушения неселективных агрегатов фосфатных и породообразующих минералов. Предложен режим подготовки шламов АШР к флотации, включающий сгущение сливов операции классификации с применением флокулянта «Праестол-2540», кондиционирование сгущённого продукта с добавками жидкого стекла и каустической соды в соотношении 1 : 1, разбавление и повторное сгущение дефлокулированных шламов, флотацию объединённого пескового и шламового продуктов, возврат водной фазы слива повторного сгущения в технологический процесс. Укрупнёнными лабораторными испытаниями показана эффективность применения разработанного режима, который обеспечивает суммарное увеличение извлечения  $P_2O_5$  из руды с 70,1 до 71,5 % при повышении массовой доли  $P_2O_5$  с 37,1 до 37,8 %, что делает разработанную технологию перспективной для переработки труднообогатимых АШР Ковдорского месторождения.

### Список литературы

1. Белобородов В. И., Захарова И. Б., Андронов Г. П. Перспективы развития фосфорсодержащей минерально-сырьевой базы ОАО «Ковдорский ГОК» // Горный журнал. – 2010. – № 9. – С. 73–77.
2. Лыгач А. В., Игнаткина В. А., Лыгач В. Н. Новые технологии переработки фосфорсодержащих руд // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 1. – С. 345–359.
3. Михайлова А. В., Гараничев Я. В. Исследования флотации апатита из руды Ковдорского месторождения // Горный журнал. – 2010. – № 10. – С. 42–44.
4. Небера В. П. Флокуляция минеральных суспензий. – М. : Недра, 1983. – 288 с.

5. Пестряк И. В. Обоснование и разработка эффективных методов кондиционирования оборотных вод обогатительных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. № 7. – С. 153–159.
6. Поливанская В. В., Морозов В. В. Повышение эффективности флотации апатит-штаффелитовых руд путём регулирования агрегативной устойчивости шламов // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXIII Международной научно-технической конференции, проводимой в рамках XVI Уральской горнопромышленной декады. – 2018. – С. 109–112.
7. Поливанская В. В., Морозов В. В., Сименел А. А. Повышение эффективности флотации фосфатных руд на основе регулирования агрегативной устойчивости шламов // Материалы Международной научно-практической конференции «50 лет Российской научной школе комплексного освоения недр Земли». – ИПКОН РАН, 2017. – С. 45–47.
8. Туголуков А. В., Бармин И. С., Новожилова В. В., Брыляков Ю. Е. Исследование и оптимизация технологии флотационного обогащения руд Ковдорского апатит-штаффелитового месторождения // Горный журнал. – 2012. – № 10. – С. 71–76.
9. Фридрихсберг Д. А. Курс коллоидной химии. – М.: Химия, 2010. – 416 с.
10. Chaimaa Ben Skouraa, Soukaina Ettouimib, Zineb Largateb Faiçal, Guennounb Salaheddine Albustamib. Modelling and Simulation of Slurry Phosphate Thickening // Procedia Engineering. – 2016. – № 138. – P. 131–141.
11. Elbendary A., Aleksandrova T., Nikolaeva N. Influence of operating parameters on the flotation of the Khibiny Apatite-Nepheline Deposits // Journal of Materials Research and Technology. – 2019. – V. 8, № 6. – P. 5080–5090.
12. Liu X., Ruan Y., Li C., Cheng R. Effect and mechanism of phosphoric acid in the apatite/dolomite flotation system // International Journal of Mineral Processing. – 2017. – V. 167. – P. 95–102.
13. Santana R. C., Duarte C. R., Ataíde C., Barrozo M. Flotation Selectivity of Phosphate Ore: Effects of Particle Size and Reagent Concentration // Separation Science and Technology. – 2011. – V. 46 (9). – P. 1511–1518. DOI: 10.1080/01496395.2011.561268.
14. Wei S., Sonsie R., Forbes E., Franks G. V. Flocculation/flotation of hematite fines with, anionic temperature responsive polymer acting as a selective flocculant and collector // Minerals Engineering. – 2015. – V. 77. – P. 64–71.
15. Yaoyang Ruan, Dongsheng He, Ruan Chi. Review on Beneficiation Techniques and Reagents Used for Phosphate Ores // Minerals. – 2019. – № 9. – P. 1–18.
16. Yehia A., Khalek M. A., Ammar M. Cellulase as a new phosphate depressant in dolomite-phosphate flotation // Physicochemical Problems of Mineral Processing. – 2017. – V. 53. – P. 1092–1104.

## References

1. Beloborodov V. I., Zakharova I. B., Andronov G. P. Perspektivy razvitiya fosforsoderzhashchei mineral'no-syr'evoi bazy OAO "Kovdorskii GOK" [Prospects for the development of the phosphorus-containing mineral resource base of JSC "Kovdorskii GOK"], *Gornyi zhurnal [Mining Journal]*, 2010, No 9, pp. 73–77. (In Russ.).
2. Lygach A. V., Ignatkina V. A., Lygach V. N. Novye tekhnologii pererabotki fosforsoderzhashchikh rud [New technologies for processing phosphorus-containing ores [Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)], *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) [Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)]*, 2016, No 1, pp. 345–359. (In Russ.).
3. Mikhailova A. V., Garanichev Ya. V. Issledovaniya flotatsii apatita iz rudy Kovdorskogo mestorozhdeniya [Studies of apatite flotation from Kovdorskoye ore deposit], *Gornyi zhurnal [Mining Journal]*, 2010, No 10, pp. 42–44.
4. Hebera B. P. Flokulyatsiya mineral'nykh suspenziy [Flocculation of mineral suspensions], Moscow, Nedra Publ., 1983, 288 p.
5. Pestryak I. V. Obosnovanie i razrabotka effektivnykh metodov konditsionirovaniya oborotnykh vod obogatitel'nykh predpriyatii [Substantiation and development of effective methods of conditioning of circulating waters of concentrating enterprises], *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) [Mining informational*

- and analytical bulletin (scientific and technical journal)], 2018, No 7, pp. 153–159. (In Russ.).
6. Polivanskaya V. V., Morozov V. V. Povyshenie effektivnosti flotatsii apatit-shtaffelitovykh rud putem regulirovaniya agregativnoi ustoichivosti shlamov [Improving the efficiency of flotation of apatite-staffelite ores by regulating the aggregative stability of sludge], *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya: materialy XXIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, provodimoi v ramkakh XVI Ural'skoi gornopromyshlennoi dekady* [Scientific foundations and practice of processing ores and technogenic raw materials: materials of the XXIII International Scientific and Technical Conference held within the framework of the XVI Ural Mining Decade], 2018, pp. 109–112.
  7. Polivanskaya V. V., Morozov V. V., Simenel A. A. Povyshenie effektivnosti flotatsii fosfatnykh rud na osnove regulirovaniya agregativnoi ustoichivosti shlamov [Improving the efficiency of phosphate ore flotation based on regulation of aggregate stability of sludge], *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "50 let Rossiiskoi nauchnoi shkole kompleksnogo osvoeniya neдр Zemli"* [Materials of the International Scientific and Practical Conference "50 years of the Russian Scientific School of integrated development of the Earth's Interior"], IP-KON RAN Publ., 2017, pp. 45–47.
  8. Tugolukov A. V., Barmin I. S., Novozhilova V. V., Brylyakov Yu. E. Issledovanie i optimizatsiya tekhnologii flotatsionnogo obogashcheniya rud Kovdorskogo apatit-shtaffelitovogo mestorozhdeniya [Research and optimization of the technology of flotation enrichment of ores of the Kovdorsky apatite-staffelite deposit], *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2012, No 10, pp. 71–76.
  9. Fridrikhsberg D. A. Kurs kolloidnoi khimii [Colloidal chemistry course], Moscow, Khimiya Publ., 2010, 416 p.
  10. Chaimaa Ben Skouraa, Soukaina Ettouimib, Zineb Largeteb Faïçal, Guennounb Salaheddine Albustamib. Modelling and Simulation of Slurry Phosphate Thickening, *Procedia Engineering*, 2016, No 138, pp. 131–141.
  11. Elbendary A., Aleksandrova T., Nikolaeva N. Influence of operating parameters on the flotation of the Khibiny Apatite-Nepheline Deposits, *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, V. 8, No 6, pp. 5080–5090.
  12. Liu X., Ruan Y., Li C., Cheng R. Effect and mechanism of phosphoric acid in the apatite/dolomite flotation system, *International Journal of Mineral Processing*, 2017, V. 167, pp. 95–102.
  13. Santana R. C., Duarte C. R., Ataíde C., Barrozo M. Flotation Selectivity of Phosphate Ore: Effects of Particle Size and Reagent Concentration, *Separation Science and Technology*, 2011, V. 46(9), pp. 1511–1518, DOI: 10.1080/01496395.2011.561268.
  14. Wei S., Sonsie R., Forbes E., Franks G. V. Flocculation/flotation of hematite fines with, anionic temperature responsive polymer acting as a selective flocculant and collector, *Minerals Engineering*, 2015, V. 77, pp. 64–71.
  15. Yaoyang Ruan, Dongsheng He, Ruan Chi. Review on Beneficiation Techniques and Reagents Used for Phosphate Ores, *Minerals*, 2019, No 9, pp. 1–18.
  16. Yehia A., Khalek M. A., Ammar M. Cellulase as a new phosphate depressant in dolomite-phosphate flotation, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2017, V. 53, pp. 1092–1104.

## Авторы

### Морозов Валерий Валентинович

доктор технических наук, профессор  
dchmggu@mail.ru

### Поливанская Валерия Владимировна

доцент  
vpolivaskaya@misis.ru

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

## Authors

### Morozov Valery Valentinovich

Doctor of technical sciences, Professor  
dchmggu@mail.ru

### Polivanskaya Valeriya Vladimirovna

Associate professor  
vpolivaskaya@mail.ru

National University of Science and Technology (MISIS),  
Moscow, Russia

ПОЗДРАВЛЯЕМ С ЮБИЛЕЕМ



Заслуженный деятель науки РФ, научный руководитель Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов» (ИМГРЭ), доктор геолого-минералогических наук **Александр Александрович Кременецкий** отметил 16 ноября 2021 года свой 80-летний юбилей.

А. А. Кременецкий – крупный специалист в области геохимии рудных, редких и рассеянных элементов в процессах породо- и рудообразования. В его работах освещены важнейшие вопросы петрологии рудообразующих систем, геохимических поисков рудных месторождений.

В ИМГРЭ Александр Александрович работает 55 лет, с момента окончания геологического факультета Воронежского государственного университета. В течение 13 лет (с 1988 г.) был заместителем директора института, затем (до 2014 г.)

возглавлял его. В 1980-е годы совместно с коллегами развернул исследования геологии, геохимии и минералогии редких щелочных металлов во многих районах СССР: на Кольском полуострове, Дальнем Востоке, Курильских островах, в Забайкалье, Восточных Саянах, Узбекистане. Одним из интереснейших направлений его работы стало геолого-геохимическое изучение разрезов глубоких и сверхглубоких скважин – Кольской, Саатлинской, Мурунтауской, Кубанской, Тюменской, Криворожской, Тырныаузской, Уральской. В 1992 г. А. А. Кременецкий защитил докторскую диссертацию «Метаморфизм и рудообразование в глубинных зонах земной коры (по данным глубоких и сверхглубоких скважин)».

А. А. Кременецкий – один из основателей нового научного направления: геолого-геохимического изучения глубинных зон земной коры с помощью сверхглубокого бурения. Он продолжает развивать эти фундаментальные исследования, позволяющие значительно расширить научные представления о формировании и локализации рудного и углеводородного сырья.

Значительное место в научной деятельности Александра Александровича заняли выявление и изучение новых нетрадиционных геолого-промышленных типов редкометалльных месторождений: цезий-биотитовых околопегматитовых метасоматитов, цезиеносных вулканических стёкол, литиеносных флюорит-полилититионитовых метасоматитов, аутигенных европиеносных монацитов, рениеносных вулканических газов. В 2017 году он был удостоен Почётного знака «Первооткрыватель месторождения» за детальное изучение и разведку Брикетно-Желтухинского месторождения рения – нового геолого-промышленного типа водородных месторождений.

Под руководством и при непосредственном участии А. А. Кременецкого в ИМГРЭ разработана классификация геолого-промышленных типов редкометалльных месторождений и создана прогнозно-металлогеническая карта России на редкие элементы масштаба 1 : 5 000 000.

Ещё одно исключительно важное направление исследований Александра Александровича Кременецкого – проблематика генезиса и условий формирования гигантских золоторудных месторождений, локализованных в терригенных и черносланцевых толщах. В числе изученных им объектов – месторождения Мурунтау, Витватерсранд, Пибл.

В 2013 г. за разработку и создание «Российской геологической энциклопедии» (в составе коллектива авторов) А. А. Кременецкий награждён премией Правительства Российской Федерации в области науки и техники.

Заслуженный геолог РФ, Почётный разведчик недр Александр Александрович Кременецкий руководил международными проектами INTAS и IAGOD («Рудоносные граниты России и сопредельных стран», «Эколого-геохимические исследования рудных районов»), сотрудничал с учёными Испании, Англии, Франции, Австралии, Южной Африки, Индонезии, Узбекистана, Белоруссии и Украины. В последние годы возглавляет проект по геолого-геохимическому и изотопно-геохронологическому изучению пород дна Северного Ледовитого океана, геохимическому картированию российского сектора Арктики. Эти исследования направлены на дополнение сводной геолого-картографической основы недр России и её континентального шельфа геохимическими картами российского сектора Арктики и прилегающих территорий.

А. А. Кременецкий – автор более 200 научных работ, в том числе 10 монографий, обладатель 17 авторских свидетельств и патентов на изобретения. Как член редколлегии ряда авторитетных научных журналов («Руды и металлы», «Отечественная геология», «Разведка и охрана недр», «Каротажник», «Геология и охрана недр» (Республика Казахстан)), он многое делает для повышения уровня научных публикаций.

Не только коллегам, но и широкому кругу людей знакомы замечательные художественные и научно-популярные книги Александра Александровича: о природе вулканов, об изучении и освоении Арктики, о человеческих судьбах, о профессии геолога, помогающей освободиться от суеты. Это прекрасная поэтическая проза.

Редакция журнала «Руды и металлы» сердечно поздравляет Александра Александровича Кременецкого с юбилеем, желает крепкого здоровья и успеха во всех жизненных планах!



ПОСВЯЩАЕТСЯ ПАМЯТИ



**20.09.1934–21.10.2021**

Ушёл из жизни **Вячеслав Петрович Новиков**, доктор геолого-минералогических наук, известный специалист в области геологии, прогнозирования, поисков и оценки золоторудных месторождений, рудно-формационного анализа и металлогении золота, главный научный сотрудник ФГБУ «ЦНИГРИ».

В. П. Новиков прошёл большой путь в геологии. После окончания в 1957 году Московского геологоразведочного института (МГРИ) им. Серго Орджоникидзе работал в Восточном Забайкалье на государственной геологической съёмке масштаба 1 : 200 000. В 1963 г. начал преподавать в научно-исследовательском секторе МГРИ, одновременно изучал золотые и урановые месторождения Алдана. В 1974 г. поступил на работу в ЦНИГРИ, и в дальнейшем основным направлением его деятельности стало изучение золотоносности Дальнего Востока.

В. П. Новиков с группой исследователей ЦНИГРИ разработал комплект прогнозно-металлогенических карт на золото Дальнего Востока, и данная работа на долгие годы предопределила направленность геологической разведки в этом крупном золотоносном регионе. Под его руководством и при непосредственном участии проведены обобщающие работы по золотоносности и металлогении вулканоплутонических поясов Востока России, локальному прогнозу и поискам золото-серебряных месторождений. В результате появились методические руководства и рекомендации по оценке прогнозных ресурсов и составлению прогнозных карт. Вячеслав Петрович изучал геологическое строение переданных в промышленное освоение месторождений Многовершинное (1979 г.), Покровское (1985 г.), Зун-Холбинское (1992 г.), Тас-Юряхское (1997 г.), был соавтором при подготовке подсчёта запасов ряда золоторудных месторождений.

Ещё одна крупная научная разработка В. П. Новикова – создание с коллективом авторов «Прогнозно-металлогенической карты золотоносности России» масштаба 1 : 2 500 000. Он активно занимался составлением атласов специализированных прогнозных карт масштаба 1 : 500 000 по Амурской и Читинской областям, оценкой перспектив выявления месторождений цветных и благородных металлов на Полярном и Приполярном Урале. Вячеслав Петрович – один из основных авторов прогнозно-металлогенических карт золотоносности территории ЯНАО и Республики Коми масштаба 1 : 500 000.

Более 15 лет, с 2001 г., Вячеслав Петрович возглавлял группу экспертов по научно-методическому сопровождению ГРР на золото, в Забайкальском, Хабаровском, Приморском краях и Амурской области.

В. П. Новиков трудился в качестве эксперта и консультанта в Болгарии и США, участвовал в выполнении контрактных работ по поискам и оценке месторождений золота на Аляске, в Чили, Марокко.

Одно из важнейших свойств многогранной натуры Вячеслава Петровича – надёжность. Порученные ему работы всегда выполнялись качественно и точно в срок. Высокий профессионализм в сочетании с острым и пытливым умом, настойчивостью и способностью к нетривиальным решениям позволяли ему с честью выходить из самых сложных ситуаций.

Результаты исследований В. П. Новикова отражены в многочисленных научно-производственных отчётах, более чем в 60 публикациях, включая монографии. В течение многих лет

Результаты исследований В. П. Новикова отражены в многочисленных научно-производственных отчётах, более чем в 60 публикациях, включая монографии. В течение многих лет

ПОСВЯЩАЕТСЯ ПАМЯТИ

он был членом диссертационного совета ЦНИГРИ. В составе коллектива авторов В. П. Новиков удостоен в 2008 г. премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники за «Научное обоснование, создание и реализацию системы прогноза и воспроизводства минерально-сырьевой базы благородных и цветных металлов Российской Федерации». В числе его наград – почётные грамоты Минприроды РФ и Роснедр, знаки «Отличник разведки недр», «Почётный разведчик недр». В 2014 г. ему присвоено звание «Заслуженный геолог Российской Федерации».

Человеческие качества Вячеслава Петровича Новикова вызывали заслуженное уважение и любовь всего коллектива, и в стенах института память о нём будут бережно хранить.



19.04.1957 – 21.11.2021

Ушёл из жизни **Владимир Борисович Голенев**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУ «ЦНИГРИ», эксперт в вопросах геолого-экономической оценки месторождений благородных и цветных металлов, апробации прогнозных ресурсов.

Выпускник Московского геологоразведочного института им. Серго Орджоникидзе В. Б. Голенев работал в Майской геологоразведочной экспедиции Северо-Восточного геологоразведочного управления СССР, затем, с 1980 года, в Центральном научно-исследовательском геологоразведочном институте цветных и благородных металлов. Его высоко ценили как прекрасного исследователя, специалиста в вопросах поисков, разведки и геолого-экономической оценки месторождений благородных и цветных металлов, подсчёта запасов и прогнозных ресурсов. С середины 1980-х годов он был экспертом Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых.

Владимир Борисович обладал значительным опытом поисковых работ. Участвовал в поисковых и геологоразведочных работах, проводившихся в Народной Демократической Республике Йемен.

В. Б. Голенев – один из основных авторов монографии «Методика разведки золоторудных месторождений». Обобщив опыт многолетних исследований золоторудных месторождений, он разработал рациональную методику их разведки и исследований на различных стадиях. Совместно с коллегами предложил группировку геолого-промышленных и морфологических типов коренных месторождений, проанализировал существующие принципы их разведки и выбора плотности разведочной сети.

В последние годы В. Б. Голенев актуализировал методические рекомендации по оценке прогнозных ресурсов твёрдых полезных ископаемых. Он участвовал в переоценке, апробации прогнозных ресурсов, создании целостной экспертной системы кадастрового учёта.

Особый вклад Владимир Борисович внёс в развитие методических основ разведки месторождений золота в глинистых корях выветривания. Этой теме посвящена его докторская диссертация «Геолого-минералогические основы разведки месторождений золота в глинистых корях выветривания» (2007 г.). Всесторонний анализ многолетней практики изучения важного геолого-промышленного типа месторождений позволил ему выявить и обосновать основные

## ПОСВЯЩАЕТСЯ ПАМЯТИ

факторы, определяющие плотность разведочной сети опробования, предложить способы оценки достоверности данных. Он дал рекомендации по совершенствованию методики экспрессной оценки экономической значимости объектов на ранних стадиях их подготовки к промышленному освоению, по выбору способа их разработки. Основные проблемы этой области исследований проанализированы в монографиях В. Б. Голенева. В 2021 г. Владимир Борисович вместе с соавторами подготовил к изданию новую монографию «Подсчёт запасов и количественная оценка прогнозных ресурсов рудного золота». В начале 2022 года книга, которой он посвятил много времени и труда, выйдет в свет.

В. Б. Голенев – автор более 40 научных трудов, в том числе 23 публикаций в научных журналах, двух монографий и более 15 научно-исследовательских и производственных отчётов. Его опыт и глубокие знания были высоко востребованы в ЦНИГРИ, он постоянно оказывал научно-методическую помощь сотрудникам института, консультировал коллег по вопросам геологии, оценки и разведки коренных месторождений.

Владимир Борисович Голенев был замечательным геологом, интеллигентным, сердечным человеком. Коллеги ценили и уважали его и сохранят о нем добрую память.

**11.11.1933 – 29.11.2021**

Не стало **Александра Петровича Лихачёва**, доктора геолого-минералогических наук, крупного специалиста в области изучения рудообразующих магматических процессов и генезиса платино-медно-никелевых месторождений, ведущего научного сотрудника ФГБУ «ЦНИГРИ».

Свою жизнь в геологии Александр Петрович начал в 1950 году рабочим гидрогеологической партии Киргизского геологического управления (КГУ). После обучения на специализированных курсах при КГУ продолжал работать геофизиком-наблюдателем, коллектором и старшим коллектором, занимаясь поисками урановых месторождений и геологической съёмкой. В 1951 г. участвовал в открытии и обследовании уранового месторождения Чангет в Джалал-Абадской области Киргизской Республики. Продолжая трудиться в КГУ, окончил дневное отделение Фрунзенского политехнического института. Затем работал на Норильском горно-металлургическом комбинате, пройдя путь от старшего инженера, до и. о. главного геолога рудника Угольный ручей.

В 1962 г. Александр Петрович по приглашению одного из ведущих сотрудников ЦНИГРИ, профессора М. Н. Годлевского, поступил в аспирантуру института и за три года подготовил и защитил на Учёном совете геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова кандидатскую диссертацию «Роль лейкократового габбро в формировании рудоносных дифференцированных интрузий Норильского района». В дальнейшем вся его научная жизнь была связана с ЦНИГРИ. В 1980 г. А. П. Лихачёв защитил докторскую диссертацию «Геология, генезис и прогнозирование медно-никелевых месторождений» и в тот же год был назначен главным куратором Министерства геологии СССР по никелю, кобальту и металлам платиновой группы.

ПОСВЯЩАЕТСЯ ПАМЯТИ

С 1980 г. в обязанности А. П. Лихачёва входило определение направлений геологоразведочных и научно-исследовательских работ страны, а также их координация. Он руководил рядом научных исследований, осуществлённых организациями Мингео СССР и АН СССР. Была создана геолого-генетическая классификация магматических формаций и связанных с ними месторождений, разработана концепция развития магматизма и выделены признаки обстановок, благоприятных для образования месторождений. Разрабатывались и внедрялись методики прогноза, поисков и оценки месторождений никеля, кобальта и платиноидов. Впервые для классификации магматических пород была предложена магнезиальность, а не кремнекислотность и щёлочность. Это позволило выйти на более достоверную оценку *P-T* параметров зарождения продуктивных магм, что, в свою очередь, существенно повысило надёжность оценки перспективности рудоносных площадей. Было также показано, что существующие разности мафит-ультрамафитовых образований являются продуктами различной степени плавления исходного мантийного вещества, а не дифференциатами только одной, первично выплавляемой пикритовой магмы, как полагалось ранее. Данное положение послужило основанием для разделения магматических образований с вычленением из них рудоносных разностей и определением мест их проявления.

В результате экспериментальных и теоретических исследований Александр Петрович установил закономерные свойства и термодинамический ряд химических элементов, определяющие их поведение в магматических и гидротермальных процессах, а также при переработке руд и других материалов. Использование выявленных закономерностей позволяет эффективно решать геологические, технологические и другие задачи, связанные с получением ценных веществ и защитой окружающей среды.

На базе достигнутых научных результатов А. П. Лихачёвым обоснована перспективность постановки поисковых работ, приведших к открытию на севере Красноярского края новой Маймеча-Котуйской платиноносной провинции, ряда уникальных по составу элементов рудоносных объектов.

В 1986–1990 гг. в институте «Гинцветмет» Министерства цветных металлов СССР А. П. Лихачёв изучал возможности использования выявленных в экспериментальных исследованиях закономерностей поведения химических элементов в металлургической практике. Были разработаны и запатентованы принципиально новые технологии, установки и оборудование, обеспечивающие высокоэффективную переработку рудных и других материалов.

В последующие годы исследования Александра Петровича касались вопросов происхождения крупных зарубежных объектов (Бушвельд, Стиллуотер, Садбери и др.), закономерностей образования и размещения месторождений различных видов полезных ископаемых, общих вопросов геологии и геохимии, причин и условий проявления природных процессов.

Результаты исследований Александра Петровича Лихачёва опубликованы в более чем 200 индивидуальных печатных и 100 рукописных работах. Он – соавтор нескольких коллективных книг, в том числе монографии «Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения» (2006). В 2009 г. Международный биографический центр (ИВС) включил А. П. Лихачёва в список 100 ведущих учёных мира.

Коллеги в ЦНИГРИ будут всегда хранить память об Александре Петровиче Лихачёве, выдающемся исследователе и глубоком, талантливым человеке.

## Список статей, опубликованных в журнале «Руды и металлы» в 2021 г.

### Новости, информация

Состоялось заседание Коллегии Федерального агентства по недропользованию. № 1. С. 5.

### Общие вопросы недропользования

**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. № 1. С. 6–25.

**Егорова И. В., Михайлов Б. К.**

Объектный метод анализа обеспеченности запасами полезных ископаемых на примере России. № 4. С. 6–21.

### Прикладная металлогения

**Андреев А. В.**

Прогнозно-поисковая модель золоторудных объектов Тоупугол-Ханмейшорского рудного узла как основа для выделения перспективных площадей в пределах Малоуральского вулcano-плутонического пояса Полярного Урала и обоснования постановки на них поисковых работ. № 2. С. 6–24.

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

Алдано-Вилуйская рудно-россыпная золотоносная провинция (Россия). № 2. С. 25–39.

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

Металлогения золота Восточно-Таннуольского рудного района (Республика Тыва). № 2. С. 40–67.

**Иванов Д. В., Толстов А. В., Иванов В. В.**

Роль пликативных структур как прогнозных критериев на алмазоносные кимберлиты в Алакит-Мархинском поле. № 3. С. 6–13.

**Проценко Е. В., Шахурдина Н. К.**

Дополнительные структурно-тектонические факторы локализации кимберлитов в пределах Вилуйско-Мархинской зоны разломов. № 3. С. 14–21.

**Прусакова Н. А., Громцев К. В., Лаптев М. М.**

Геолого-геофизические предпосылки выделения перспективных площадей для постановки поисковых работ на коренные месторождения алмазов. № 3. С. 22–45.

**Толстов А. В., Максимкина Л. В.,  
Колесник А. Ю., Абрамов В. Ю., Антонова Н. В.**

Перспективы алмазоносности Чаро-Синской зоны разломов. № 3. С. 46–58.

**Сердюк С. С., Макаров В. А., Кириленко В. А.,  
Макаров И. В., Муромцев Е. А., Шведов Г. И.**

Геология и колчеданно-полиметаллическое оруденение прогнозируемого Лимонитового месторождения Рассохинского рудного узла (Енисейский край). № 4. С. 22–42.

### Методы и методики прогноза, поисков, оценки и разведки месторождений

**Кузнецов В. В., Чижова И. А.**

Опыт разработки и применения интеллектуально-графических компьютерных систем. № 1. С. 26–41.

**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. № 1. С. 42–56.

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

Новые данные по золото-редкометалльному оруденению Центрально-Колымского золотоносного района: возраст, условия образова-

ния, состав, рудоконтролирующие факторы. № 2. С. 68–89.

**Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д.**

О специфике изучения алмаза при прогнозно-поисковых работах (на примере Сибирской платформы). № 3. С. 59–75.

**Каржавин В. К.**

Алмазы «полуночных земель России». № 3. С. 76–81.

**Чикатуева В. Ю., Степанов Н. В., Читалин А. Ф., Корост Д. В.**

Методика изучения керна объектов золото-кварцевой формации с применением рентгеновской компьютерной томографии на примере месторождения Дрожное (Республика Саха (Якутия)). № 4. С. 43–59.

### 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 минералого-геохимическая зональность золотосодержащего молибден-медно-порфирирового месторождения Кызык-Чадр, Республика Тыва. № 1. С. 57–76.

**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. № 1. С. 77–92.

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

Никелевые аномалии и золотокварцевая минерализация в дунит-гарцбургитовых массивах Первомайско-Верхотуринской площади (Центральный Урал). № 2. С. 90–98.

**Ежков Ю. Б., Рахимов Р. Р., Холиёров А. Т., Тошметов У. Х.**

Редкометалльно-полиметаллическое оруденение Кошмансайского рудного поля (Восточный Узбекистан). № 4. С. 60–74.

**Зайцева М. Н.**

Особенности геологического строения и локализации оруденения Морянихо-Меркурихинского рудного поля. № 4. С. 75–84.

### 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 Сюльдюкарского поля Якутии. № 1. С. 93–105.

**Игнатов П. А., Зарипов Н. Р., Новиков К. В., Толстов А. В.**

Складки волочения в осадочных породах, вмещающих кимберлиты Западной Якутии. № 3. С. 82–91.

**Пенделяк Р. Н.**

Многофазность образования трубки им. В. Гриба и её выраженность в палеомагнитных свойствах пород и ситовых характеристиках алмазов. № 3. С. 92–100.

**Помазанский Б. С., Монхоров Р. В., Антонова Т. А., Мальковец В. Г., Кулагин А. Н., Шалкина М. В., Батырь В. Я., Собакин А. Е.**

Неизменённый кимберлит трубки Интернациональная (Мирнинское поле). № 3. С. 101–113.

**Черенков В. Г., Корнилова В. П., Голубева Ю. Ю., Герасимова М. В.**

Базиты Виллюйско-Мархинского дайкового пояса (Виллюйский палеорифт) и их соотношения с кимберлитами Накынского поля. № 4. С. 85–108.

### Вещественный состав и свойства пород и руд

**Власова Э. А., Хмельков А. М.**

Морфогенетические особенности гранатов из россыпи Дьюкунах, Якутская алмазоносная провинция. № 1. С. 106–112.

**Хмельков А. М., Власова Э. А., Иванов А. С.**

Парагенетическое разнообразие состава гранатов из кимберлитов Накынского поля (Якутия). № 3. С. 131–141.

**Хачатрян Г. К., Анашкина Н. Е.**

Соотношение между распределением структурных примесей в кристаллах алмаза и алмазонасностью кимберлитовых трубок (на примере Архангельской области и Якутии). № 3. С. 114–130.

**Юричев А. Н.**

Акцессорные минералы золота и серебра в ультрамафитах Кызыр-Бурлюкского массива (Западный Саян). № 4. С. 109–120.

### Комплексное использование минерального сырья

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

Флотационное обогащение свинцово-флюоритовой руды: влияние характеристик руды и кинетики флотации. № 2. С. 99–110.

**Морозов В. В., Поливанская В. В.**

Повышение эффективности флотации апатит-штаффелитовых руд с применением режима двухстадиального сгущения шламов. № 4. С. 121–131.

### Поздравляем с юбилеем

А. И. Иванова (№ 1), С. Г. Кряжева (№ 1), Б. И. Беневольского (№ 1), В. П. Филиппова (№ 3), Л. П. Антоновича (№ 3), Н. П. Похиленко (№ 3), В. Д. Конкина (№ 3), А. А. Кременецкого (№ 4)

### Посвящается памяти

В. И. Куторгина (№ 1), В. Д. Крюкова (№ 1), Н. В. Межеловского (№ 3), Е. Е. Савари (№ 3), И. Б. Флёрова (№ 3), В. П. Орлова (№ 3), В. П. Новикова (№ 4), А. П. Лихачёва (№ 4), В. Б. Голенева (№ 4)

Список статей, опубликованных в журнале «Руды и металлы» в 2021 г.

# III

МОЛОДЕЖНАЯ  
НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ ЦНИГРИ

16–18  
февраля

Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов

## ОТ ПРОГНОЗА К ДОБЫЧЕ

Организатор конференции – ФГБУ «ЦНИГРИ».

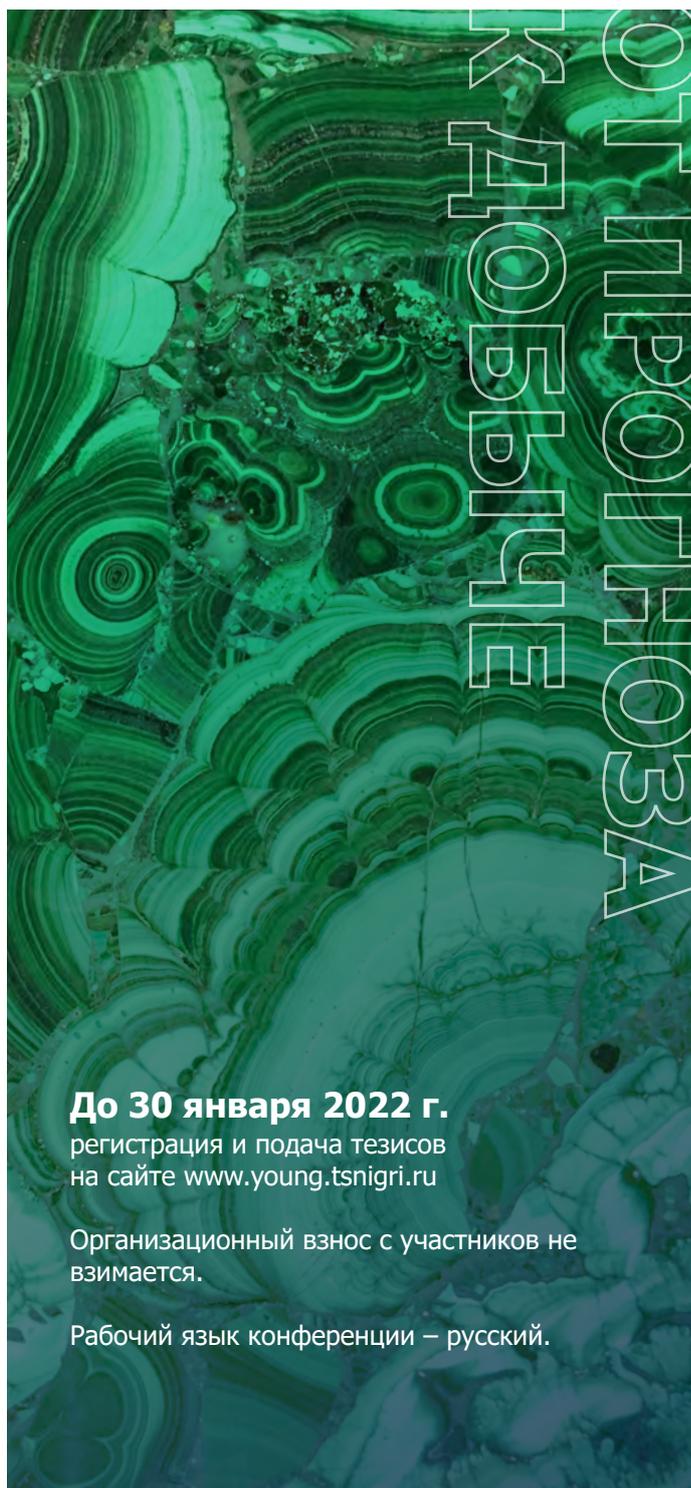
Принимаются заявки от студентов, аспирантов, молодых учёных и специалистов в возрасте до 35 лет.

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

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

### НАПРАВЛЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ

-  Металлогения, минерагения и рудогенез
-  Прогноз, поиски, оценка и разведка месторождений полезных ископаемых
-  Разработка прогнозно-поисковых и геолого-генетических моделей месторождений твёрдых полезных ископаемых
-  Методы изучения вещественного состава пород и руд
-  Физико-химические условия минералообразования
-  Геолого-экономическая оценка месторождений полезных ископаемых и участков недр
-  Использование геоинформационных технологий и пространственных данных в геологической отрасли
-  Современные технологии добычи и переработки минерального сырья



**До 30 января 2022 г.**

регистрация и подача тезисов  
на сайте [www.young.tsnigri.ru](http://www.young.tsnigri.ru)

Организационный взнос с участников не  
взимается.

Рабочий язык конференции – русский.



[antonetc@tsnigri.ru](mailto:antonetc@tsnigri.ru)  
[www.young.tsnigri.ru](http://www.young.tsnigri.ru)



8(495) 315-26-01, секретарь конференции  
Анастасия Владимировна Антонец



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

# XI МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



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

12–15  
АПРЕЛЯ  
2022

МОСКВА  ЦНИГРИ

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

Программа конференции включает пленарное заседание, устные и стендовые доклады на тематических секциях, а также полевые экскурсии. Подробная информация размещена на сайте [conference@tsnigri.ru](mailto:conference@tsnigri.ru).

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

**Официальные языки конференции – русский и английский**

**Организационный взнос с участников не взимается.**

**Участие в экскурсиях платное.**

**Окончания приёма заявок и оплаты участия в полевых экскурсиях – 1 марта 2022 г.**

## ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

- Минералогия АБЦМ
- Приоритетные направления прогнозно-поисковых работ на АБЦМ
- Перспективные объекты для постановки геологоразведочных работ на АБЦМ различных стадий
- Опыт проведения и результаты геологоразведочных работ на АБЦМ
- Научно-методические основы комплексирования геологических, геохимических, геофизических методов прогноза, поисков, оценки и разведки
- Использование комплексных моделей месторождений для целей прогноза, поисков, оценки и разведки АБЦМ
- Разработка и реализация инновационных методов, методик и технологий ГРП



[conference@tsnigri.ru](mailto:conference@tsnigri.ru)  
[www.conference.tsnigri.ru](http://www.conference.tsnigri.ru)



8(495) 315-26-83, ученый секретарь  
Ирина Геннадьевна Третьякова



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