

РУДЫ И МЕТАЛЛЫ



научно-технический журнал

№ 1 январь – май 2020

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Иванов Анатолий Иннокентьевич

главный редактор
доктор геолого-минералогических наук,
научный руководитель ЦНИГРИ

Черных Александр Иванович

зам. главного редактора
кандидат геолого-минералогических наук,
генеральный директор ЦНИГРИ

Жаркова Вера Сергеевна

зам. главного редактора
заведующая редакционно-оформительским отделом ЦНИГРИ

Вартанян Сергей Серопович

кандидат геолого-минералогических наук,
член Учёного совета ЦНИГРИ

Волчков Алексей Гордеевич

кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий научно-методическим отделением ЦНИГРИ

Голубев Юрий Конкордьевич

кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий отделом алмазов ЦНИГРИ

Горячев Николай Анатольевич

доктор геолого-минералогических наук, член-корр. РАН,
главный научный сотрудник Северо-Восточного Комплексного
научно-исследовательского института (СВКНИИ) ДВО РАН

Звездов Вадим Станиславович

кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий отделом металлогении ЦНИГРИ

Кременецкий Александр Александрович

доктор геолого-минералогических наук,
советник генерального директора Института минералогии,
геохимии и кристаллохимии редких элементов (ИМГРЭ)

Кряжев Сергей Гаврилович

доктор геолого-минералогических наук,
заведующий отделом минералогии
и изотопной геохимии ЦНИГРИ

Кузнецов Владимир Вениаминович

кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий отделом цветных металлов ЦНИГРИ

Наумов Евгений Анатольевич

кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий отделом благородных металлов ЦНИГРИ

Похиленко Николай Петрович

доктор геолого-минералогических наук, академик РАН,
главный научный сотрудник Института геологии и минералогии
им. В. С. Соболева (ИГМ) СО РАН

Проскурнин Василий Фёдорович

доктор геолого-минералогических наук,
заведующий отделом Всероссийского научно-исследовательского
геологического института им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ)

Седельникова Галина Васильевна

доктор технических наук,
директор геолого-технологического центра АО «Росгео»

Толстов Александр Васильевич

доктор геолого-минералогических наук,
директор Научно-исследовательского
геологического предприятия (НИГП) АК «АЛРОСА» (ПАО)

Фридовский Валерий Юрьевич

доктор геолого-минералогических наук, профессор,
директор Института геологии алмаза
и благородных металлов (ИГАБМ) СО РАН

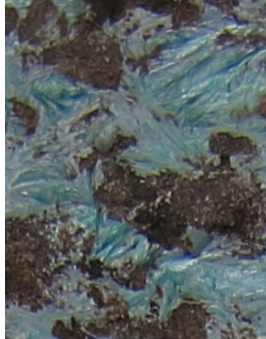
Учредитель

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 2020



СОДЕРЖАНИЕ CONTENTS

НОВОСТИ, ИНФОРМАЦИЯ

ЦНИГРИ – 85 лет

04

NEWS, INFORMATION

TsNIGRI – 85 years old

ПРИКЛАДНАЯ МЕТАЛЛОГЕНИЯ

**Чернышов А. И.,
Лоскутов И. Ю., Пугачёва Е. Е.**

Прогнозная оценка
хромитоносности ультрамафитов
Байкало-Муйского офиолитового пояса,
Северо-Восточное Прибайкалье

12

APPLIED METALLOGENY

**Chernyshov A. I.,
Loskutov I. Yu., Pugacheva E. E.**

Forecasting evaluation of the chromitosity
of ultramafite of the Baikal-Muyi ophiolite
belt, North-East of the Baikal region

МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА, ПОИСКОВ, ОЦЕНКИ И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Миляев С. А.

Геохимические модели полиметаллических
месторождений; опыт их применения
при прогнозной оценке оруденения

22

PROGNOSIS, PROSPECTING AND EXPLORATION: TECHNIQUES AND METHODS

Milyaev S. A.

Geochemical models of base metals
deposits; experience of their application
in predictive estimation of mineralization

Несис В. Н., Мотов А. П., Бутняков А. В.

Геохимические признаки
и границы золоторудных полей
района месторождений Горнячка
и Пещерное, Северный Урал

32

Nesis V. N., Motov A. P., Butnyakov A. V.

Geochemical characteristics and boundaries
of gold ore fields of the region including
Gornychka and Peschernoe deposits,
Northern Urals



**Салихов Р. Ф., Толстов А. В.,
Салихова В. В., Кузьменок А. Н.**

Реконструкции палеорельефа при поисках погребённых кимберлитовых тел на закрытых траппонасыщенных территориях (на примере Алаakit-Мархинского поля)

39

**Salikhov R. F., Tolstov A. V.,
Salikhova V. V., Kuzminok A. N.**

Paleorelief reconstructions in searching for buried kimberlite bodies within closed trapp abundant areas (by the example of the Alakit-Markha kimberlite field)

СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

**Киселёва Г. Д.,
Языкова Ю. И., Коваленкер В. А.,
Трубкин Н. В., Борисовский С. Е.**

Типоморфизм самородного золота, как индикатор различных типов оруденения крупного скарново-порфирового Au-Fe-Cu месторождения Быстринское, Восточное Забайкалье

51

GEOLOGY OF ORE DEPOSITS

**Kiseleva G. D.,
Yazykova Yu. I., Kovalenker V. A.,
Trubkin N. V., Borisovsky S. E.**

Native gold typomorphism as indicator of various types of mineralization of large scarn-porphyry Au-Fe-Cu deposit Bystrinskoe, Eastern Transbaikalia

Кулешевич Л. В., Лавров О. Б.

Au-Pd-Cu-Se-U-рудная минерализация рудопоявления Светлое в центральной Карелии

69

Kuleshevich L. V., Lavrov O. B.

Au-Pd-Cu-Se-U mineralization of Svetloye ore occurrence in central Karelia

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА ПОРОД И РУД

**Бармин И. С., Морозов В. В.,
Поливанская В. В.**

Исследование и разработка режимов сгущения и флотации шламовых классов лежалых хвостов

87

COMPOSITION AND PROPERTIES OF ROCKS AND ORES

**Barmin I. S., Morozov V. V.,
Polivanskaya V. V.**

Research and development of regimes of thickening and flotation of sludge classes of stale tails

Веселовский А. А., Лайхан С. А.

Концепция переработки отвальных никелевых шлаков с предварительным доизвлечением металлов

94

Veselovsky A. A., Layhan S. A.

Concept of processing dumping nickel slags with preliminary extraction of metals

ГЕОЛОГИ О ВОЙНЕ

Фрагменты из книги
А. А. Константиновского «Далёкие голоса»

100

GEOLOGISTS ABOUT THE WAR

A. A. Konstantinovsky
Fragments of the book «Distant voices»



ЦНИГРИ – 85 ЛЕТ

В марте 2020 года Центральному научно-исследовательскому геологоразведочному институту цветных и благородных металлов исполнилось 85 лет. На протяжении восьми с половиной десятилетий ЦНИГРИ создаёт интеллектуальный фундамент отечественной геологоразведочной отрасли в тесном взаимодействии с производственными организациями и в плодотворном сотрудничестве с отраслевыми организациями, академическими институтами и университетами.

Специалисты ЦНИГРИ отвечают за научно обоснованное планирование и эффективное проведение геологоразведочных работ. Решение этих задач – важнейшее условие воспроизводства минерально-сырьевой базы России. В ведении ФГБУ «ЦНИГРИ» девять видов полезных ископаемых, которые занимают ведущее место в структуре российской минерально-сырьевой базы (МСБ) и в объёмах геологоразведочных работ (ГРР): алмазы, золото, серебро, металлы платиновой группы, медь, свинец, цинк, никель и кобальт. Эти твёрдые полезные ископаемые (ТПИ) входят в разряд стратегических и имеют приоритетное значение при проведении ГРР в нашей стране. Доля месторождений и проявлений алмазов, благородных и цветных металлов, учтённых Государственным балансом и Государственным кадастром месторождений, от всех ТПИ составляет более 62 %. На эти виды полезных ископаемых приходится около 65 % от общего числа всех выданных недропользователям лицензий на ТПИ. Финансирование ГРР на алмазы, золото и цветные металлы составляет около 80 % от затрат федерального бюджета на ТПИ и чуть больше за счёт средств недропользователей. Приведённые цифры показывают, насколько значимы работы, проводимые институтом.

В юбилей мы с признательностью вспоминаем имена основателей ЦНИГРИ (НИГРИЗолото) и отмечаем основные вехи его истории.

Летопись Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института цветных и благородных металлов начинается с приказа об организации НИГРИЗолото, подписанного начальником Главного управления золотоплатиновой промышленности Народного комиссариата тяжёлой промышленности СССР А. П. Серебровским 28 марта 1935 г. Усилиями первого руководителя НИГРИЗолото, талантливого учёного, профессора Николая Николаевича Горностаева и его преемников – Юрия Каспаровича Краукле, Ошера Абрамовича Дубровского, Георгия Капитоновича Славина, Якова Наумовича Спивакова, Евгения Андреевича Савари – удалось в первые пятнадцать лет работы НИГРИЗолото, в сложный период становления советской промышленности, в условиях политических репрессий и военных невзгод сформировать профессиональный коллектив. И хотя в силу известных причин имена представителей «валютного цеха» страны долгие годы оставались в тени, во второй половине XX в. ситуация изменилась, и ныне научные работы Сергея

Дмитриевича Шера, Нины Васильевны Петровской, Марии Борисовны и Николая Ивановича Бородаевских, Софьи Георгиевны Мирчинк, Георгия Павловича Воларовича, Лидии Александровны Николаевой и других представителей первого и второго поколений НИГРИЗолото – ЦНИГРИ входят в классический фонд геологической литературы, посвящённой исследованию месторождений благородных металлов.

В период Великой Отечественной войны на институт было возложено обслуживание всех отраслей цветной металлургии с преобладанием «золотого» направления. Многие сотрудники (Г.П. Воларович, Н.И. Бородаевский, П.Л. Каллистов, А.Ф. Сачков, А.П. Божинский и др.) трудились в отдалённых регионах, где решались задачи обеспечения различными видами минерального сырья фронта и военных предприятий.

В 1947 г. специальным Постановлением Совета министров СССР в институте было создано новое направление – научные исследования в области технологии обогащения золотосодержащих руд, песков и металлургии золота. Организацию работ поручили горному инженеру-металлургу Е.А. Савари. С 1953 г. помимо золотоплатиновой и алмазной тематики ЦНИГРИ занимается исследованиями в медной, свинцово-цинковой и редкометалльной подотраслях цветной металлургии, а также геолого-экономической оценкой месторождений.

В 1957 г. НИГРИЗолото переименован в Центральный горно-разведочный институт цветных, редких и благородных металлов – ЦНИГРИ и спустя год первым среди отечественных научно-исследовательских институтов начал заниматься всем комплексом вопросов в области прогноза, поисков, оценки и разведки месторождений благородных и цветных металлов и алмазов, техники и технологии геологоразведочных и буровых работ, анализа и обогащения руд, развития минерально-сырьевой базы и цветной металлургии страны. Широкий спектр исследований, традиция всестороннего анализа материалов и высокий профессиональный уровень научных сотрудников определили ведущее положение ЦНИГРИ в отрасли. Здесь сложилось сообщество экспертов, с чьим мнением считались руководители, определявшие политику проведения геологоразведочных и горно-буровых работ. В 1972 г. Постановлением ГКНТ СССР ЦНИГРИ присвоен статус головной организации Министерства геологии по золоту, платине, меди, свинцу, цинку, никелю, кобальту и алмазам, а также по технике и технологии горно-разведочных работ и ряду других направлений.



Александр Иванович Черных,
генеральный директор ЦНИГРИ с 2018 г.

В 1960–1980-е годы, в период расцвета в нашей стране исследований по развитию отечественной минерально-сырьевой базы, коллектив ЦНИГРИ был существенно преумножен благодаря расширению задач института, созданию региональных филиалов. В эти годы институтом руководили членкорреспондент АН СССР Иван Сергеевич Рожков (1964–1971), затем доктора геолого-минералогических наук Пётр Филиппович Иванкин (1972–1980) и Валерий Александрович Нарсеев (1980–1988). К концу 1980-х годов ЦНИГРИ превратился в разветвлённый научно-производственный центр для решения крупных отраслевых и региональных задач. Интересной страницей его истории стали исследования по геологии, методам прогноза, поисков и созданию технических средств добычи минерально-сырьевых ресурсов Мирового океана.

Во второй половине XX в. в ЦНИГРИ постепенно сформировалась особая научная школа, развивавшая в теории и на практике принципы рудно-формационного анализа, металлогении и минерогении алмазов, благородных и цветных металлов, построения геолого-поисковых моделей таксонов различного ранга. Благодаря ярким представителям этой школы сформировались методические подходы к прогнозу, поискам и оценке месторождений.

На протяжении истории института лидерами в области изучения коренных месторождений благородных металлов последовательно становились Н.Н. Горностаев, Н.И. Бородаевский и М.Б. Бородаевская, С.Д. Шер, Г.П. Воларович, А.И. Казаринов, Д.А. Тимофеевский, Н.А. Фогельман, П.Ф. Иванкин,



Николай Николаевич Горностаев, первый директор НИГРИЗолото–ЦНИГРИ

В. А. Нарсеев, М. М. Константинов, Ю. И. Новожилов, И. Ф. Мигачёв, А. И. Кривцов, Ю. М. Щепотьев, С. С. Вартамян, В. П. Новиков, А. И. Иванов, А. И. Черных.

Оригинальные подходы к исследованию россыпей золота внедрены в практику поисковых и геологоразведочных работ сотрудниками института С. Г. Мирчинк, Е. Я. Синюгиной, Ю. П. Казакевич, И. С. Рожковым, И. Б. Флёровым, Н. М. Риндзюнской и др.

Целая плеяда специалистов ЦНИГРИ – Б. И. Прокочук, В. С. Трофимов, Г. В. Писемский, М. П. Метёлкина, Е. В. Францессон, А. А. Фельдман, В. И. Ваганов, Ф. В. Каминский, С. С. Горохов – плодотворно исследовала месторождения алмазов, и эти работы ныне продолжают Ю. К. Голубев, Н. А. Прусакова, С. Г. Мишенин и их коллеги.

Сложилась особые школы ЦНИГРИ в области изучения месторождений цветных металлов: медно-никелевых (В. В. Юдина, М. Н. Годлевский, А. Д. Баталиев, В. К. Степанов, Д. М. Туровцев, А. П. Лихачёв, В. И. Кочнев-Первухов, О. М. Конкина и др.), медноколчеданных (М. Б. Бородаевская, Л. И. Яковлев, А. И. Кривцов, А. И. Шмидт, А. Н. Барышев, Н. К. Курбанов, А. Г. Волчков и др.), свинцово-цинковых (Е. И. Филатов, Д. И. Горжевский, Г. В. Ручкин, В. В. Кузнецов и др.), медно-порфировых (А. И. Кривцов, И. Ф. Мигачёв, С. Т. Агеева, О. В. Минина, В. С. Звездов и др.).

В сфере генетической и прикладной минералогии лидерами стали Н. В. Петровская, В. А. Новиков, Л. А. Николаева, П. С. Бернштейн, Г. С. Румянцев, Р. А. Амосов, С. В. Яблокова, С. Г. Кряжев и др.

Крупнейшими отечественными специалистами в области методики разведки, подсчёта запасов и геолого-экономической оценки месторождений по праву считаются сотрудники ЦНИГРИ А. П. Божинский, П. Л. Каллистов, М. П. Просняков, И. З. Сомонов, В. Н. Иванов, В. В. Стефанович, Ю. М. Щепотьев, Б. И. Беневольский, И. А. Карпенко, В. И. Куторгин, Д. А. Куликов.



Сотрудники НИГРИЗолото в Забайкалье, 1950-е годы

Весомый вклад в развитие горнодобывающей отрасли в XX – начале XXI в. внесли специалисты ЦНИГРИ в области обогащения минерального сырья (Е. А. Савари, В. И. Зеленов, А. И. Берлинский, Г. В. Седельникова, Н. Г. Клименко, А. И. Никулин, А. И. Романчук, В. П. Ивановская и др.), аналитических исследований пород и руд (Ф. А. Ферьянчич, Э. Е. Раковский, Н. В. Маркова, Э. П. Здорова, А. В. Мандругин и др.), геофизических методов и аппаратуры и интерпретации геофизических данных (В. И. Седова, А. А. Фельдман, Б. В. Рогачёв, П. С. Ревякин, А. А. Солодов, А. Д. Петровский, Е. М. Ершов, А. Ф. Постельников, В. И. Пятницкий, В. И. Векслер и др.), техники и технологии горно-разведочных и буровых работ, охраны труда (П. Д. Луневский, В. А. Сипягин, И. Н. Засухин, Н. А. Александров, В. П. Кренделев, Б. П. Макаров, Ю. Т. Смирнов, В. М. Минаков, В. А. Хорев).

Тесная связь глубоких научных исследований и нужд геологоразведочной и горнорудной практики, отличающая ЦНИГРИ с момента его образования до наших дней, предопределила характер и направленность работ. Специалистов института всегда отличала тщательность в изучении месторождений, детальная работа с фактическим материалом, включающая охват максимально возможного количества данных и стремление к исчерпывающей диагностике пород, фаций, формаций, последующих дислокационных и метаморфических преобразований пород. Обобщение накопленных материалов закономерно привело к созданию технологий прогноза, поисков и оценки месторождений цветных и благородных металлов и алмазов. С 1983 г. в ЦНИГРИ сформировалось новое направление – создание геолого-поисковых моделей рудно-металлогенических категорий под руководством заместителя директора по научной работе (в 1981–1984 и 1991–2010 гг.), доктора геолого-минералогических наук Анатолия Ивановича Кривцова. И в 1990-е годы сложилась оригинальная научная школа разработки геолого-генетических, параметрических и других моделей месторождений, были сформированы компьютерные банки данных для совершенствования технологий прогноза, поисков и разведки месторождений. В этот плодотворный период институт возглавлял доктор геолого-минералогических наук Игорь Фёдорович Мигачёв, директор ЦНИГРИ в 1989–2012 гг.

В начале 2000 г. Б. И. Беневольский, С. С. Вартамян, В. И. Кочнев-Первухов, А. И. Кривцов, И. Ф. Мигачёв при участии других сотрудников ЦНИГРИ начали создание актуализированной системы управления развитием минерально-сырьевой базы, которая включает долгосрочные прогнозы минерально-сырьевого обеспечения экономики и другие аспекты. В 2004 г. ЦНИГРИ стал координатором



Сотрудники ЦНИГРИ на полевых работах, 2018 г.

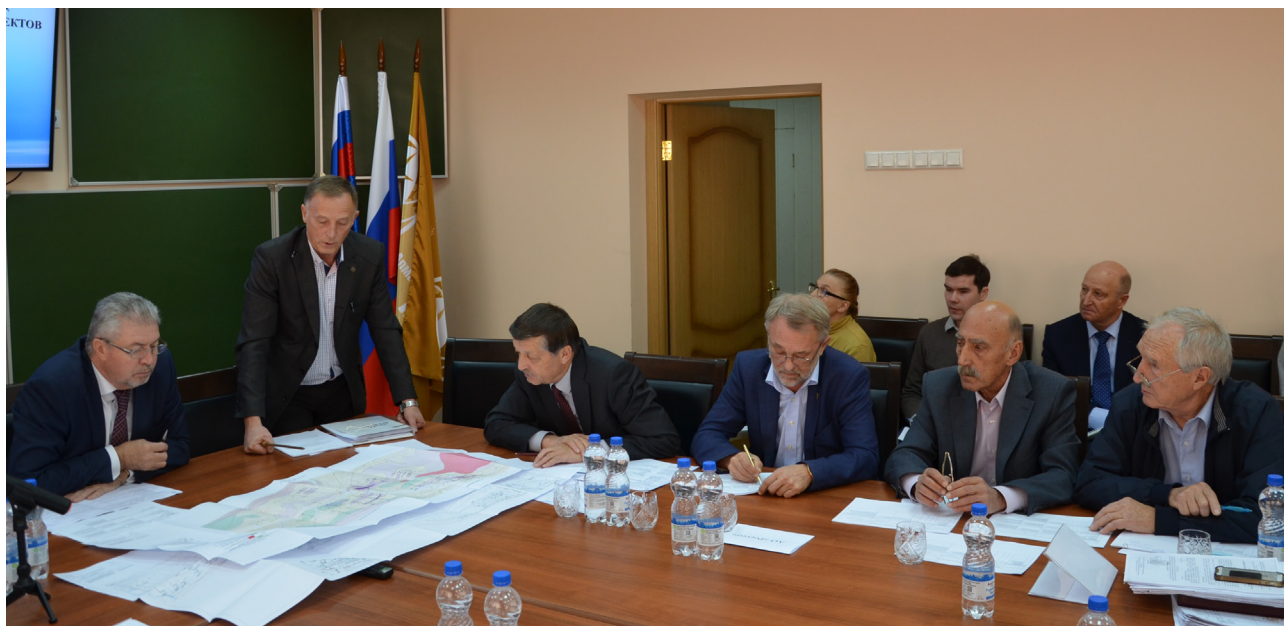
разработки Долгосрочной государственной программы изучения недр и воспроизводства минерально-сырьевой базы России на основе баланса потребления и воспроизводства минерального сырья (2005–2010 гг. и до 2020 г.).

В соответствии с Распоряжением Правительства Российской Федерации от 6 декабря 2017 г. и согласно приказу Федерального агентства по недропользованию от 13 декабря 2017 г. Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» преобразован в Федеральное государственное бюджетное учреждение – ФГБУ «ЦНИГРИ». С 20 апреля 2018 г. институт продолжает работу по важнейшим рудных районах страны, действуя по Государственному заданию своего учредителя – Федерального агентства по недропользованию. Кроме того, ФГБУ «ЦНИГРИ» осуществляет внебюджетную деятельность.

В настоящий момент численность института 260 человек, в том числе 10 докторов и 50 кандидатов наук. Внутренняя структура института соответствует современным задачам. Сегодня в ФГБУ «ЦНИГРИ» четыре научно-исследовательских блока: отделение геологоразведочных работ, научно-методическое отделение, отделение минерально-сырьевой базы, научно-информационное отделение.

Богатый опыт специалистов института позволяет ФГБУ «ЦНИГРИ» сохранять прочные позиции в следующих областях деятельности:

- прогноз, поиски и оценка месторождений (в том числе экзогенных) благородных, цветных



На рассмотрении результатов ГРП по объектам государственного заказа, 2019 г.

металлов и алмазов, оценка и апробация прогнозных ресурсов;

- разработка научно-методических основ, технологий, методов и методик прогноза, поисков, оценки и разведки месторождений цветных, благородных металлов и алмазов;
 - научно-методическое обеспечение и сопровождение геологоразведочных работ на твёрдые полезные ископаемые;
 - обоснование постановки поисковых и оценочных работ в Российской Федерации;
 - прикладная металлургия, построение геолого-поисковых моделей и совершенствование прогнозно-поисковых комплексов;
 - изотопные и минералого-геохимические исследования руд и пород;
 - анализ перспектив развития минерально-сырьевой базы золота, цветных металлов и алмазов РФ и её регионов, мировой конъюнктуры минерального сырья, разработка долгосрочных государственных программ;
 - подготовка предложений по формированию программы ГРП за счёт федерального бюджета.
- ФГБУ «ЦНИГРИ» постоянно расширяет взаимодействие с недропользователями, с крупными российскими компаниями в области прогноза и поисков золотого, медно-порфирового, медно-никелевого, кобальтового, платиноидного, колчеданно-полиметаллического оруденения и алмазов. Сегодня основа реализации любого проекта – квалифицированно выстроенная многофакторная

модель объекта прогноза и поисков, и специалисты ЦНИГРИ обладают необходимым опытом, знаниями строения, состава и генезиса месторождений для создания таких прогнозно-поисковых моделей. Особенно перспективно сотрудничество при работах на коренное и россыпное золото в Сибири, на Урале и Дальнем Востоке, в ходе которых необходимо дать прогноз о наличии оруденения, локализовать перспективные участки, обеспечить научно-методическое сопровождение поисковых работ, исследовать вещественный состав минералов и руд, оценить прогнозные ресурсы, разработать ТЭО кондиций, подготовить проекты ГРП и провести подсчёт запасов. Это – великолепная школа для молодых сотрудников института, перенимающих бесценный опыт у старших коллег.

Актуальность исследований института определяется активным участием ФГБУ «ЦНИГРИ» в решении сложнейших задач отрасли, связанных со снижением количества месторождений, выходящих на дневную поверхность, усложнением поисковых обстановок, увеличением затрат на ГРП в слабоизученных районах.

Одно из приоритетных направлений работы ФГБУ «ЦНИГРИ» состоит в совершенствовании оригинальных методических подходов института, позволяющих вести успешный поиск скрытого оруденения в слабо изученных районах Арктической зоны и Дальнего Востока России. Это прежде всего инновационная методика поисков перекрытых

золоторудных месторождений в сложных горно-таёжных условиях в районах развития мерзлоты и ионно-сорбционный метод поисков полиметаллических месторождений, а также методические разработки по поискам скрытых алмазных месторождений в районах со сложным геологическим строением.

В XXI в., развивая традиционные для института направления исследований, руководство ЦНИГРИ ставит перед коллективом новые задачи: особое значение приобретает внедрение в практику геологоразведочных работ информационных технологий, включая создание электронных банков данных, ГИС-технологий при составлении карт, построении прогнозов, интерпретации данных дистанционного зондирования Земли и т.д. Сотрудники института изучают и развивают современные методики геолого-экономического моделирования и оценки прогнозных ресурсов и запасов месторождений, принимая во внимание не только российский, но и международный опыт; разрабатывают информационно-аналитическую систему мониторинга технико-экономических показателей освоения месторождений.

ФГБУ «ЦНИГРИ» развивает международное сотрудничество. В разные годы велись совместные работы с зарубежными геологическими службами и фирмами в более чем 50 странах мира, в том числе в Алжире, Болгарии, Венгрии, Венесуэле, Греции, Иране, Испании, на Кипре, в КНР, Марокко, Монголии, Перу, Словакии, США, Чехии, Чили. В настоящее время представители института принимают участие в рабочих встречах межправительственных комиссий (ЮАР, Венесуэла, Куба, Гайана и др.). Институт взаимодействует с Геологической службой КНР и Академией наук Китая, участвует в совместных геологоразведочных проектах с иностранными компаниями (Мавритания). Сотрудники ЦНИГРИ состоят в российских (ЕОЭН, Ассоциация геологических организаций, ЭТС ГКЗ и др.) и зарубежных (IAGOD, SGA, SEG, EAG) профессиональных сообществах.

Важнейшее условие решения всех вышеназванных задач – развитие кадрового потенциала института. Следует упомянуть, что с 1967 г. на диссертационных советах института защищено 293 диссертации, из них 49 докторских и 244 кандидатских. В 2018–2019 гг. активизирована работа



Рабочее совещание представителей ФГБУ «ЦНИГРИ» и Геологической службы Китая. Пекин, 2018 г.



Делегация ЦНИГРИ на российско-китайском ЭКСПО, 2019 г.

аспирантуры и диссертационного совета ЦНИГРИ по защите кандидатских и докторских диссертаций по специальности 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения» (единственного в системе научно-исследовательских институтов Роснедр). Так, в 2019 г. в аспирантуру ФГБУ «ЦНИГРИ» поступило шесть молодых сотрудников. В 2017–2019 гг. на диссертационном совете ЦНИГРИ состоялись защиты трёх докторских и одной кандидатской диссертаций.

В институте работает Совет молодых учёных и специалистов, деятельность которого направлена на привлечение в институт талантливой молодёжи, активизацию производственной и научной деятельности, содействие созданию условий для их профессионального и административного роста и т.д. В феврале 2020 г. при активном участии Совета проведена I Молодёжная научно-образовательная конференция ЦНИГРИ «Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче».

В ЦНИГРИ начала функционировать учебная кафедра прогноза, поисков и разведки рудных месторождений МГРИ. Её профессорско-преподавательский состав целиком состоит из сотрудников института. Главная задача – практическая подготовка студентов МГРИ по специальности «Прикладная геология, поиски и разведка месторождений твёрдых полезных ископаемых».

Как учредитель научных журналов «Руды и металлы» и «Отечественная геология» и издатель сборника «Труды ЦНИГРИ» (с 1936 по 1993 гг.), институт на протяжении многих лет всемерно содействует наращиванию интеллектуального потенциала отечественной геологоразведочной отрас-

ли. Научно-техническая библиотека, геологические фонды и постоянно действующая выставка-музей «Руды благородных, цветных металлов и алмазов» обеспечивают специалистов ЦНИГРИ и других профильных организаций разнообразными видами геологических данных. В фондах содержится более 12 000 отчётов по результатам НИР и ГРР, около 100 000 карт и аэрофотоснимков, более 7000 единиц архивных геологических материалов. Библиотечный фонд составляет около 100 000 единиц хранения. Выставка ЦНИГРИ «Руды благородных, цветных металлов и алмазов» содержит уникальную коллекцию образцов более чем 500 месторождений золота, цветных металлов и алмазов со всей территории Российской Федерации и важнейших рудных районов стран ближнего и дальнего зарубежья.

Результаты исследований ЦНИГРИ получили общественное признание. Премий Правительства РФ удостоены работы «Экзогенная золотоносность и платиноносность Российской Федерации – комплект карт» (2000), «Научное обоснование, создание и реализация системы прогноза и воспроизводства минерально-сырьевой базы благородных и цветных металлов Российской Федерации» (2007), «Создание в условиях Крайнего Севера высокотехнологичного производства по добыче и переработке золотосодержащих руд при промышленном освоении месторождения «Олимпиадинское»» (2007). Работа «Национальная минерально-сырьевая безопасность» отмечена премией им. А. Н. Косыгина (2011). За последние 20 лет лауреатами премий Правительства России стали 15 сотрудников института (из них пятеро – дважды), семеро получили правительственные награды РФ, 55 присвоено звание «Почётный разведчик недр». В 2019 г. научный руководитель ЦНИГРИ А. И. Иванов на-



Генеральный директор ФГБУ «ЦНИГРИ» А. И. Черных на Саммите «Россия–Африка». Сочи, 2019 г.



Участники I Молодёжной научно-практической конференции «Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче», 2020 г.

граждён Почётной грамотой Президента Российской Федерации.

С 2000 г. ЦНИГРИ принял участие в 46 международных и 27 российских выставках, на которых его экспозиции отмечены 40 дипломами и 18 медалями. Ежегодно ЦНИГРИ проводит научно-практическую конференцию «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов». В 2000–2019 гг. институт участвовал в 37 международных конгрессах, форумах, конференциях, совещаниях, 66 всероссийских научно-практических конференциях, симпозиумах, круглых столах, семинарах, научных чтениях. Начиная с 2000 г., сотрудники ЦНИГРИ написали и издали 96 монографий и учебников, вышло 1455 публикаций в

периодических изданиях (статьи, доклады и тезисы докладов).

Накопленные информационные ресурсы, интеллектуальный потенциал и комплексный характер исследований служат гарантией слаженной и эффективной деятельности ЦНИГРИ.

История института тесно связана с историей страны, с развитием отечественной горнодобывающей отрасли. И самым ценным капиталом ЦНИГРИ всегда были люди – яркие лидеры, высокие профессионалы. Оглядываясь назад, мы понимаем, что в истории института не было ничего случайного. Иногда говорят, что открытие месторождений – в определённой степени везение. Но в основе открытий всегда – фундаментальные научные знания и огромный труд.

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ХРОМИТОНОСТИ УЛЬТРАМАФИТОВ БАЙКАЛО-МУЙСКОГО ОФИОЛИТОВОГО ПОЯСА, СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ

В работе использован нетрадиционный петрохимический метод оценки потенциальной хромитонности ультрамафитов Парамского и Шаманского массивов, являющихся фрагментами Байкало-Муйского офиолитового пояса в северо-восточном Прибайкалье. Этот метод основан на анализе результатов петрохимического изучения ультрамафитов, охватывающего всю площадь исследуемых массивов. Ранее этим методом нами были изучены хромитонные массивы ультрамафитов Куртушибинского офиолитового пояса в северо-восточной части Западного Саяна, в которых были выявлены перспективные площади. Ранее в пределах Парамского и Шаманского массивов предыдущими исследователями [7, 11, 18] были установлены редкие рудопоявления хромититов. Нами предпринята попытка оценить потенциальную хромитонность изученных массивов предложенным нетрадиционным петрохимическим методом и установить связь оруденения с химизмом вмещающих ультрамафитов, что определяет актуальность настоящего исследования.

Ключевые слова: офиолиты, ультрамафиты, пластические деформации, дуниты, гарцбургиты, хромититы, петрография, петрохимия, потенциальная оценка, Северо-Восточное Прибайкалье.

Объекты настоящего исследования – ультрамафиты Парамского и Шаманского массивов, являющихся наиболее крупными фрагментами Байкало-Муйского офиолитового пояса [6], расположенного в северо-восточном Прибайкалье (рис. 1). Парамский массив имеет линзовидную форму и прослеживается в меридиональном направлении примерно на 20 км при ширине до 4 км. Его общая площадь достигает 80 км², в центральной части он пересекается р. Витим (см. рис. 1, а). Шаманский массив расположен на правом берегу р. Витим (см. рис. 1, б). В плане его линзовидное тело вытянуто в северо-северо-западном направлении на расстояние ~ 25 км при максимальной ширине ~ 6 км. Общая площадь выходов массива составляет ~ 110 км². Исследуемые массивы имеют субвертикальные тектонические контакты с вмещающими метаморфическими образованиями протерозойского возраста. Дизъюнктивными нарушениями массивы расчленены на линзы и блоки. В Парамском массиве отмечаются тектонические клинья вмещающих пород.

Парамский и Шаманский массивы сложены главным образом породами дунит-гарцбургитового полосчатого комплекса [5, 9]. Наиболее отчетливо полосчатость наблюдается в гарцбургитах и устанавливается по параллельной ориентировке струйчатых обособлений, обогащенных ортопироксеном. Она нередко подчеркивается жилами и полосами дунитов среди гарцбургитов

Чернышов Алексей Иванович

доктор геолого-минералогических наук
заведующий кафедрой петрографии ¹
aich@ggf.tsu.ru

Лоскутов Илья Юрьевич

кандидат геолого-минералогических наук
ведущий научный сотрудник ²
ilia63@mail.ru

Пугачёва Елена Егоровна

кандидат технических наук
кандидат геолого-минералогических наук
ведущий эколог ³
pugachevatomsk@yandex.ru

¹ Томский государственный университет,
г. Томск,

² АО «Сибирский научно-исследовательский
институт геологии, геофизики
и минерального сырья»,
г. Новосибирск,

³ ОГБУ «Облкомприрода»,
г. Томск

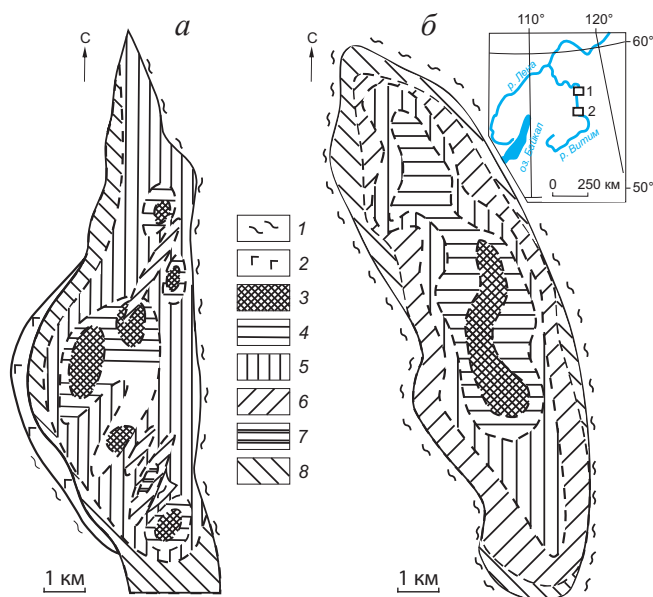


Рис. 1. СХЕМЫ ДИНАМОМЕТАМОРФИЧЕСКОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ ПАРАМСКОГО (а) И ШАМАНСКОГО (б) УЛЬТРАМАФИТОВЫХ МАССИВОВ (составлены авторами):

1 – вмещающие породы; 2 – габброиды; деформационные типы микроструктур ультрамафитов: 3 – протогранулярный, 4 – мезогранулярный, 5 – порфирукластовый, 6 – порфиroleйстовый, 7 – мозаично-лейстовый, 8 – мозаичный; на врезке географическое положение Парамского (1) и Шаманского (2) массивов

мощностью чаще до 1 м, реже от десятков до первых сотен метров. В зонах эндоконтактов и тектонических нарушений отмечаются серпентиниты. В обоих массивах ранее поисково-съёмочными работами были выявлены редкие рудопроявления хромититов [7, 18, 24].

Петроструктурная неоднородность ультрамафитов. Дуниты и гарцбургиты Парамского и Шаманского массивов пластически деформированы, что является неперенным атрибутом метаморфических перидотитов из офиолитовых комплексов [3, 8, 20]. Пластическое деформирование пород проявлено неравномерно, что отражено в их микроструктурных особенностях [19]. Типизация микроструктур дунитов и гарцбургитов в исследуемых массивах проводилась по морфологическим признакам оливина согласно классификации, предложенной французскими петрологами [25]. Микроструктуры оливина объединяются в шесть типов: протогранулярный, мезогранулярный, порфирукластовый, порфиroleйстовый, мозаичный и мозаично-лейстовый (рис. 2) [14, 17, 21]. Их по-

следовательность отражает возрастание степени пластического деформирования дунитов и гарцбургитов. Пространственное распределение выделенных микроструктур в изученных массивах от центра к периферии характеризуется тенденцией уменьшения зёрен в породах и отражает их динамометаморфическую зональность (см. рис. 1) [19, 20]. Подобные микроструктурные типы и динамометаморфическая зональность были установлены нами в Оспинском и Харанурском массивах Восточно-Саянского офиолитового пояса [4].

Протогранулярный тип микроструктуры оливина распространён незначительно и установлен в центральных частях массива. В этом типе оливин имеет максимальные размеры зёрен от 4–10 до 25 мм (см. рис. 2, а). Их форма субизометричная или неправильная с округлыми плавными границами, часто сходящимися под углом 120°, что является показателем равновесности этой структуры и её формирования в твёрдом субстрате [2]. Протогранулярный оливин отличается незначительной степенью пластических деформаций, которая фиксируется развитием единичных полос излома. Зёрна оливина обычно имеют однородное или слабоволнистое погасание; характерно отсутствие предпочтительной ориентировки по форме (таблица). Такой практически изотропный узор рассматривается как следствие возникновения неориентированной системы, при формировании которой зёрна пространственно равноосные [16].

Мезогранулярный тип микроструктуры значительно распространён в массиве. Он возникает на месте пород с протогранулярным типом микроструктуры и образует с ним постепенные переходы. Дуниты и гарцбургиты с мезогранулярным типом имеют гранобластовую микроструктуру (см. рис. 2, б), возникающую в результате распада крупных протогранулярных зёрен оливина на равновесные индивиды, что отражено в увеличении удельной протяжённости границ зёрен (см. табл.). Зёрна оливина имеют субизометричную либо слабо удлинённую форму, средний размер 4–5 мм, отмечается незначительная величина линейной ориентации (см. табл.). Границы зёрен обычно плавно изогнуты или прямолинейны и часто образуют тройные точки сочленения. Пластические деформации оливина проявляются в наличии полос пластического излома, обусловленных трансляционным скольжением. Погасание зёрен оливина обычно однородное или слабоволнистое.

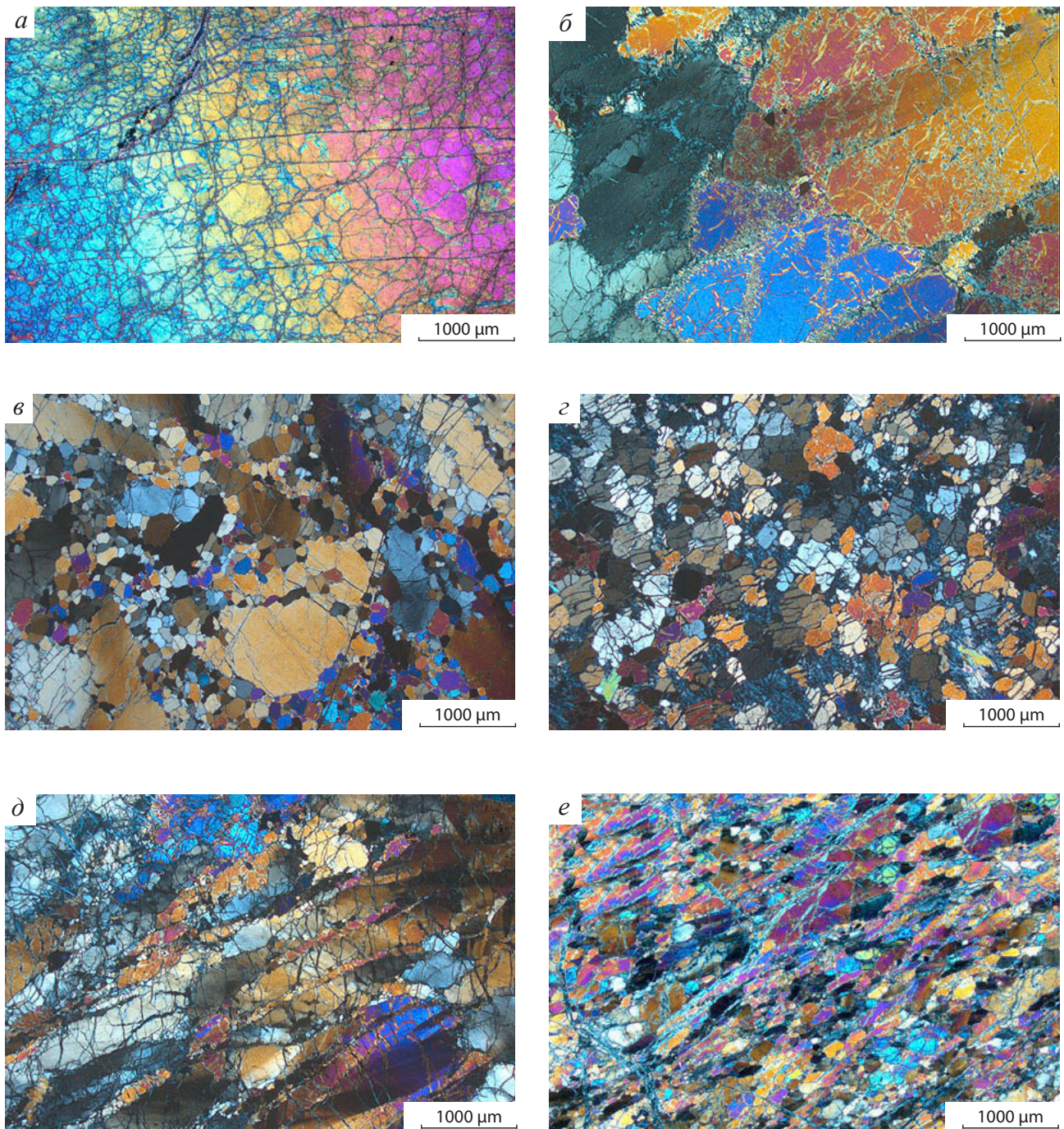


Рис. 2. ТИПЫ МИКРОСТРУКТУР ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ДУНИТОВ В ПАРАМСКОМ (Па) И ШАМАНСКОМ (Ш) МАССИВАХ:

a – протогранулярный (обр. Па-26/5); *б* – мезогранулярный (обр. Ш-32/6); *в* – порфирокластовый (обр. Ш-6/1); *г* – мозаичный (обр. Ш-41/5); *д* – порфиroleйстовый (обр. Ш-5/3); *е* – мозаично-лейстовый (обр. Па-59/2); фото с анализатором

УДЕЛЬНАЯ ПРОТЯЖЁННОСТЬ ГРАНИЦ ЗЁРЕН ОЛИВИНА И СТЕПЕНЬ ИХ ОРИЕНТАЦИИ В ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННЫХ УЛЬТРАМАФИТАХ

Образец	Тип микро-структуры	ΣS , см/см ²	$\Sigma S_{из.}$, см/см ²	$\Sigma S_{ор.}$, см/см ²	$\alpha_{ор.}$, %
Па-26/5	Прото-гранулярный	12,8	12,8	—	—
Ш-23/1		14,0	14,0	—	—
Па-12/4	Мезо-гранулярный	27,5	25,9	1,6	5,7
Ш-46/5		21,6	19,6	2,0	9,3
Па-26/7	Порфи-ро-кластовый	35,3	27,1	8,2	23,2
Ш-63/5		34,4	25,1	9,3	27,0
Па-2/3	Мозаичный	92,5	74,3	18,2	19,7
Па-31/6	Порфи-ро-лейстовый	51,9	20,4	31,5	60,7
Ш-43/1		41,2	18,3	22,9	55,6
Па-59/2	Мозаично-лейстовый	161,1	54,0	107,1	66,5

Примечание. Удельная протяжённость границ зёрен оливина: ΣS – общая, $\Sigma S_{из.}$ – изометричных зёрен, $\Sigma S_{ор.}$ – линейно ориентированных зёрен, $\alpha_{ор.}$ – степень ориентации зёрен оливина, %.

Порфи-ро-кластовый тип микроструктуры оливина ультрамафитов наиболее распространён в массивах. Его формирование связано с интенсивной синтетектонической рекристаллизацией зёрен прото- и мезогранулярного типов. В результате крупные пластически деформированные порфи-ро-класты оказываются среди мелкозернистого агрегата (см. рис. 2, в). Возрастание степени пластической деформации пород отражено в увеличении удельной протяжённости границ зёрен оливина (см. табл.). Порфи-ро-класты оливина с неровными, зубчатными границами имеют субизометричную, нередко удлинённую форму и часто отличаются заметным возрастанием степени линейной ориентации (см. табл.). Длина порфи-ро-клат от 1,5 до 5–7 мм, обычно они интенсивно пластически деформированы, характеризуются отчётливо выраженным неоднородным волнистым погасанием и многочисленными полосами излома. Мозаичный агрегат зёрен оливина формируется при синтетектонической рекристаллизации по границам крупных индивидов. При этом мозаичные агрегаты часто формируют субпараллельные по-

лосы, ориентированные согласно с удлинением порфи-ро-клат. Мелкие рекристаллизованные зёрна нередко развиваются по границам полос излома. Форма рекристаллизованных зёрен оливина обычно субизометричная, размер ~ 0,5 мм. В них также постоянно обнаруживают признаки пластической деформации (неоднородное волнистое погасание и полосы излома).

Порфи-ро-лейстовый тип микроструктуры оливина приурочен к зонам интенсивного пластического течения ультрамафитов. Он характеризуется отчётливой ориентировкой зёрен оливина (см. рис. 2, д). Этот тип отличается от порфи-ро-кластового более высокой удельной протяжённостью границ зёрен оливина и большей степенью ориентации его удлинённых индивидов (см. табл.). Порфи-ро-класты оливина представлены ленточными удлинёнными индивидами, имеющими строгую предпочтительную ориентировку по форме. Их размер по длинной оси составляет 1,5–3,5 мм при ширине 0,5–1,5 мм, отношение длины к ширине 3:1–5:1 и более. Границы порфи-ро-клат прямолинейные или с неровными зубчатными краями. Многочисленные полосы излома обычно ориентированы под углом ~ 45–60° к удлинению зёрен. Зёрна часто имеют симметричное перистое расположение в смежных индивидах по отношению к их удлинению. Полосы излома полисинтетического характера, при этом ширина ламелей 0,1–0,3 мм. По краям порфи-ро-клат наблюдаются синтетектонически рекристаллизованные мелкозернистые агрегаты оливина. Рекристаллизованные зёрна имеют как субизометричную, так и удлинённую форму (длина до 1 мм при ширине ~ 0,3 мм). Они ориентированы согласно с направлением удлинения крупных порфи-ро-клат, нередко обтекают их с образованием структур будинажа. Оливин в мелкозернистом агрегате сохраняет следы интенсивных пластических деформаций с проявлением неоднородного погасания и полос излома.

Мозаичный тип микроструктуры устанавливается в ультрамафитах эндоконтактных частей массивов. Он является результатом дальнейшего прогрессивного разрушения мезогранулярной и порфи-ро-кластовой микроструктур в результате синтетектонической рекристаллизации. Этот тип микроструктуры отличается присутствием мелкозернистого мозаичного агрегата субизометричных и слабоудлинённых зёрен оливина размером ~ 0,5 мм (см. рис. 2, з). Он характеризуется

значительным увеличением удельной протяжённости границ зёрен оливина и слабой степенью их ориентации (см. табл.). В зёрнах отмечается как однородное, так и волнистое погасание, редко проявляются полосы пластического излома.

Мозаично-лейстовый тип отражает максимальную степень пластической деформации ультрамафитов. Этот тип микроструктуры тесно ассоциирует с порфиroleйстовым и приурочен к центральным частям линейных зон интенсивных сдвиговых перемещений. Мозаично-лейстовый тип отличается наличием равномернoзернистого агрегата оливина с прямолинейными границами зёрен, имеющих линзовидную или лейстовую форму и характеризующихся строгой предпочтительной линейной ориентировкой (см. рис. 2, e). Зёрна оливина имеют максимальную удельную протяжённость границ и наиболее высокую степень ориентации (см. табл.). Длина зёрен составляет до 1 мм при ширине < 0,3 мм. Для зёрен оливина характерно волнистое погасание и перистые полосы излома, которые ориентированы симметрично границам смежных индивидов.

Оценка потенциальной хромитоносности массива. Потенциальная хромитоносность Парамского и Шаманского массивов оценивалась по петрохимическому методу, разработанному В. В. Велинским и И. Ю. Лоскутовым [1, 12]. Этот метод основан на анализе результатов петрохимического изучения образцов ультрамафитов, которые желательнее отбирать по сравнительно равномерной сетке с соответствующей привязкой точек отбора, охватывающих по возможности как можно большую площадь исследуемого массива.

Краткое описание методики. В каждой пробе силикатным химическим анализом определяются содержания SiO_2 , MgO , FeO , Fe_2O_3 , TiO_2 , Al_2O_3 , MnO , Cr_2O_3 , п.п.п (потеря продуктов при прокаливании, главным образом, воды). Далее рассчитываются показатели Z_1 , Z_2 и комплексный показатель Z_3 , как наиболее рельефно отражающий аномалии и используемый в дальнейшем.

$$1) Z_1 = y_1 M - y_2 h - y_3 i$$

$$2) Z_2 = x_1 \text{SiO}_2 - x_2 \text{TiO}_2 + x_3 \text{Al}_2\text{O}_3 - x_4 \text{Fe}_2\text{O}_3 + x_5 \text{FeO} - x_6 \text{MnO} + x_7 \text{MgO} + x_8 \text{Cr}_2\text{O}_3 - x_9 i$$

$$3) Z_3 = Z_1 + Z_2,$$

где y_{1-3} , x_{1-9} – константы, $M = \text{MgO}/\text{SiO}_2$, $h = \text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}) * 100$ %, содержание оксидов берётся в массовых процентах.

Положительные величины свидетельствуют о наличии хромитоносных (вмещающих хромитовые

руды) пород. Построение изолиний параметра (как для двухмерного, так и для трёхмерного опробования) позволяет выделить перспективные участки по положительным аномалиям.

Уравнения рассчитаны методом линейных дискриминантных функций по данным более 300 полных силикатных анализов Уральской складчатой области. Эффективность методики 90–95 % (теоретическая ошибка 5–10 %) [10].

Ограничения: 1) наложенные процессы магниевого метасоматоза (с образованием талька, магнезита, брусита) могут давать ложные аномалии, поэтому желательно на каждую пробу или часть проб, в зависимости от геологической ситуации, иметь петрографическую характеристику пород, т. е. необходимо построение петрографической карты массива; 2) желательно исследовать серпентинизированные породы или породы, представленные серпентинитами, так как коэффициенты рассчитывались по серпентинитам Уральской складчатой области; 3) выветрелые разновидности серпентинитов нежелательны для опробования.

Апробация. На Тогул-Сунгайском массиве (Салаир) по данной методике выделено три перспективных площади для заверочного бурения, на двух из которых скважинами (300 м) подсечены небольшие зонки (до 5 см) со сливным и густовкрапленным хромитовым оруденением. Попадает в выделенные бесперспективные площади около 14 % хромовой минерализации, что ещё раз показывает действенность метода для сокращения поисковых площадей.

Детальная проверка различных методов интерполяции точно заданной функции с построением карты изолиний была проведена на Тогул-Сунгайском массиве в 1990-х годах [10]. Там при неравномерной, сравнительно густой сети опробования разные методы интерполяции (сплайны, полиномы различной степени) давали сходные результаты. Контур аномалий, конечно, менялись, но «ядра» крупных оставались примерно на тех же местах. Появлялись новые малоамплитудные как положительные, так и отрицательные аномалии. В области экстраполяции полиномы различных степеней, давая сильные краевые эффекты, показали себя малоэффективными. Поэтому основным при построении карт изолиний стал метод сплайн-функции, дающий наиболее «гладкую» аппроксимирующую поверхность без значительных краевых эффектов. Метод линейных дискриминантных функций является чисто эмпиричес-

ким, что, впрочем, и является его достоинством: он независим от генетических построений для оруденения. Поэтому подвести под него петрологическую базу довольно сложно, и это является отдельной, достаточно большой работой.

Ранее этим методом нами проведена прогнозная оценка на хромититы Калнинского и Эргакского массивов в Западном Саяне. Были выделены перспективные площади, которые хорошо сопоставляются с известными рудопроявлениями и рудными зонами в этих массивах [13].

При оценке перспектив Парамского и Шаманского массивов на хромититы использовались результаты 223 оригинальных силикатных анализов (49 из первого массива и 174 из второго), которые были получены в процессе проведения научно-исследовательских работ по изучению ультрамафитов Байкало-Муйского офиолитового пояса. В каждом образце силикатным химическим анализом определялись содержания SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , FeO , п.п.п. в массовых процентах, по которым был рассчитан комплексный петрохимический показатель Z_3 . По полученным значениям были построены гистограммы распределения показателя Z_3 для исследуемых массивов (рис. 3).

Как видно из гистограммы (см. рис. 3, а), ультрамафиты Парамского массива характеризуются преимущественно положительными значениями Z_3 (до 40), ультрамафиты с отрицательными значениями этого параметра распространены крайне редко. Значительная часть анализов приходится на благоприятные на хромитонность ультрамафиты ($Z_3 = 0 \div 15$), при этом перспективные ($Z_3 = 15 \div 25$) и наиболее перспективные ($Z_3 > 25$) ультрамафиты составляют значительную часть выборки. Такое распределение показателя Z_3 в ультрамафитах Парамского массива указывает на его высокую потенциальную хромитонность.

Ультрамафиты Шаманского массива отличаются распределением показателя Z_3 (см. рис. 3, б). Повышается количественная роль неперспективных на хромитонность ультрамафитов ($Z_3 < 0$). Наибольшая часть анализов соответствует благоприятным на хромитонность ультрамафитам ($Z_3 = 0 \div 15$). Количество перспективных на хромиты ультрамафитов такое же, как в Парамском массиве ($Z_3 = 15 \div 25$). При этом процент наиболее перспективных ультрамафитов ($Z_3 > 25$) становится незначительным. Таким образом, перспективность ультрамафитов Шаманского массива на обнаружение хромитов остаётся довольно значительной, однако не настолько высокой, как Парамского.

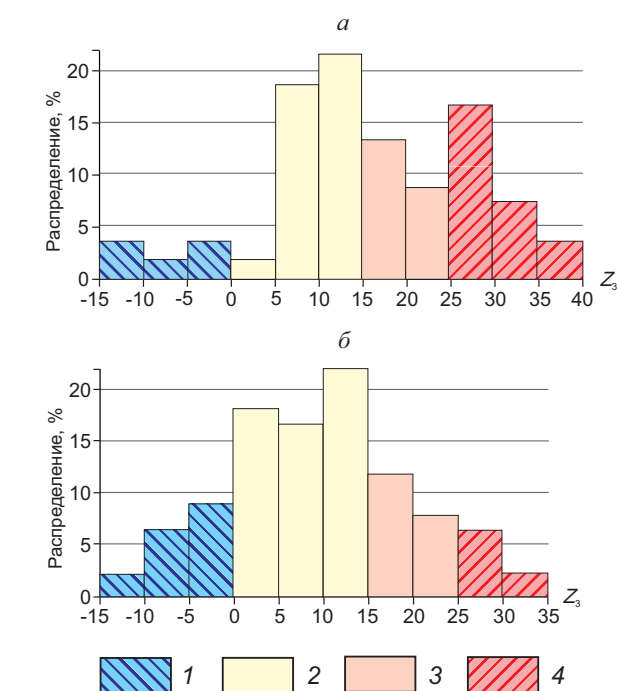


Рис. 3. ГИСТОГРАММЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕТРОХИМИЧЕСКОГО ПОКАЗАТЕЛЯ (Z_3) ДЛЯ УЛЬТРАМАФИТОВ МАССИВОВ:

а – Парамского ($n=49$); б – Шаманского ($n=174$); ультрамафиты со значением петрохимических показателей: 1 – неперспективные на хромитонность; 2 – благоприятные; 3 – перспективные; 4 – наиболее перспективные

трамафитов Шаманского массива на обнаружение хромитов остаётся довольно значительной, однако не настолько высокой, как Парамского.

Большой практический интерес представляет площадное распределение данного комплексного показателя в виде изолиний, которое позволяет выделять перспективные участки исследуемых массивов на хромитовое оруденение (рис. 4).

В Парамском массиве наиболее перспективные участки приурочены к центральной части массива, преимущественно в левобережье р. Витим (см. рис. 4, а). В этой части массива ранее при съёмочных работах были обнаружены два рудопроявления сливных хромититов и одно – прожилково-вкрапленных [24]. В 1988 г. при проведении научно-исследовательских полевых работ в правом борту р. Витим нами было выявлено пластобразное тело густовкрапленных хромититов мощностью до 1 м. Согласно полосчатости вмещающих ультрамафитов, оно имеет субширотное залегание [20].

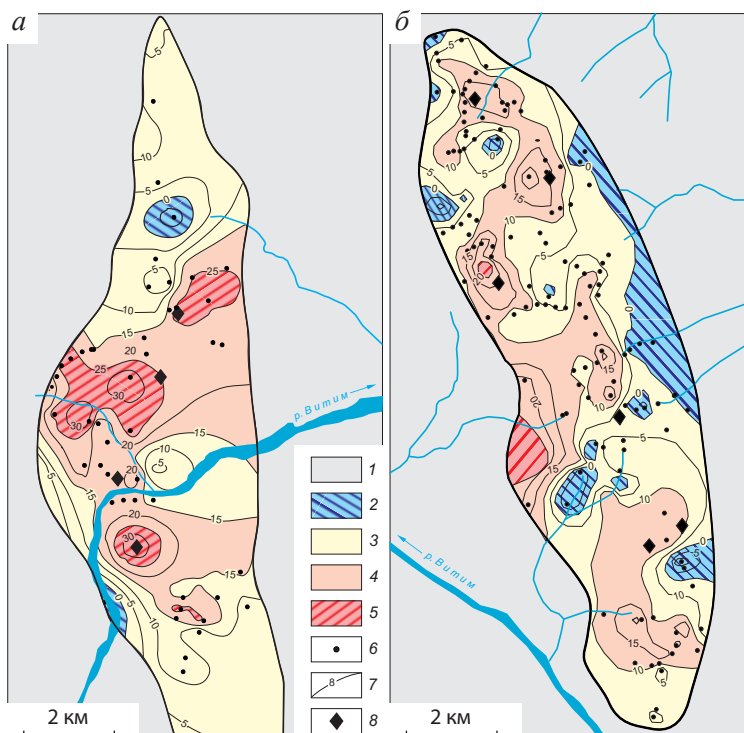


Рис. 4. ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ХРОМИТОНОСНОСТИ ПАРАМСКОГО (а) И ШАМАНСКОГО (б) УЛЬТРАМАФИТОВЫХ МАССИВОВ:

1 – вмещающие породы; участки: 2 – неперспективные на хромитонасность, 3 – благоприятные, 4 – перспективные, 5 – наиболее перспективные; б – точки петрохимического опробования; 7 – изолинии комплексного петрохимического показателя Z_3 ; 8 – рудопроявления хромитов; изолинии Z_3 проведены через 5 ед.

В Шаманском массиве известные рудопроявления хромитов с прогнозными ресурсами [7, 11, 18] располагаются преимущественно в перспективных участках с высокими значениями Z_3 или вблизи них. Они представлены вкрапленными, сливными и нодулярными хромититами.

Сопоставление прогнозных схем исследуемых массивов с их динамометаморфической зональностью показало, что пластические деформации, которые были наложены на ультрамафиты, не обнаруживают какой-либо связи с распределением хромитонасности. Очевидно, образование исходных хромитовых тел происходило в глубинных условиях в процессе высокотемпературного пластического течения мантийного вещества в зонах интенсивного рестирования, которое способствовало метаморфической сегрегации хромшпинелидов на рудные тела [15, 22, 23]. В последующей эволюции в процессе перемещения в верхние части земной коры ультрамафиты подвергались интенсивным

пластическим деформациям. На этом этапе хромитовые тела, очевидно, подвергались деструкции и дезинтегрированию с образованием более мелких линзовидных блоков, которое, вероятно, сопровождалось выдавливанием из них пластичного оливина. В результате неравномерного выдавливания оливина сформировались хромитовые тела с густовкрапленной и сливной структурами.

Таким образом, полученные результаты исследования как Парамского, так и Шаманского массивов подтверждают ранее установленную связь вещественного состава ультрамафитов с наличием или отсутствием в них хромитовой минерализации. Вышеописанный петрохимический метод рекомендуется использовать в качестве дополнительного критерия при постановке детальных поисковых работ на хромититы не только на достаточно изученных, но и на других ультрамафитовых массивах офиолитовых комплексов в различных регионах складчатых областей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Велинский В. В., Лоскутов И. Ю. Дискриминантный анализ петрохимических признаков – эффективный метод оценки рудоносности геологических объектов (на примере массивов альпинотипных гипербазитов) // Гипербазитовые ассоциации складчатых областей. – 1991. – Вып. 6. – С. 28–32.
2. Вернон Р. Х. Метаморфические процессы. – М. : Недра, 1980. – 226 с.

3. Гончаренко А. И. Петроструктурная эволюция альпинотипных гипербазитов. – Томск : Издательство Томского университета, 1989. – 398 с.
4. Гончаренко А. И., Чернышов А. И. Деформационная структура и петрология нефритоносных гипербазитов. – Томск : Издательство Томского университета, 1990. – 200 с.
5. Грудинин М. И. Базит-гипербазитовый магматизм Байкальской горной области. – Новосибирск : Наука, 1979. – 156 с.
6. Добрецов Н. Л. Офиолиты и проблема Байкало-Муйского офиолитового пояса // Магматизм и метаморфизм зоны БАМ и их роль в формировании полезных ископаемых. – Новосибирск : Наука, 1983. – С. 11–19.
7. Долгушин С. С., Жабин В. В., Лоскутов И. Ю., Садур О. Г. Перспективы создания базы хромового сырья Сибири (в пределах Сибирского федерального округа). – Новосибирск : СНИИГиМС, 2019. – 239 с.
8. Колман Р. Г. Офиолиты. – М. : Мир, 1979. – 269 с.
9. Леснов Ф. П. Петрология Шаманского ультрамафитового массива (Восточное Забайкалье). – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. – 96 с.
10. Лоскутов И. Ю. Альпинотипные гипербазиты Центрального Салаира : специальность 04.00.08 «Петрография, вулканология» : автореф. дис. на соискание учёного степеней. канд. геол.-минерал. наук / Лоскутов Илья Юрьевич. – Новосибирск, 1993. – 21 с.
11. Лоскутов И. Ю., Асосков В. М. Оценка потенциальной хромитоносности Шаманского гипербазитового массива // Руды и металлы. – 2010. – № 6. – С. 32–36.
12. Лоскутов И. Ю., Велинский В. В. Петрохимические критерии оценки хромитоносности альпинотипных гипербазитов // Геология и геофизика. – 1989. – № 12. – С. 60–69.
13. Лоскутов И. Ю., Чернышов А. И., Кичеева А. В. Связь химизма и рудоносности гипербазитов Калнинского массива (Западный Саян) // Вестник Томского государственного университета. – 2015. – № 400. – С. 366–370.
14. Пугачёва Е. Е. Петрология гипербазитов Шаманского массива (Средневитимская горная область) : специальность 04.00.08 «Петрография, вулканология» : автореф. дис. на соискание учёного степеней. канд. геол.-минерал. наук / Пугачёва Елена Егоровна. – Томск : Издательство Томского государственного университета, 1996. – 18 с.
15. Савельев Д. Е., Сначев В. И., Савельева Е. Н., Бажин Е. А. Геология, петрогеохимия и хромитоносность габбро-гипербазитовых массивов Южного Урала. – Уфа : ДизайнПолиграфСервис, 2008. – 320 с.
16. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. – М. : Металлургия, 1970. – 376 с.
17. Тарасенко И. Г. Петрология ультрамафитов Парамского массива (Средне-Витимская горная страна) : специальность 04.00.08 «Петрография, вулканология» : автореф. дис. на соискание учёного степеней. канд. геол.-минерал. наук / Тарасенко Инна Геннадьевна. – Томск. – 1996. – 18 с.
18. Харитонов Ю. Ф., Четчин В. С., Шевчук Г. А. Минерально-сырьевые ресурсы Читинской области (инвестиционные предложения). – Чита : Читанедра – 2003. – 134 с.
19. Чернышов А. И. Петроструктурная эволюция оливинов в ультрамафитах Парамского и Шаманского массивов (Байкало-Муйский офиолитовый пояс) // Геология и геофизика. – 2005. – Т. 46, № 11. – С. 1121–1132.
20. Чернышов А. И. Ультрамафиты (пластическое течение, структурная и петроструктурная неоднородность) : Учебное пособие. – Томск : Чародей, 2001. – 214 с.
21. Чернышов А. И., Пугачёва Е. Е. Неоднородность пластических деформаций оливина в ультрамафитах Байкало-Муйского офиолитового пояса (Северо-Восточное Прибайкалье) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327, № 4. – С. 119–129.
22. Чернышов А. И., Юричев А. Н. Петроструктурная эволюция ультрамафитов Калнинского хромитоносного массива в Западном Саяне // Геотектоника. – 2013. – № 4. – С. 31–46.
23. Чернышов А. И., Юричев А. Н. Структурная эволюция дунитов и хромитов Харчерузского массива (Полярный Урал) // Геотектоника. – 2016. – № 2. – С. 62–77.
24. Шагжиев К. Ш. Геология и петрография Парамского и Шаманского гипербазитовых массивов (Средне-Витимская горная страна) : дис. на соискание учёного степеней. канд. геол.-минерал. наук / Шагжиев Карл Шагжиевич. – Томск. – 1972. – 271 с.
25. Mercier J-C. C., Nicolas A. Textures, structures and fabrics of upper mantle peridotites, as illustrated by xenoliths from basalts // Journal of Petrology. – 1975. – V. 16, № 1. – pp. 454–487.

REFERENCES

1. Velinskii V. V., Loskutov I. Yu. Diskriminantnyi analiz petrokhimicheskikh priznakov – effektivnyi metod otsenki rudonosnosti geologicheskikh ob'ektov (na pri-
mere massivov al'pinotipnykh giperbazitov) [The discriminant analysis of petrochemical features is an effective method for assessing the ore content of

- geological objects (for example, arrays of alpinotype hyperbasites)], *Giperbazitovye assotsiatsii skladchatykh oblastei* [Hyperbasic associations of folded areas], 1991, V. 6, pp. 28–32. (In Russ.).
2. Vernon R. Kh. *Metamorficheskie protsessy* [Metamorphic processes], Moscow, Nedra Publ., 1980, 226 p.
 3. Goncharenko A. I. *Petrostrukturnaya evolyutsiya al'pinotipnykh giperbazitov* [Petrostructural evolution of alpinotype hyperbasites], Tomsk, Izdatel'stvo Tomskogo universiteta Publ., 1989, 398 p.
 4. Goncharenko A. I., Chernyshov A. I. *Deformatsionnaya struktura i petrologiya nefritonosnykh giperbazitov* [The deformation structure and petrology of nephritic hyperbasites], Tomsk, Izdatel'stvo Tomskogo universiteta Publ., 1990, 200 p.
 5. Grudin M. I. *Bazit-giperbazitovyi magmatizm Baikalskoi gornoi oblasti* [Basite-hyperbasitic magmatism of the Baikal mountain region], Novosibirsk, Nauka Publ., 1979, 156 p.
 6. Dobretsov N. L. *Ofolity i problema Baikalo-Muiskogo ofolitovogo poyasa* [Ophiolites and the problem of the Baikal-Mui ophiolite belt], *Magmatizm i metamorfizm zony BAM i ikh rol' v formirovanii poleznykh iskopayemykh* [Magmatism and metamorphism of the BAM zone and their role in the formation of minerals], Novosibirsk, Nauka Publ., 1983, pp. 11–19.
 7. Dolgushin S. S., Zhabin V. V., Loskutov I. Yu., Sadur O. G. *Perspektivy sozdaniya bazy khromovogo syr'ya Sibiri (v predelakh Sibirskogo federal'nogo okruga)* [Prospects for creating a base of chromium raw materials in Siberia (within the Siberian Federal District)], Novosibirsk, SNIIGGIMS Publ., 2019, 239 p.
 8. Kolman R. G. *Ofolity* [Ophiolites], Moscow, Mir Publ., 1979, 269 p.
 9. Lesnov F. P. *Petrologiya Shamanskogo ul'tramafitovogo massiva (Vostochnoe Zabaikal'e)* [Petrology of the Shamanic ultramafic massif (Eastern Transbaikalia)], LAP LAMBERT Academic Publishing Publ., 2019, 96 p.
 10. Loskutov I. Yu. *Al'pinotipnye giperbazity Tsentral'nogo Salaira : spetsial'nost' 04.00.08 "Petrografiya, vulkanologiya" : avtoref. dis. na soiskanie uchen. step. kand. geol.-mineral. nauk* [Alpinotype Hyperbasites of Central Salair. Extended abstract of candidate's thesis], Novosibirsk, 1993, 21 p.
 11. Loskutov I. Yu., Asoskov V. M. *Otsenka potentsial'noi khromitonosnosti Shamanskogo giperbazitovogo massiva* [Assessment of the potential chromite content of the Shamanic hyperbasite massif], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2010, No 6, pp. 32–36. (In Russ.).
 12. Loskutov I. Yu., Velinskii V. V. *Petrokhimicheskie kriterii otsenki khromitonosnosti al'pinotipnykh giperbazitov* [Petrochemical criteria for evaluating the chromite content of alpinotype hyperbasites], *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 1989, No 12, pp. 60–69. (In Russ.).
 13. Loskutov I. Yu., Chernyshov A. I., Kicheeva A. V. *Svyaz' khimizma i rudonosnosti giperbazitov Kalninskogo massiva (Zapadnyi Sayan)* [The relationship of chemistry and ore-bearing hyperbasites of the Kalninsky massif (Western Sayan)], *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Tomsk State University Journal], 2015, No 400, pp. 366–370. (In Russ.).
 14. Pugacheva E. E. *Petrologiya giperbazitov Shamanskogo massiva (Srednevitimskaya gornaya oblast') : spetsial'nost' 04.00.08 "Petrografiya, vulkanologiya" : avtoref. dis. na soiskanie uchen. step. kand. geol.-mineral. nauk* [Petrology of the hyperbasites of the Shamansky massif (Mid-Vitim Mountains). Extended abstract of candidate's thesis], Tomsk, Izdatel'stvo Tomskogo gosudarstvennogo universiteta Publ., 1996, 18 p.
 15. Savel'ev D. E., Snachev V. I., Savel'eva E. N., Bazhin E. A. *Geologiya, petrogeokhimiya i khromitonosnost' gabbro-giperbazitovykh massivov Yuzhnogo Urala* [Geology, petrogeochemistry and chromite content of gabbro-hyperbasite massifs of the Southern Urals], Ufa, DizainPoligrafServis Publ., 2008, 320 p.
 16. Saltykov S. A. *Stereometricheskaya metallografiya* [Stereometric metallography], Moscow, Metallurgiya Publ., 1970, 376 p.
 17. Tarasenko I. G. *Petrologiya ul'tramafitov Paramskogo massiva (Sredne-Vitimskaya gornaya strana) : spetsial'nost' 04.00.08 "Petrografiya, vulkanologiya" : avtoref. dis. na soiskanie uchen. step. kand. geol.-mineral. nauk* [Petrology of the ultramafites of the Param massif (Mid-Vitim mountain country). Extended abstract of candidate's thesis], Tomsk, 1996, 18 p.
 18. Kharitonov Yu. F., Chechetkin V. S., Shevchuk G. A. *Mineral'no-syr'evye resursy Chitinskoi oblasti (investitsionnye predlozheniya)* [Mineral resources of the Chita region (investment proposals)], Chita, 2003, 134 p.
 19. Chernyshov A. I. *Petrostrukturnaya evolyutsiya olivinov v ul'tramafitakh Paramskogo i Shamanskogo massivov (Baikalo-Muiskii ofolitovyi poyas)* [Petrostructural evolution of olivines in ultramafic rocks of the Param and Shaman massifs (Baikal-Mui ophiolite belt)], *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2005, V. 46, No 11, pp. 1121–1132. (In Russ.).
 20. Chernyshov A. I. *Ul'tramafity (plasticheskoe techenie, strukturnaya i petrostrukturnaya neodnorodnost') : Uchebnoe posobie* [Ultramafites (plastic flow, structural and petrostructural heterogeneity): Textbook], Tomsk, Charodei Publ., 2001, 214 p.
 21. Chernyshov A. I., Pugacheva E. E. *Neodnorodnost' plasticheskikh deformatsii olivina v ul'tramafitakh Baika-*

- lo-Muiskogo ofiolitovogo poyasa (Severo-Vostochnoe Pribaikal'e) [Heterogeneity of plastic deformations of olivine in ultramafic rocks of the Baikal-Mui ophiolite belt (North-Eastern Baikal region)], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo-Assets Engineering], 2016, V. 327, No 4, pp. 119–129. (In Russ.).
22. Chernyshov A. I., Yurichev A. N. Petrostrukturnaya evolyutsiya ul'tramafitov Kalninskogo khromitonosnogo massiva v Zapadnom Sayane [Petrostructural evolution of ultramafic rocks of the Kalninsky chromite-bearing massif in the Western Sayan], *Geotektonika* [Geotectonics], 2013, No 4, pp. 31–46. (In Russ.).
 23. Chernyshov A. I., Yurichev A. N. Ctrukturnaya evolyutsiya dunitov i khromitov Kharcheruzskogo massiva (Polyarnyi Ural) [Structural evolution of dunites and chromites of the Kharcheruz massif (Polar Urals)], *Geotektonika* [Geotectonics], 2016, No 2, pp. 62–77. (In Russ.).
 24. Shagzhiev K. Sh. Geologiya i petrografiya Paramskogo i Shamanskogo giperbazitovykh massivov (Sredne-Vitimskaya gornaya strana) : dis. na soiskanie uchen. step. kand. geol.-mineral. nauk [Geology and petrography of the Param and Shaman hyperbasitic massifs (Mid-Vitim mountain country). Candidate's thesis], Tomsk, 1972, 271 p.
 25. Mercier J-C. C., Nicolas A. Textures, structures and fabrics of upper mantle peridotites, as illustrated by xenoliths from basalts, *Journal of Petrology*, 1975, V. 16, No 1, pp. 454–487.

FORECASTING EVALUATION OF THE CHROMITOSITY OF ULTRAMAFITE OF THE BAIKAL-MUYI OPHIOLITE BELT, NORTH-EAST OF THE BAIKAL REGION

Chernyshov A. I. (doctor of geological and mineralogical sciences, head of the department of petrography ¹)

Loskutov I. Yu. (PhD in geology and mineralogy, leading researcher ²)

Pugacheva E.E. (PhD in geology and mineralogy, PhD in technology, leading ecologist ³)

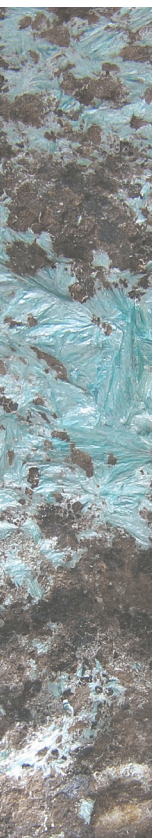
¹ Tomsk State University, Tomsk,

² JSC Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Novosibirsk,

³ SSBI «Oblkompriroda», Tomsk

An unconventional petrochemical method for assessing the potential chromite content of ultramafic rocks of the Paramsky and Shamansky massifs, which are fragments of the Baikal-Muyi ophiolite belt in the north-eastern Baikal region, was used in the work. This method is based on the analysis of the results of a petrochemical study of ultramafic rocks, covering the entire area of the studied massifs. Earlier, we used this method to study the chromite-bearing massifs of ultramafic rocks of the Kurtiboshinsky ophiolite belt in the north-eastern part of the Western Sayan, where the promising areas were identified. Within these massifs, previous researchers have established ore occurrences of chromitites, that confirms the relationship of mineralization with the chemistry of host ultramafic rocks. The studied Paramsky and Shamansky massifs have so far practically not been evaluated. However, chromite ore occurrences were noted on their areas, which determines the relevance of this study.

Keywords: ophiolites, ultramafites, plastic deformations, dunites, harzburgites, chromitites, petrography, petrochemistry, potential assessment method, Northeast Baikal region.





ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ; ОПЫТ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ ПРОГНОЗНОЙ ОЦЕНКЕ ОРУДЕНЕНИЯ

Основные задачи построения геохимических моделей рудных месторождений – обоснование прогноза оруденения на глубину, определение денудационного среза рудопроявлений, выявляемых при литохимических поисках по вторичным ореолам рассеяния, и таксирование рудных пересечений в метрике генетически однотипного хорошо изученного (эталонного) месторождения. Для прогнознй оценки исследуемых объектов на ранней стадии поисково-разведочных работ привлекается принцип геометрического и геохимического подобия генетически однотипных объектов. На основе построения обобщённых моделей разрезов полиметаллических месторождений в комплексе с геохимическими признаками даётся прогнозная оценка оруденения.

Ключевые слова: прогноз оруденения, коэффициент подобия, геохимическая зональность.

Повышение геологической эффективности геохимических исследований в рудных районах связано с обобщением накопленных эмпирических данных и построением моделей коренного оруденения важнейших формационных типов. Создание формализованных моделей и внедрение теоретических разработок в практику геологоразведочных работ позволяют увеличить надёжность геохимических прогнозов. Геохимические модели служат основой интерпретации аномалий и рудопроявлений, выявляемых литохимическими съёмками различных масштабов, оценки прогнозных ресурсов при геохимических поисках, прогноза оруденения на глубину и реконструкции рудных интервалов, уничтоженных эрозией.

Геохимические модели строятся на основе закономерностей формирования первичных ореолов рудных тел и зональности отложения элементов при рудообразовании. Геохимические модели месторождений разных формационных типов различаются между собой. Месторождения одного формационного типа подчиняются принципу геометрического и геохимического подобия. Этот принцип впервые был сформулирован А. П. Солововым [5].

Однотипные месторождения, отличающиеся по объёмам и запасам полезного ископаемого, характеризуются близкой формой с устойчивыми отношениями между размерами рудных залежей, их линейными и площадными продуктивностями. Этот признак проявляется лишь в известных пределах, а именно при условии, что проводимая аналогия между месторождениями учитывает своеобразие каждого из сопоставляемых объектов.

Миляев Сергей Анатольевич

кандидат геолого-минералогических наук
ведущий научный сотрудник
milyaev@tsnigri.ru

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

УДК 553.41`43`48:550.4

© С. А. Миляев, 2020

DOI: 10.24411/0869-5997-2020-10002

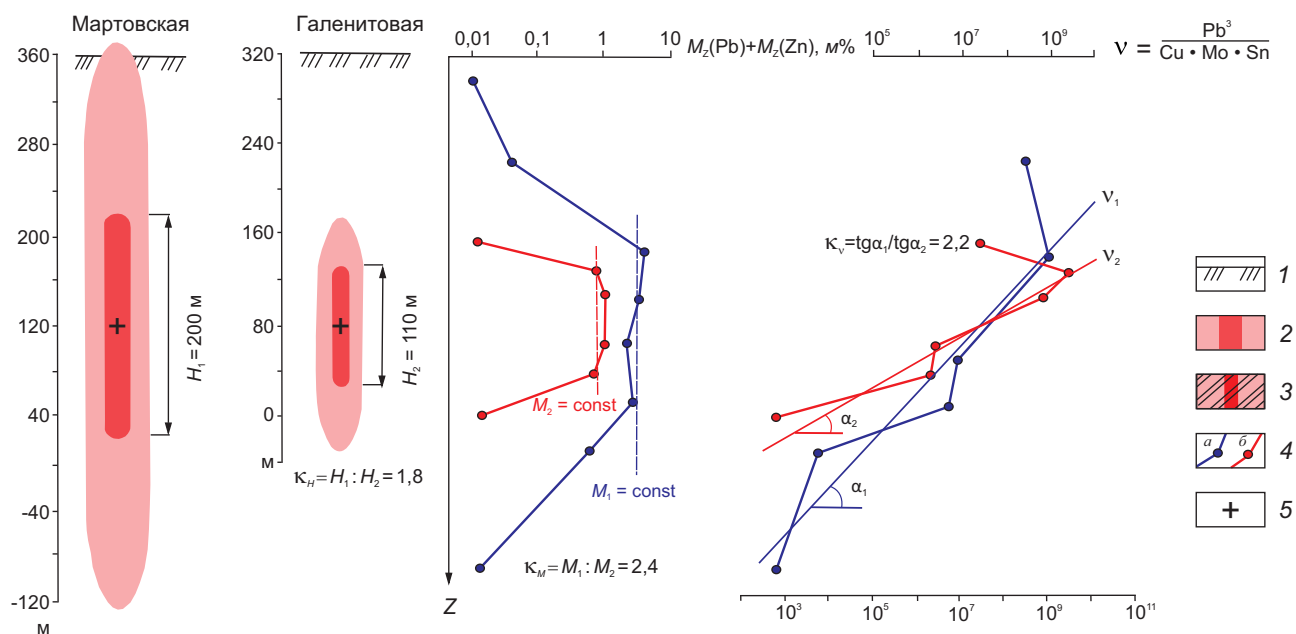


Рис. 1. МОДЕЛИ ДЛЯ ФИГУР ПОДОБИЯ С ОЦЕНКАМИ ДЛЯ МАРТОВСКОЙ И ГАЛЕНИТОВОЙ ЗАЛЕЖЕЙ САДОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ:

1 – дневная поверхность; 2 – рудные залежи и их первичные ореолы; 3 – часть рудной зоны, уничтоженная эрозией; 4 – графики линейных продуктивностей (M , м%) и показателя зональности (v) по падению рудных залежей Мартовской (а) и Галенитовой (б); 5 – отметка центра рудной залежи

Геохимическое подобие определяется однотипным характером эндогенной геохимической зональности, под которой понимают закономерное изменение в пространстве соотношений между надфоновыми содержаниями (или продуктивностями) двух или большего числа химических элементов. Количественными характеристиками оруденения в любой точке служат показатели геохимической зональности (v) – безразмерные величины отношений между содержаниями (или продуктивностями) химических элементов, типморфных для данного типа оруденения, одинаково убывающих в выбранном направлении.

Важнейшим следствием принципа геохимического подобия является то, что для геометрически одноимённых точек рудных залежей разных по масштабу запасов численные значения конкретного геохимического показателя зональности остаются величиной постоянной. При этом графики показателей зональностей, как функция глубин $v = f(z)$, построенные в полулогарифмическом масштабе, будут отличаться углами наклона α . Для объекта большей крупности характерен крутой

наклон графика показателя зональности (слабо-контрастная вертикальная зональность), более мелкого – пологий (контрастная вертикальная зональность). Коэффициент подобия κ определяется как отношение тангенсов соответствующих углов α_1 и α_2 , образованных осреднёнными графиками с осью абсцисс [б]:

$$\kappa = \text{tg}\alpha_1 : \text{tg}\alpha_2.$$

Пример геохимической характеристики двух хорошо разведанных слепых залежей скарново-полиметаллического месторождения Садовое в Дальнегорском районе Приморского края и частные оценки коэффициента подобия, полученные через отношения полной протяжённости залежей ($H_1 : H_2$), средних суммарных линейных продуктивностей ($M_1 : M_2$) свинца и цинка и тангенсы углов наклона графиков показателя геохимической зональности $v = \text{Pb}^3 / (\text{Cu} \cdot \text{Mo} \cdot \text{Sn})$ приведены на рис. 1.

Сопоставление двух залежей Садового месторождения по коэффициенту подобия показало, что независимые его определения через H , M , v характеризуются хорошей сходимостью ($\kappa_{\text{ср.}} = 2,1$) и малой величиной доверительного множителя

при оценке среднего ($\varepsilon = 1,1^{\pm 1}$). Соотношение полных объёмов Мартовской (V_1) и Галенитовой залежей (V_2), исходя из выражения $V_1 : V_2 = k^3$, составляет 9,3 : 1.

На основе рассмотренных зависимостей были построены геохимические модели и проведена оценка полиметаллических месторождений Рудного Алтая по данным их выборочного геохимического опробования и анализа эндогенной зональности оруденения. Исследования первичных ореолов и эндогенной зональности оруденения проводились в Зырянском и Лениногорском районах на хорошо разведанных Зырянском и Тишинском месторождениях, которые относятся к двум близким подтипам единой колчеданно-полиметаллической формации. Месторождения характеризуются различными моделями.

Колчеданно-полиметаллическое оруденение Зырянского и Лениногорского рудных районов приурочено к зонам интенсивно метасоматически изменённых и катаклазированных пород и руд с полной или частичной потерей первичных особенностей их строения. Воздействие наложенных на оруденение метаморфогенных, гидротермальных и магматических процессов привело к тому, что на всех объектах отмечается вертикальная геохимическая зональность.

Для построения геохимической модели Зырянского месторождения были привлечены данные по четырём месторождениям Зырянского района (Зырянскому, Снегирёвскому, 2-му Греховскому и Богатырёвскому). Близость геологических условий, морфологии рудных залежей, характера залегания руд и их вещественного состава находит отражение в распределении типоморфных элементов в рудах и первичных ореолах, что подтверждается данными изучения их геохимической зональности.

Основная задача исследования зональности хорошо разведанных месторождений – разработка геохимических критериев для оценки рудопроявлений той же рудной формации, выявляемых при поисках. Надёжность критериев обеспечивается одновременным изучением зональности ряда рудных объектов. Несмотря на некоторые различия в геологических и геоморфологических особенностях оруденения, месторождения Зырянского района можно рассматривать как генетически однотипные, что подтверждается близостью рядов вертикальной последовательности

отложения рудных элементов и наличием у них общих показателей зональности. Это допускает единый подход ко всей группе объектов при построении их формализованной модели. Задача может быть решена, если для данного формационного типа месторождений определены, по крайней мере, положения уровней, характеризующих верхний и нижний горизонты оруденения, и соответствующие им значения геохимических показателей зональности. В пределах одного разведочного профиля охватить весь интервал месторождения, от верхней до нижней выклинки, как правило, не удаётся в силу различных причин – эрозионного среза или отработанности и недоступности для геохимического опробования верхних уровней оруденения или недоразведанности нижних горизонтов. Восполнить этот пробел нередко удаётся за счёт геохимических данных по нескольким разведочным профилям того же месторождения. В других случаях это возможно сделать, проанализировав данные по нескольким однотипным месторождениям и построив обобщённую модель путём совмещения графиков v в общих точках. Численные значения геохимических показателей зональности для одноимённых горизонтов должны совпадать для всех однотипных месторождений. В реальных условиях порой наблюдаются значительные отклонения от этой идеальной картины. Уменьшить погрешность оценок оруденения позволяет привлечение нескольких геохимических показателей v . Определение верхнего и нижнего выклинивания оруденения проводится с помощью графиков линейных продуктивностей $M_z = f(z)$ основного компонента при условии устойчивого убывания величины M_z по восстанию от рудной залежи или с глубиной по падению подрудного ореола. Для построения формализованных моделей полиметаллических месторождений целесообразно использовать графики суммарной линейной продуктивности свинца и цинка $M_z = M_z(\text{Pb}) + M_z(\text{Zn})$, более устойчивой, чем продуктивность каждого элемента в отдельности.

Для рассматриваемых месторождений достаточно уверенно определяется верхнерудный уровень для Зырянского и нижнерудный для Богатырёвского месторождений. Выбрав по одному хорошо изученному разрезу на каждом месторождении, провели их совместную обработку. Исследования по программе «Ню-2» [4, 8], выполненные по схеме «объектов 4, min 4» с числом

уровней опробования на объектах 6 + 7 + 5 + 5, выявили девять монотонных геохимических показателей, одинаково убывающих на всех месторождениях. В табл. 1 приводятся рекомендуемые геохимические показатели и их граничные значения в различных интервалах рудных залежей. Полученные v позволяют проводить оценку уровней пересечений рудных тел в метрике обобщённой модели месторождений Зырянского района.

Построение обобщённой модели Зырянского месторождения основано на том же принципе подобия, а именно – объекты, относящиеся к одной формации, обладают сравнительным постоянством абсолютных содержаний основных компонентов в геометрически одноимённых точках рудных залежей и характеризуются близкими соотношениями содержаний типоморфных элементов. По показателям зональности проведена экстраполяция осреднённых графиков Зырянского месторождения до значений v , соответствующих границе нижнерудного – подрудного интервалов (см. табл. 1). Это позволило определить полную протяжённость рудной залежи Зырянского месторождения, которая составила 1410 м. Модель месторождения представлена рудной зоной с двумя рудными залежами в ядре крутопадающей изоклинальной складки, сложенной вулканитами кислого состава, крылья складки представлены кремнистыми и известковистыми алевролитами (рис. 2).

Аналогичным образом установлена полная протяжённость рудных интервалов месторождений до начала эрозии, в м: для 2-го Греховского – 720, Снегирёвского – 710, Богатырёвского – 480.

Для прогнозной оценки выбраны семь показателей зональности без участия в них главных рудных элементов свинца и цинка. По основным рудным компонентам оценены устойчивые значения продуктивностей $M_z = \text{const}$ по рудным зонам месторождений (рис. 3) и определён показатель подобия k_m через отношение линейных продуктивностей объекта к эталону. За эталон выбран профиль 6 Зырянского месторождения, параметры которого приняты за единицу. Одновременно по отношению тангенсов углов наклона графиков v по каждому из семи показателей зональности оценено среднее значение k_v для каждого из месторождений и определены величины доверительного множителя при оценке среднего (ϵ). Доверительный множитель ϵ позволяет по критерию Стьюдента оценивать статистическую значимость различий полученных оценок. Резкое возрастание доверительного множителя свидетельствует о генетических различиях между месторождениями. Такой же результат может быть получен при неудовлетворительном качестве и неполноте геохимического опробования или низкой точности анализа. В нашем случае среднее значение доверительного множителя при таксировании одноимённых уровней составило $\epsilon = 1,17^{\pm 1}$,

1. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЗОНАЛЬНОСТИ КОЛЧЕДАННО-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗЫРЯНОВСКОГО РАЙОНА

Интервалы	Hg-Cd/ Cu-Mo	Sb-Ba/ Co ²	Ba-Ag/ Cu-Bi	Ba-Cd/ Cu-Bi	Ba-Sb/ Bi-Sn	Sb-Cd/ Bi-Sn	Pb-Sb/ Bi-Sn	Zn-Sb/ Bi-Sn	Zn-Ba/ Cu-Bi
Надрудный	$> 4,2 \cdot 10^{-3}$	$> 7,5 \cdot 10^4$	$> 7,9 \cdot 10^1$	$> 3,8 \cdot 10^2$	$> 2,7 \cdot 10^4$	$> 8,9 \cdot 10^2$	$> 1,8 \cdot 10^5$	$> 3,0 \cdot 10^5$	$> 1,2 \cdot 10^5$
Верхнерудный	$4,2 \cdot 10^{-3}$ $3,9 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^4$ $2,4 \cdot 10^3$	$7,9 \cdot 10^1$ $8,5 \cdot 10^0$	$3,8 \cdot 10^2$ $3,1 \cdot 10^1$	$2,7 \cdot 10^4$ $9,3 \cdot 10^2$	$8,9 \cdot 10^2$ $3,9 \cdot 10^1$	$1,8 \cdot 10^5$ $7,1 \cdot 10^3$	$3,0 \cdot 10^5$ $1,6 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^5$ $9,3 \cdot 10^3$
Среднерудный	$3,9 \cdot 10^{-4}$ $3,5 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^3$ $7,4 \cdot 10^1$	$8,5 \cdot 10^0$ $9,2 \cdot 10^{-1}$	$3,1 \cdot 10^1$ $2,5 \cdot 10^0$	$9,3 \cdot 10^2$ $3,2 \cdot 10^1$	$3,9 \cdot 10^1$ $1,7 \cdot 10^0$	$7,1 \cdot 10^3$ $2,8 \cdot 10^2$	$1,6 \cdot 10^3$ $8,1 \cdot 10^2$	$9,3 \cdot 10^3$ $7,2 \cdot 10^2$
Нижнерудный	$3,5 \cdot 10^{-5}$ $3,2 \cdot 10^{-6}$	$7,4 \cdot 10^1$ $2,3 \cdot 10^0$	$9,2 \cdot 10^{-1}$ $1,0 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^0$ $2,0 \cdot 10^{-1}$	$3,2 \cdot 10^1$ $1,1 \cdot 10^0$	$1,7 \cdot 10^0$ $7,5 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^2$ $1,1 \cdot 10^1$	$8,1 \cdot 10^2$ $4,2 \cdot 10^1$	$7,2 \cdot 10^2$ $5,6 \cdot 10^1$
Подрудный	$< 3,2 \cdot 10^{-6}$	$< 2,3 \cdot 10^0$	$< 1,0 \cdot 10^{-1}$	$< 2,0 \cdot 10^{-1}$	$< 1,1 \cdot 10^0$	$< 7,5 \cdot 10^{-2}$	$< 1,1 \cdot 10^1$	$< 4,2 \cdot 10^1$	$< 5,6 \cdot 10^1$
Размах (R)	> 1300	$> 32\ 000$	> 790	> 1900	$> 24\ 000$	$> 12\ 000$	$> 16\ 000$	> 7100	> 2100

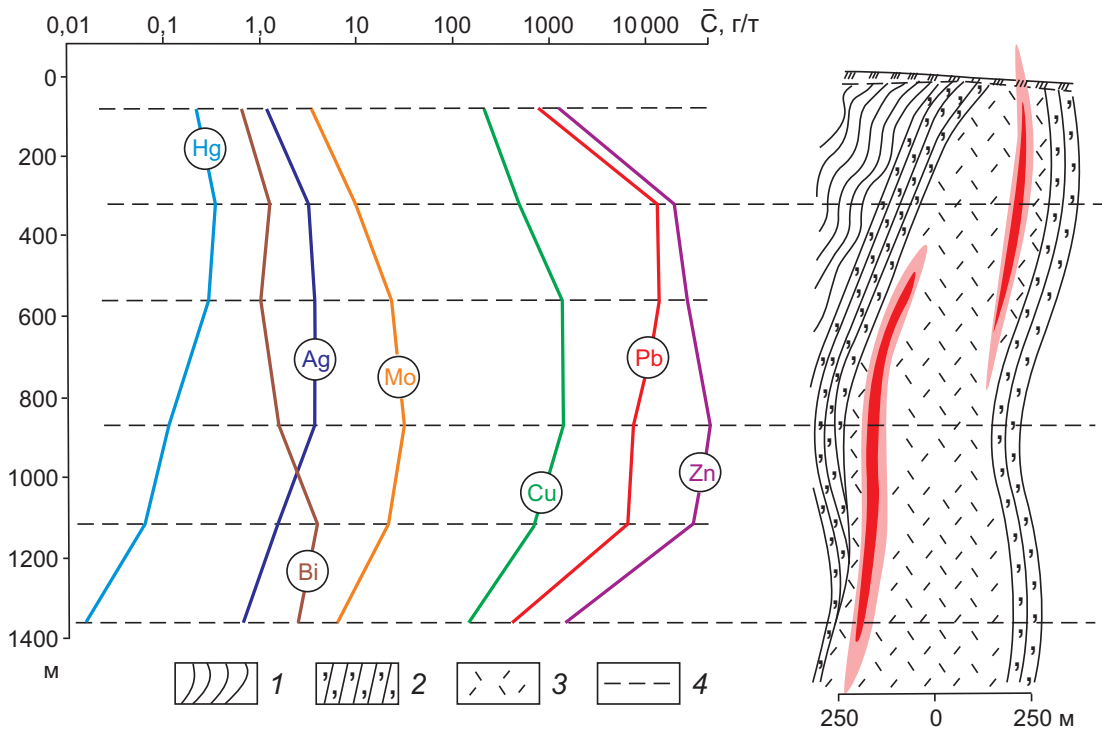


Рис. 2. ФОРМАЛИЗОВАННАЯ ГЕОХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗЫРИНОВСКОЕ:

1 – углисто-глинистые сланцы, известняки, песчаники; 2 – известково-кремнистые алевролиты; 3 – вулканы кислого состава; 4 – горизонты рудной зоны; остальные усл. обозн. см. рис. 1

что отвечает условиям хорошей сходимости получаемых оценок.

Поскольку независимые оценки k_v и k_m устойчивы, то за коэффициенты подобия k для каждого из месторождений можно принять значение их среднего геометрического (табл. 2).

Показатель подобия (k_v), как уже отмечалось, позволяет оценить полную протяжённость рудных интервалов, но не даёт их абсолютной величины. Реальная протяжённость на глубину оцениваемого рудного объекта требует учёта уровня его эрозионного среза (Z), определяемого по графикам показателей зональности в метрике эталонного месторождения. По полученным численным значениям показателей зональности (см. табл. 1), представленных в координатах Z (глубина), $Ig v$, произведена оценка уровней среза в метрике эталонного месторождения. Результаты оценки выражаются величиной:

$$Z = \bar{Z} \pm S/\sqrt{n}$$

где $\bar{Z} = 1/n \cdot \sum Z_i$ – средняя оценка уровня оруденения (м); S – стандартное отклонение отдельных оценок Z_i , определяемое через размах $R = (Z_{max} - Z_{min})$

и табличный множитель β ; \sqrt{n} – число различных v , взятых для оценки.

Доверительные интервалы оценки $\pm S/\sqrt{n}$ служат критерием генетической близости выявленного оруденения к эталонному месторождению. В случае, если $\pm S/\sqrt{n}$ превышают значения $\pm 50-60$ м, целесообразно пересмотреть выбор эталона [4]. По результатам оценки уровней эрозионного среза каждого месторождения определяется их реальная протяжённость на глубину и через значения k^3 подсчитаны объёмы (V) рудных залежей (см. рис. 3; см. табл. 2).

В Лениногорском районе для построения модели выбран эталонный профиль 0 Тишинского месторождения. По программе «Нью-2» проанализировано несколько композиций из 14 химических элементов по всем изученным месторождениям (Тишинскому, Гусяковскому, Стрежанскому, Шубинскому), что позволило обнаружить их вертикальную зональность и получить общие монотонные геохимические показатели. По графикам M_z для профиля 0 Тишинского месторождения установлена нижняя отметка рудного интервала.

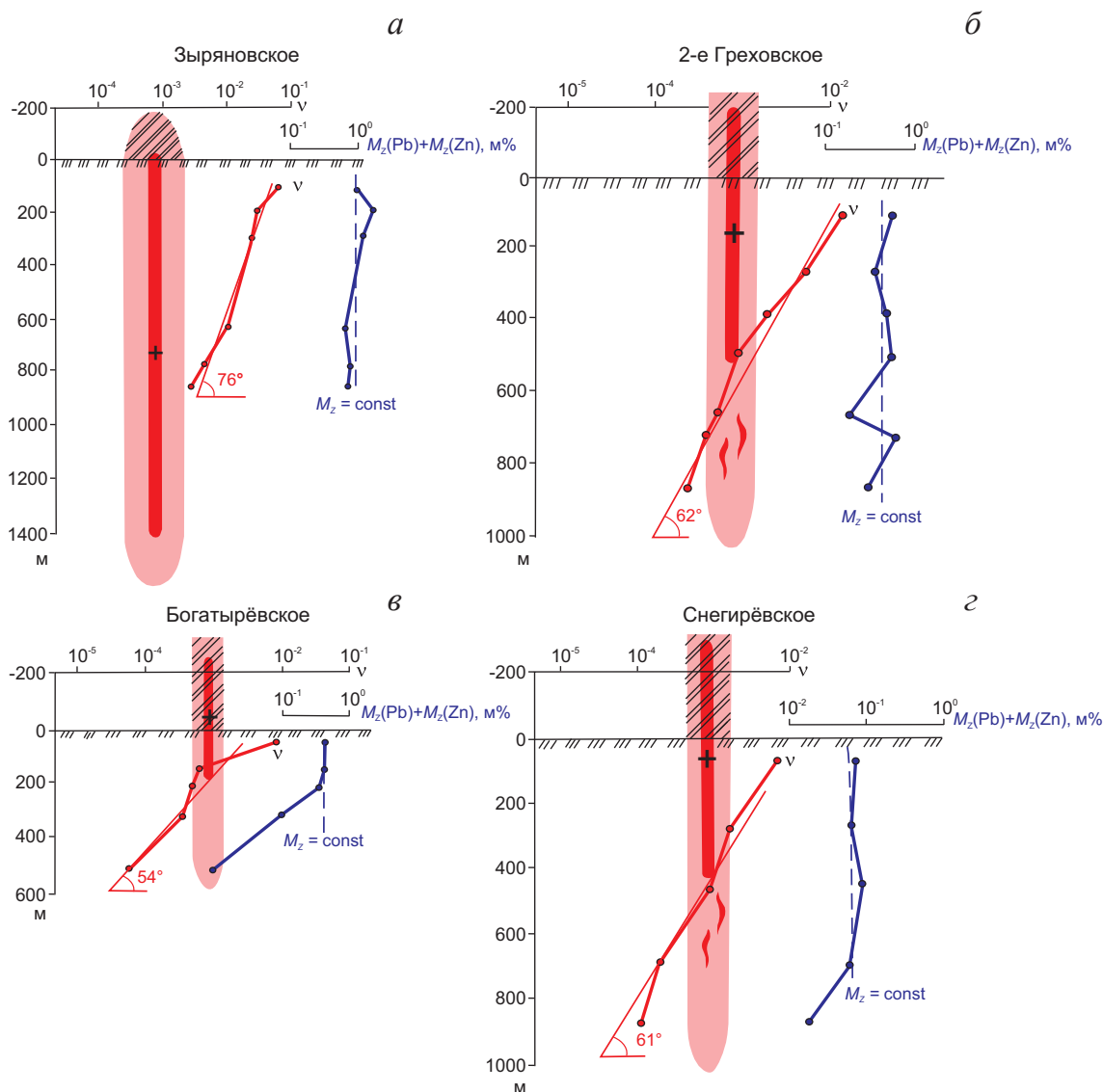


Рис. 3. ГРАФИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ $v = \text{Sb-Hg/Bi-Sn}$, M_z И МОДЕЛИ ДЛЯ ФИГУР ПОДОБИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗЫРЯНОВСКОГО РАЙОНА:

усл. обозн. см. на рис. 1

Верхняя отметка рудного интервала отчётливо установлена на профиле -1 Гусяковского месторождения, расположенном рядом с эталонным для месторождения профилем 0, по которому проводились все расчёты. Можно допустить, что рудная залежь на профиле 0 также слабо затронута эрозией.

По совмещённым графикам показателей зональности и линейных продуктивностей по восьми одноимённым уровням оценена полная протяжённость модели. Модель Тишинского месторождения (до начала эрозии) представляет собой

линзообразное рудное тело общей вертикальной мощностью 1900 м. Основная рудная залежь залегает на контакте кварц-серицитовых сланцев и вулканогенных пород основного состава (рис. 4).

Прогнозная оценка месторождений Лениногорского района по параметрам v и M_z проведена с помощью шести геохимических показателей, вид которых согласуется с общим рядом зональности месторождений этого района. Числитель показателей представлен Hg, Sb, Ag; знаменатель – Co, Bi, Sn, Mo. По графикам v с учётом коэффициента подобия оценены уровни эрозионных срезов

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПО ν И M КОЛЧЕДАННО-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗЫРЯНОВСКОГО И ЛЕНИНОГОРСКОГО РАЙОНОВ

Месторождения	Профиль	$\kappa_M(\text{Pb})$	$\kappa_M(\text{Zn})$	$\kappa_M(\text{Pb, Zn})$	$\kappa_{\nu}\cdot\epsilon^{\pm 1}$	κ	Протяжённость залежей на глубину, м	Объёмы рудных залежей, усл. ед.
Зырянское	6	–	–	1,0	–	1,0	1410	7,9
2-е Греховское	0	0,39	0,43	0,41	$0,58\cdot 1,12^{\pm 1}$	0,49	520 ± 15	0,7
Снегирёвское	05	0,32	0,85	0,53	$0,48\cdot 1,21^{\pm 1}$	0,50	420 ± 10	0,5
Богатырёвское	5	0,58	0,24	0,37	$0,46\cdot 1,18^{\pm 1}$	0,41	200 ± 20	0,2
Тишинское	0	–	–	1,0	–	1,0	790	9,6
Гусяковское	0	0,44	0,30	0,36	$0,28\cdot 1,11^{\pm 1}$	0,32	780 ± 30	0,9
Стрежанское	5	0,13	0,09	0,11	$0,18\cdot 1,16^{\pm 1}$	0,14	90 ± 45	0,1
Шубинское	6 ^a	0,04	0,06	0,05	$0,09\cdot 1,39^{\pm 1}$	0,07	260 ± 60	0,1*

* без учёта слепых рудных залежей на глубине

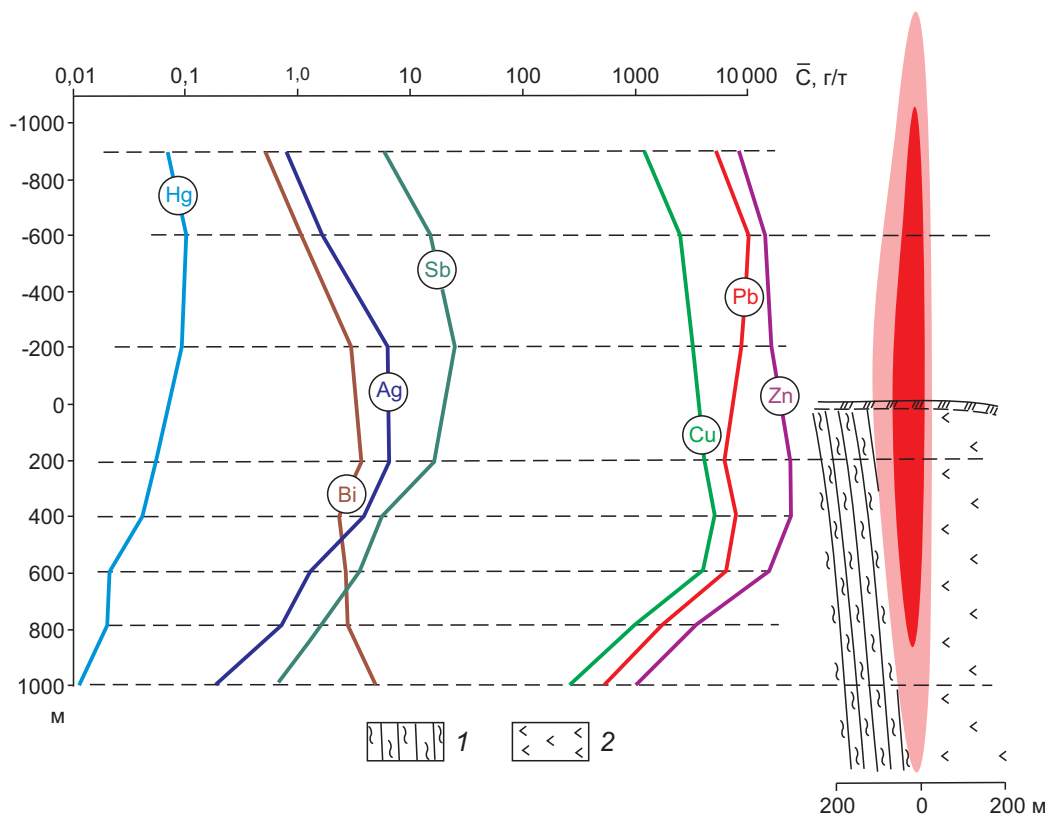


Рис. 4. ФОРМАЛИЗОВАННАЯ ГЕОХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТИШИНСКОЕ:

1 – кварц-серцитовые сланцы; 2 – вулканогенные породы основного состава; остальные усл. обозн. см. на рис. 1 и 2

изученных месторождений, подсчитаны протяжённость рудных залежей на глубину и их объёмы (V) (рис. 5; см. табл. 2).

Эшелонированное размещение рудных залежей на месторождениях Рудного Алтая не такое редкое явление. Наличие первичных надрудных ореолов на глубоких горизонтах Шубинского месторождения видно по отклонению графика показателя геохимической зональности (см. рис. 5), что позволило прогнозировать наличие на глубине слепой рудной залежи. Рудная залежь была вскрыта поисковыми скважинами на глубине более 600 м.

Несмотря на то что приведённые расчёты имеют ориентировочный характер, прогнозная оценка изученных месторождений в целом совпадает с данными разведки. В настоящее время Зыряновское месторождение отработано. За 219 лет эксплуатации на нём было добыто порядка 5 млн т свинца и цинка. Значительные резервы руд сосредоточены в Греховском и Снегирёвском месторождениях. На них рудные залежи фиксируются до глубин 450–500 м, ниже они расщепляются на отдельные маломощные рудные тела. На Богатырёвском месторождении оруденение прослежено до глубины 300 м. В Лениногорском районе запасы

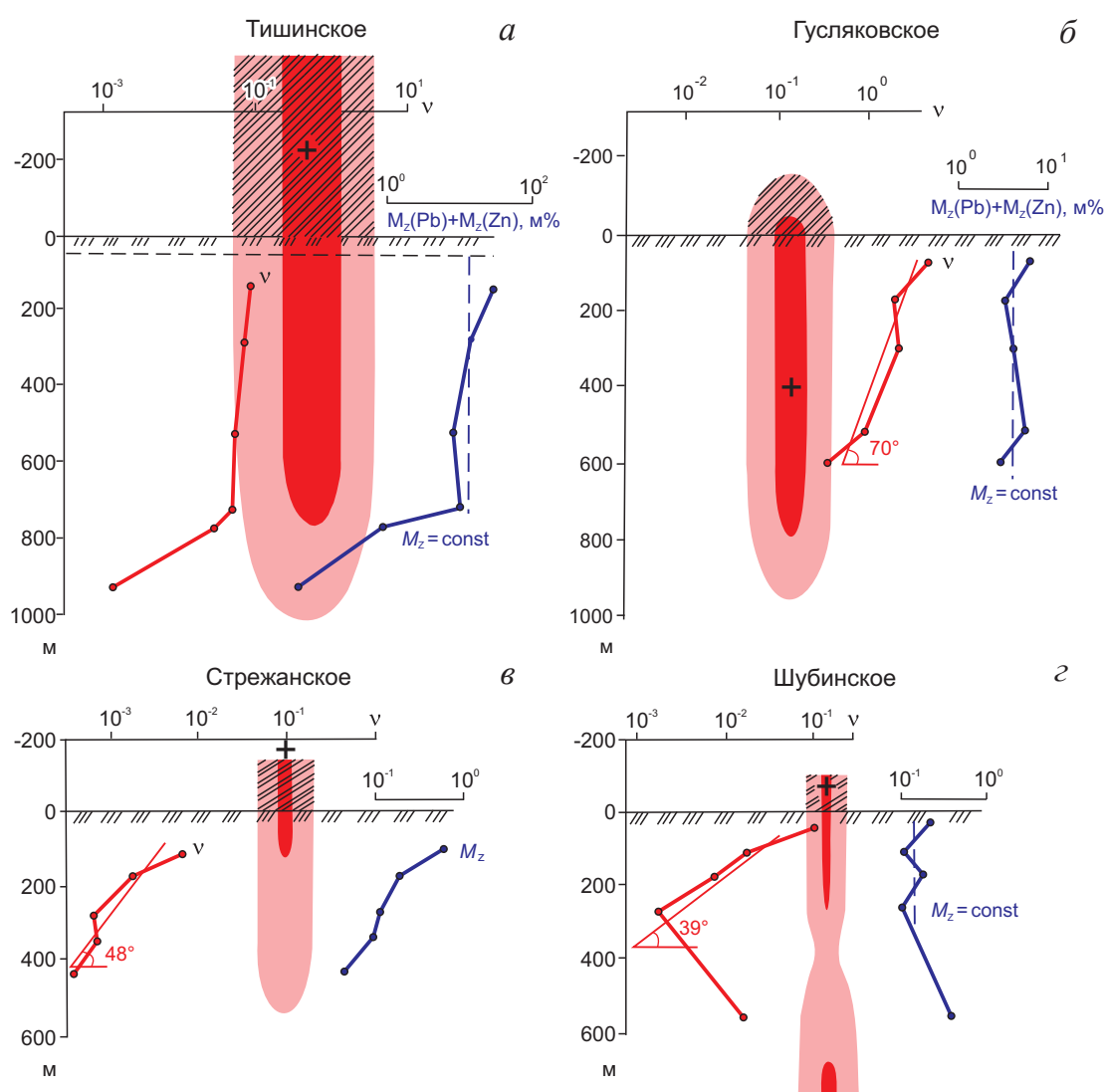


Рис. 5. ГРАФИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ $v = Sb-Hg/Co-Sn$, M_z И МОДЕЛИ ДЛЯ ФИГУР ПОДОБИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЛЕНИНОГОРСКОГО РАЙОНА:

усл. обознач. см. на рис. 1

запасы свинца, цинка и меди Тишинского месторождения составляют 7 млн т, Чекмарь-Гусялковского – 3 млн т.

Пространственная изменчивость оценок к при недостаточной изученности месторождения может существенно влиять на его прогнозную оценку. Наиболее устойчивыми значениями к характеризуются месторождения с простым геологическим строением, представленные выдержанными по мощности и по простиранию рудными залежами. Разумеется, даже для таких месторождений показатели к будут различными для разных сечений, отражая «растянутость» ($k > 1,0$) или «сжатость» ($k < 1,0$) оруденения по отношению к эталонному разрезу.

Результаты прогнозных оценок оруденения с помощью коэффициента подобия и анализа геохимической зональности на медно-порфировых, стратиформных свинцово-цинковых [7], золото-рудных [1], колчеданно-полиметаллических месторождениях российской части Рудного Алтая [3] свидетельствуют о реальности этого параметра.

Оценка выявляемых объектов, естественно, требует совместного рассмотрения всех имеющихся геологических, геофизических, геохимических данных при тщательном учёте морфологии и условий локализации оруденения. Привлечение к этим оценкам представлений о геохимическом подобии генетически однотипных месторождений особенно важно на стадии поисковых работ, при недостатке других данных. Сведения, полученные при полной геохимической характеристике месторождения на глубину, позволяют проводить модельные построения восстановлением интервалов оруденения, уничтоженных эрозией, и прогнозированием оруденения на глубину.

Использование геохимических моделей для прогнозной оценки месторождений базируется на теоретически обоснованном и подтверждённом практикой существовании геологического, геометрического и геохимического подобия генетически однотипных месторождений различной крупности. Этот основополагающий принцип применим к объектам ранга рудных районов и узлов [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мильяев С. А. Комплекс геохимических признаков для обоснования прогноза оруденения на глубину (на примере месторождений золотосульфидно-кварцевой и золотосеребряной формаций) // Отечественная геология. – 2016. – № 2. – С. 53–58.
2. Николаев Ю. Н. Критериальные геохимические модели рудных районов и узлов и их использование для прогноза оруденения // Прогнозно-поисковая геохимия – современное состояние и перспективы развития (к 100-летию со дня рождения А. П. Соловова). – М.: ИМГРЭ, 2008. – С. 64–82.
3. Кузнецов В. В., Кудрявцева Н. Г., Серавина Т. В. [и др.]. Основы прогноза и поисков колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая. – М.: ЦНИГРИ, 2019. – 207 с.
4. Соловов А. П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1985. – 290 с.
5. Соловов А. П. Современное состояние и перспективы развития геохимических методов поисков рудных месторождений // Вестник Московского государственного университета. Серия Геология. – 1978. – № 2. – С. 46–67.
6. Соловов А. П., Мильяев С. А. Оценка генетически однотипных месторождений по v , M // Состояние и задачи геохимических поисков рудных месторождений в Казахстане. – Алматы [Алма-Ата]: КазИМС, 1981. – С. 213–219.
7. Соловов А. П., Матвеев А. А., Мильяев С. А., Чепкасова Т. В. Оценка прогнозных ресурсов на основе принципа подобия // Геохимические методы и научно-технический прогресс в геологическом изучении недр. – М.: Наука, 1989. – С. 5–19.
8. Соловов А. П., Архипов Ф. Я., Бугров В. А. [и др.]. Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. – М.: Недра, 1990. – 335 с.

REFERENCES

1. Milyaev S. A. Kompleks geokhimicheskikh priznakov dlya obosnovaniya prognoza orudneniya na glubinu (na primere mestorozhdenii zolotosul'fidno-kvartsevoi i zolotoserebryanoi formatsii) [A complex of geochemical features to justify the prediction of mineralization to depth (on the example of deposits of gold sulfidequartz and gold-silver formations)], *Otechestvennaya geologiya* [National geology], 2016, No 2, pp. 53–58. (In Russ.).
2. Nikolaev Yu. N. Kriterial'nye geokhimicheskie modeli rudnykh raionov i uzlov i ikh ispol'zovanie dlya prognoza orudneniya [Criteria geochemical models of

- ore regions and nodes and their use for the prediction of mineralization], *Prognozno-poiskovaya geokhimiya – sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya (k 100-letiyu so dnya rozhdeniya A. P. Solovova)* [Prediction and exploration geochemistry – current status and development prospects (on the 100th anniversary of the birth of A. P. Solovov)], Moscow, IMGRE Publ., 2008, pp. 64–82.
3. Kuznetsov V. V., Kudryavtseva N. G., Seravina T. V. [et al.]. *Osnovy prognoza i poiskov kolchedanno-polimetallicheskikh mestorozhdenii Rudnogo Altaya* [Basics of forecasting and searches for pyrite-polymetallic deposits of the Rudny Altai], Moscow, TsNIGRI Publ., 2019, 207 p.
 4. Solovov A. P. *Geokhimicheskie metody poiskov mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh: Uchebnik dlya vuzov* [Geochemical methods of prospecting for mineral deposits: Textbook for universities], Moscow, Nedra Publ., 1985, 290 p.
 5. Solovov A. P. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya geokhimicheskikh metodov poiskov rudnykh mestorozhdenii* [The current state and development prospects of geochemical methods for prospecting ore deposits], *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Geologiya* [Moscow University Geology Bulletin], 1978, No 2, pp. 46–67. (In Russ.).
 6. Solovov A. P., Milyaev S. A. *Otsenka geneticheski odnotipnykh mestorozhdenii po v, M* [Assessment of genetically similar deposits by v, M], *Sostoyanie i zadachi geokhimicheskikh poiskov rudnykh mestorozhdenii v Kazakhstane* [State and tasks of geochemical prospecting of ore deposits in Kazakhstan], Almaty, KazIMS Publ., 1981, pp. 213–219.
 7. Solovov A. P., Matveev A. A., Milyaev S. A., Chepkasova T. V. *Otsenka prognoznykh resursov na osnove printsipa podobiya* [Estimation of forecast resources based on the principle of similarity], *Geokhimicheskie metody i nauchno-tekhnicheskii progress v geologicheskoy izuchenii nedr* [Geochemical methods and scientific and technological progress in the geological study of mineral resources], Moscow, Nauka Publ., 1989, pp. 5–19.
 8. Solovov A. P., Arkhipov F. Ya., Bugrov V. A. [et al.] *Spravochnik po geokhimicheskim poiskam poleznykh iskopaemykh* [Handbook of geochemical prospecting for minerals], Moscow, Nedra Publ., 1990, 335 p.

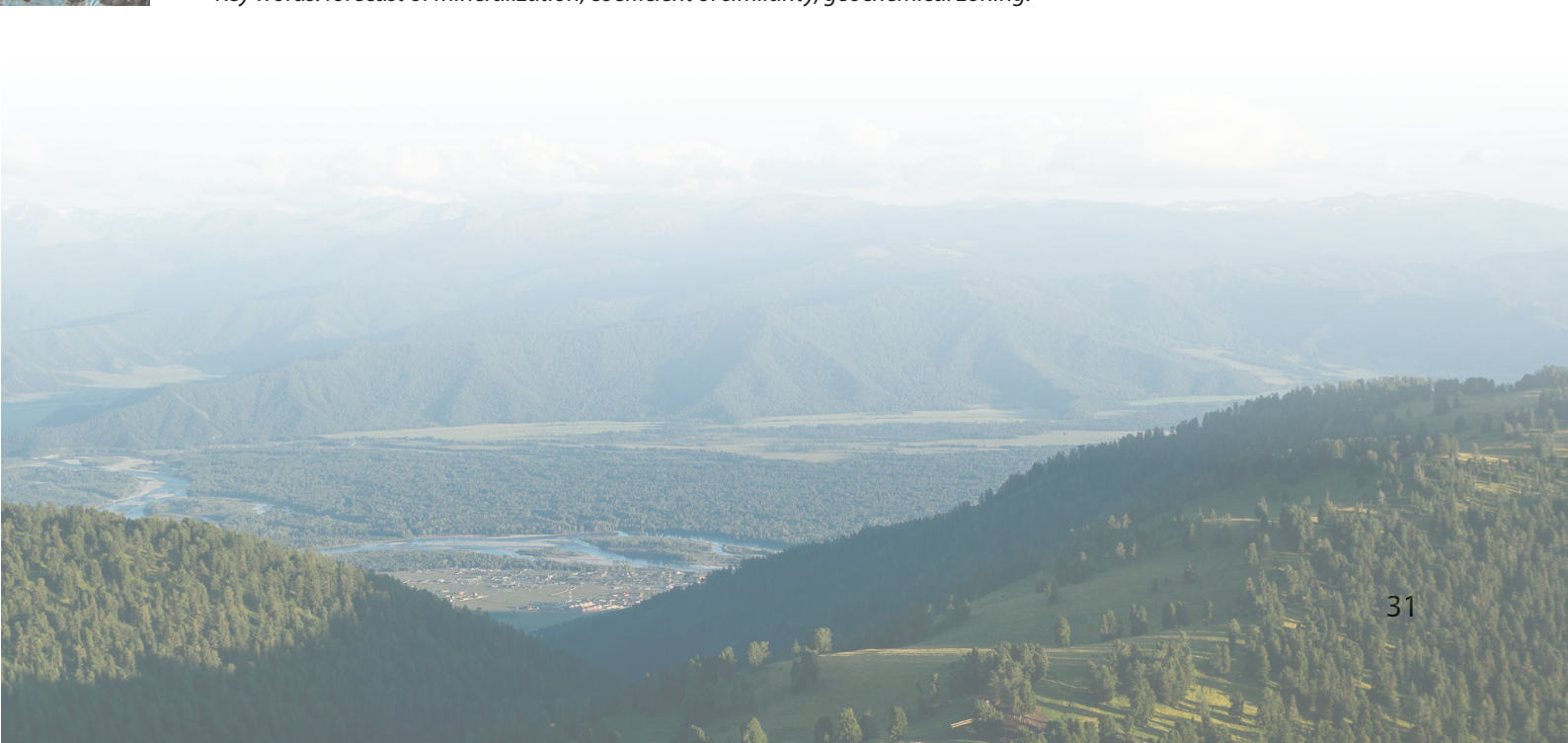
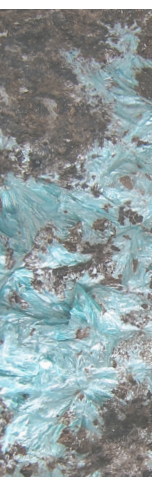
GEOCHEMICAL MODELS OF BASE METALS DEPOSITS; EXPERIENCE OF THEIR APPLICATION IN PREDICTIVE ESTIMATION OF MINERALIZATION

Milyaev S. A. (PhD in geology and mineralogy, leading researcher)

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

The main task of constructing geochemical models of ore deposits are justification the mineralization forecast depth, determination the denudation level of ore occurrences detected by lithochemical survey for secondary scattering halos, and taxing ore intersections in accordance of a genetically similar well-studied (reference) field. The principle of geometric and geochemical similarity of genetically similar objects is used for predictive evaluation of the studied objects at the early stage of exploitation. Based on the construction of generalized models of sections of polymetallic deposits in combination with geochemical features, a forecast estimation of mineralization is given.

Key words: forecast of mineralization, coefficient of similarity, geochemical zoning.





ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ И ГРАНИЦЫ ЗОЛОТОРУДНЫХ ПОЛЕЙ РАЙОНА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГОРНЯЧКА И ПЕЩЕРНОЕ, СЕВЕРНЫЙ УРАЛ

Признаками рудной минерализации, относящейся к золото-мало-сульфидно-кварцевой формации в коренных окисленных породах центрального сегмента Восточно-Тагильской структурно-формационной зоны (СФЗ), являются аддитивные ореолы $Ag+Sb+As$. Эти элементы входят в состав вторичных рудных минералов (арсенаты, сурьмяные охры, самородное серебро), заместивших рудные минералы первичных руд (арсенопирит, блёклые руды), находившихся в тесном сростании с золотом. Рудные поля месторождений Горнячка и Пещерное проявлены в виде участков скопления аддитивных ореолов $Ag+Sb+As$ площадью первые квадратные километры. Золоторудные поля ограничиваются блоками повышенной плотности, признаками которых являются содержание магния в вулканогенно-осадочных толщах на уровне $\geq 1\%$ и положительные гравиметрические аномалии.

Ключевые слова: золотокварцевые месторождения, признаки и границы золоторудных полей, геохимические ореолы, блоки повышенной плотности, Восточно-Тагильская структурно-формационная зона.

В настоящей статье приведены результаты поисковых и разведочных работ, проведённых в 2016–2018 гг. Уральским филиалом АО «Полиметалл УК» в центральном сегменте Восточно-Тагильской СФЗ площадью 30 км². В геологическом отношении эта территория представлена выходами вулканогенно-осадочных толщ красноуральской (O_3-S_1kr), турьинской (S_2-D_1tr) и краснотурьинской (D_1kt) свит, прорванных гранитоидами левинского ($\gamma-\gamma\delta-l$) и ауэрбахского ($\gamma-\gamma\delta-\delta\delta D_{1-2}a$) комплексов (рис. 1). Поисковые работы базировались на сети литохимического опробования 20 x 200 м со сгущением на отдельных участках до 20 x 100 м. Пробы отбирались с помощью станка ударно-забивного снаряда «Кобра», проходящего покровно-почвенный и элювиальные слои до коренных пород. Литохимической пробой служила проба коренных пород, захваченная наконечником ударно-канатного проходческого снаряда. Отобранные пробы представляли собой образцы окисленных коренных пород. Средняя глубина отбора пробы 4,5 м. В лаборатории АО «Золото Северного Урала» в пробах спектральным анализом определялись содержания 26 элементов: Au, Ag, Mg, Mn, Ni, Co, Ti, V, Cr, Mo, W, Nb, Cu, Pb, Zn, Sb, Bi, As, Zn, Sn, Y, Yb, P, Sr, Ba, Fe.

В качестве прямого поискового признака взаимодействия золотоносных гидротермальных растворов с вмещающими породами рассматривается аддитивный ореол, составленный химическими элементами-спутниками золота. Как показал наш собственный практический опыт, изучение геохимических особенностей уральских золотокварцевых малосульфидных месторождений Шиловское и Анна [7], использование аддитивного ореола при поисковой оценке территории среднего масштаба позволяют

**Несис
Виталий Натанович**
генеральный директор¹
info@polymetal.ru

**Мотов
Андрей Павлович**
кандидат геолого-минералогических наук
главный специалист дирекции
развития бизнеса¹
motovAP@polymetal.ru

**Бутняков
Андрей Васильевич**
заместитель директора
по минерально-сырьевой базе²
ural_po_grr@polymetal.ru

¹ АО «Полиметалл УК»,
г. Санкт-Петербург

² УФ «Полиметалл УК»,
г. Екатеринбург

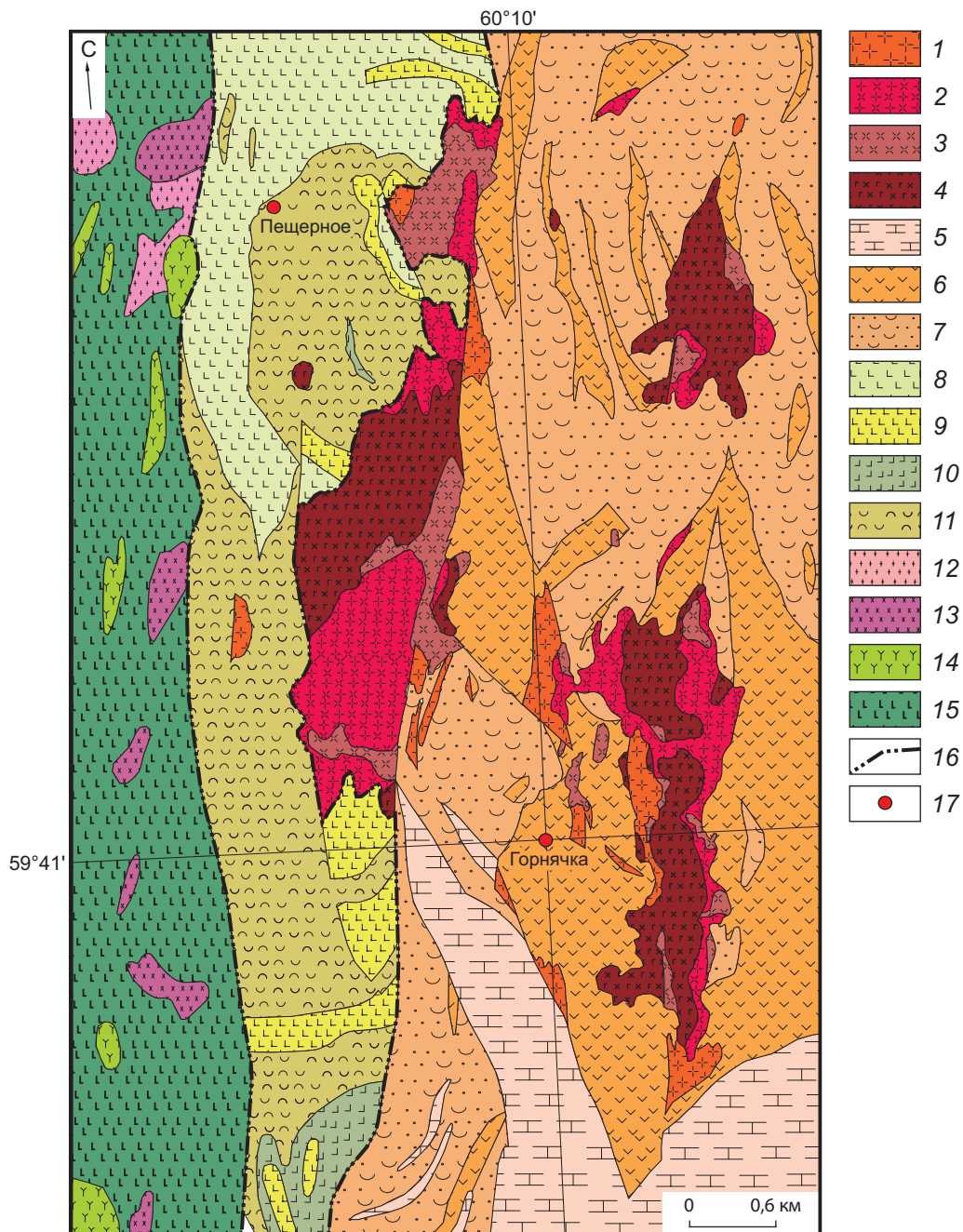


Рис. 1. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА РАЙОНА ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГОРНЯЧКА И ПЕЩЕРНОЕ:

породы Красноуральской подзоны Восточно-Тагильской СФЗ: гранитоиды ауэрбахского комплекса: 1 – граниты ($\gamma D_{1-2,a}$), 2 – гранодиориты ($\gamma \delta D_{1-2,a}$), 3 – диориты ($\delta D_{1-2,a}$), 4 – габбродиориты, габбро ($u \delta D_{1,a}$); вулканогенно-осадочные породы краснотурьинской свиты (D_1,kt): 5 – известняки, 6 – андезиты и их туфы, 7 – туфопесчаники, туфоалевролиты, туфоконгломераты; вулканические и вулканогенно-осадочные породы турьинской свиты (S_2-D_1,tr): 8 – базальты и их туфы, 9 – трахибазальты и их туфы, 10 – андезиты и их туфы; 11 – вулканические породы краснотурьинской свиты (D_1,kt); гранитоиды левинского комплекса ($\rho\gamma-\gamma\sigma S_1,l$): 12 – плагиограниты ($\rho\gamma S_1,l$), 13 – гранодиориты ($\gamma\sigma S_1,l$); вулканические породы красноуральской свиты (O_3-S_1,kr): 14 – дациты, 15 – базальты и их туфы с прослоями яшмоидов, андезибазальтов, андезитов и их туфов; 16 – границы вулканогенно-осадочных толщ; 17 – золоторудное месторождение

сглаживать пространственную разобщённость мнгоэлементных литохимических ореолов. Для района локализации золото кварцевых малосульфидных месторождений Пещерное и Горнячка таким ореолом выбран аддитивный ореол, объединяющий содержания $Ag+As+Sb$. Перечисленные элементы входят в состав рудных минералов, образующих тесные парагенезисы с золотом. Этими минералами являются арсенопирит, на 42–45 % состоящий из As , и блёклая руда, содержащая 9–22 % Sb и 4,6–15,3 % As . Серебро входит в состав самородного золота (9,3–17,6 %) и блёклой руды (0,37–1,03 %). По данным технологических испытаний руд месторождения Горнячка, проведённых в 2018 г. специалистами ООО «ЛИМС» по заказу УФ «Полиметалл УК», до 82 % золота находится в тесных сростаниях с сульфидами. На долю свободного золота приходится только 18 %. При окислении сульфидов As , Sb и Ag полностью не рассеиваются, а фиксируются во вторичных минералах. Арсенопирит замещают арсенаты, сурьма блёклых руд переходит в сурьмяные охры, состоящие из сервантита, стибиоконита, валентита, серебро блёклых руд приобретает самородную форму [2, 3]. Вероятнее всего, в пробах, отобранных с глубины в первые метры, As , Sb и Ag содержатся именно в этих вторичных рудно-минеральных формах. Для приведения аддитивного показателя содержаний As , Ag и Sb к целым значениям были использованы коэффициенты нормирования их содержаний: для Ag – коэффициент 100, для As и Sb – 1000.

Положение концентрически-зонального аддитивного ореола $Ag+As+Sb$ проиллюстрировано на примере месторождения Горнячка, которое находится в центре поисковой площади. Месторождение приурочено к восточной части Восточно-Тагильской СФЗ. Последняя сложена вулканогенно-осадочными толщами краснотурьинской свиты, осложнёнными прорывающими их гранитоидами ауэрбахского комплекса (рис. 2). По данному месторождению нами рассмотрены результаты изучения состава рудно-минеральных парагенезисов, проанализированы корреляционные связи химических элементов, входящих в состав рудных минералов, описан характер их распределения в вертикальном профиле. На ассоциативность Au , As , Sb и Ag указывают сходство распределения содержания в вертикальном профиле руд месторождения (табл. 1, рис. 3) и значимый уровень парных коэффициентов корреляции в рудах из различных частей профиля (табл. 2).

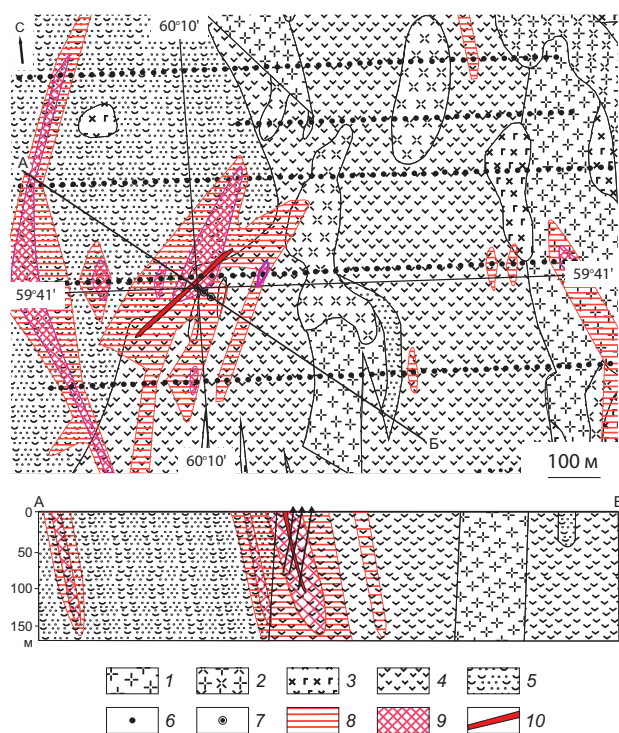


Рис. 2. ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ПЛАН ЗОЛОТОРУДНОГО УЧАСТКА ГОРНЯЧКА С АДДИТИВНЫМИ ГЕОХИМИЧЕСКИМИ ОРЕОЛАМИ:

гранитоиды ауэрбахского комплекса: 1 – граниты ($\gamma D_{1-2}a$), 2 – гранодиориты ($\gamma\delta D_{1-2}a$), 3 – габбродиориты, габбро ($u\delta D_1a$); вулканогенно-осадочные породы краснотурьинской свиты (D_1kt): 4 – андезиты, 5 – туфы; 6 – точка отбора геохимических проб, полученных ударно-канатным бурением; 7 – местоположение устья скважины на геологическом плане по линии разреза; аддитивные ореолы $Ag+Sb+As$: 8 – умеренного уровня ($15 \leq$ аддитивный показатель < 20), 9 – значительного уровня (аддитивный показатель ≥ 20); 10 – золоторудное тело

Формирование золото кварцевых месторождений рассматриваемого района связывают [4, 6] с коллизионной эпохой развития Урала (380–240 млн лет), характеризующейся становлением гранитоидов ауэрбахского комплекса. Близкое пространственное расположение гранитоидов ауэрбахского комплекса и аддитивных ореолов $Ag+Sb+As$ проиллюстрировано на рис. 4.

Вулканогенно-осадочные породы, вмещающие месторождение Пещерное, принадлежат к турьинской свите (S_2-D_1tr), вмещающие месторождение Горнячка – к краснотурьинской (D_1kt). В целом однородные по внешним признакам вулканогенно-осадочные толщи этих свит, представленные андезитами и их туфами, по содержанию магния заметно различаются. Золотая минерализация и

1. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЙ ЗОЛОТА И ЕГО ЭЛЕМЕНТОВ-СПУТНИКОВ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ПРОФИЛЕ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ГОРНЯЧКА

Типы руд (глубина, м)	Число проб	Параметры	Золото и его элементы-спутники			
			Au	Ag	Sb	As
			г/т		%	
Окисленная (19–33)	15	\bar{x}	3,29	3,72	0,0010	0,12
		<i>kk</i>	0,85	0,78	0,83	0,52
Первичная верхней зоны (17–40)	32	\bar{x}	6,97	5,39	0,0020	0,24
		<i>kk</i>	1,80	1,13	1,67	1,04
Первичная средней зоны (41–51)	43	\bar{x}	5,26	4,91	0,0019	0,37
		<i>kk</i>	1,36	1,03	1,58	1,61
Первичная нижней зоны (52–111)	32	\bar{x}	3,86	4,77	0,0012	0,23
		<i>kk</i>	1,00	1,00	1,00	1,00

Примечание. *kk* – коэффициент концентрации элемента относительно содержания этого элемента в первичной руде нижней зоны.

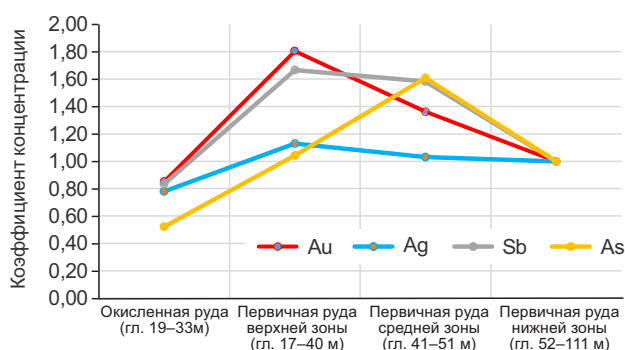


Рис. 3. ИЗМЕНЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЗОЛОТА И ЕГО ЭЛЕМЕНТОВ-СПУТНИКОВ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ПРОФИЛЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ГОРНЯЧКА ОТНОСИТЕЛЬНО СОДЕРЖАНИЙ В РУДАХ НИЖНЕЙ ЗОНЫ

2. КОЭФФИЦИЕНТЫ ПАРНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ЗОЛОТА И ЕГО ЭЛЕМЕНТОВ-СПУТНИКОВ В ВЫБОРКАХ ЗОЛОТОРУДНЫХ ПРОБ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ГОРНЯЧКА

Типы руд (глубина, м)	Золото и его элементы-спутники	Коэффициент парной корреляции	
		Au	Ag
Окисленная (19–33)	Au	1,00	0,79
	Ag	0,79	1,00
	Sb	0,75	0,98
	As	0,80	< 0,50
Первичная верхней зоны (17–40)	Au	1,00	0,56
	Ag	0,56	1,00
	Sb	< 0,50	0,61
	As	0,72	< 0,50
Первичная средней зоны (41–51)	Au	1,00	< 0,50
	Ag	< 0,50	1,00
	Sb	< 0,50	0,88
	As	0,55	< 0,50
Первичная нижней зоны (52–111)	Au	1,00	< 0,50
	Ag	< 0,50	1,00
	Sb	< 0,50	0,81
	As	0,59	< 0,50

аддитивные ореолы Ag+Sb+As, как правило, локализируются в вулканитах, содержащих Mg в количестве десятых и сотых долей процента. Участки скопления аддитивных ореолов Ag+Sb+As ограничиваются контурами развития вулканогенно-осадочных и других пород с повышенным содержанием магния ($Mg \geq 1\%$). Нередко участки выхода вулканогенно-осадочных толщ с повышенным содержанием Mg соответствуют положительным гравиметрическим аномалиям (рис. 4). Таким образом, участки пород с повышенным содержанием магния фиксируют выходы пород повышенной плотности. Согласно теории влияния блоковой тектоники на формирование гидротермальных месторождений, развиваемой А. Ю. Кисиним и В. А. Коротеевым [5], породы, расположенные между ограничивающими их блоками, обладают большей

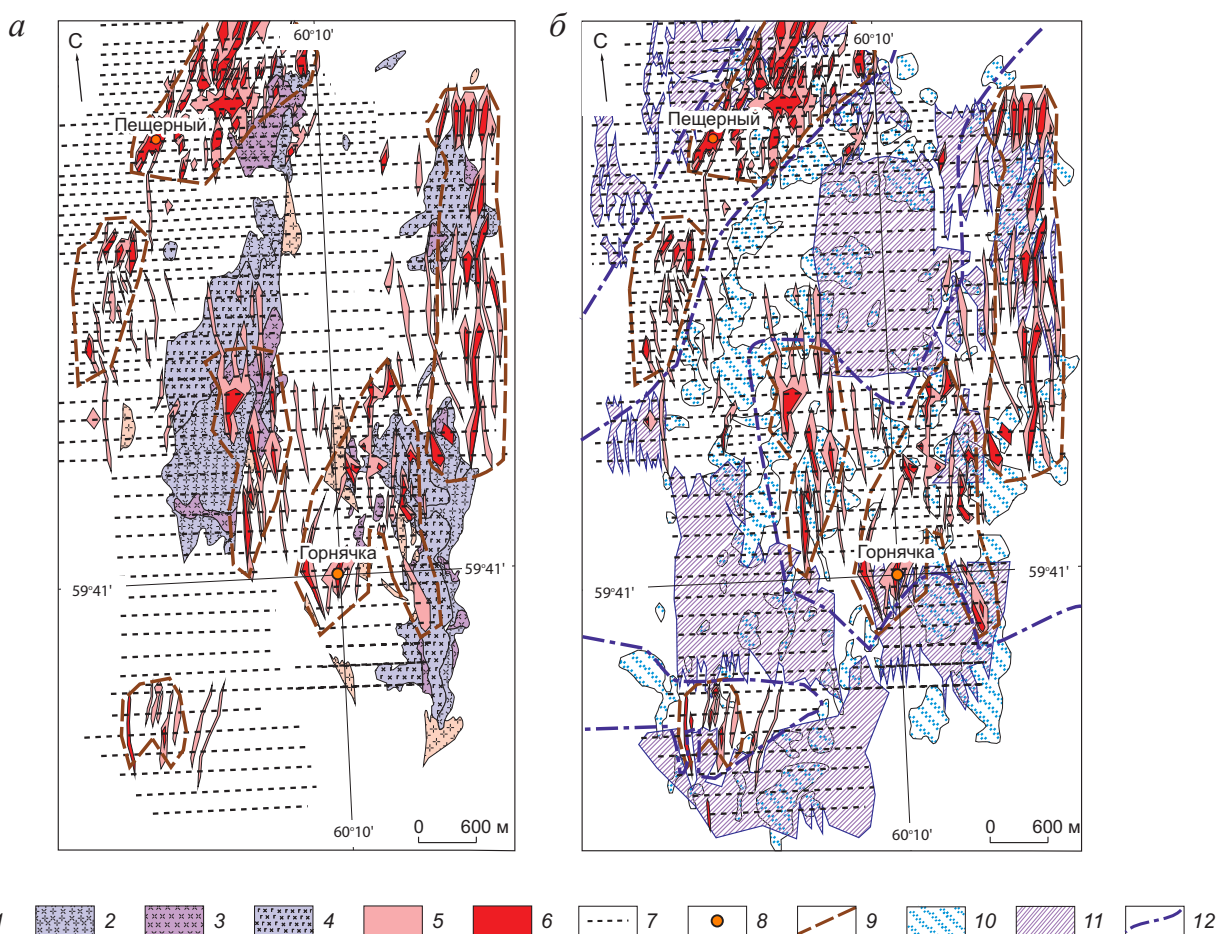


Рис. 4. СХЕМЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ ГРАНИТОИДОВ АУЭРБАХСКОГО КОМПЛЕКСА И АДДИТИВНЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ОРЕОЛОВ Ag+Sb+As (а), ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ И БЛОКОВ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ Mg (б) В РАЙОНЕ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГОРНЯЧКА И ПЕЩЕРНОЕ:

гранитоиды ауэрбахского комплекса: 1 – граниты ($\gamma D_{1-2}a$), 2 – гранодиориты ($\gamma \delta D_{1-2}a$), 3 – диориты ($\delta D_{1-2}a$), 4 – габбродиориты, габбро ($u \delta D_{1-2}a$); аддитивные ореолы содержаний Ag+Sb+As: 5 – $15 < \text{аддитивный показатель} < 20$, 6 – аддитивный показатель > 20 ; 7 – профиль литохимического опробования; 8 – золоторудное месторождение; 9 – граница золоторудного поля; 10 – положительная гравиметрическая аномалия $\Delta g \geq 0,20$ мГал (Н. В. Гильманов, 1991 г.); 11 – участок выхода пород с повышенным содержанием Mg ($> 1\%$); 12 – граница блоков повышенной плотности

хрупкостью. За счёт большей устойчивости к проникновению разломов, которые могут быть проводниками золотоносных растворов, более плотные блоки могут служить экранами тектонических проводников гидротермальных растворов. При этом границы между плотными и разуплонёнными блоками оказываются наиболее интересными с точки зрения возможного обнаружения наиболее богатой золоторудной минерализации, пример – месторождение Пещерное. Влияние экранирующих структур с пониженной проницаемостью на локализацию золотых руд подчёркивается в рабо-

тах Н. С. Остапенко [8], В. В. Аристова [1] и др. Образование локализирующих золоторудных структур на изучаемой территории относят [4, 6] к коллизионному этапу развития Урала, для которого характерно развитие в структурах Урала пологих разрывных нарушений [9].

В заключение отметим, что на изученной территории площадью 30 км² наряду с золоторудными полями месторождений Горнячка и Пещерное проявлены ещё четыре потенциальных золоторудных поля, заслуживающих дальнейшей оценки (крупномасштабные поиски и разведка).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аристов В. В. Закономерности размещения золоторудных объектов Яно-Колымской провинции // Геология и геофизика. – 2019. – Т. 60. – С. 1–18.
2. Белозуб Е. В. Гипергенез сульфидных месторождений Южного Урала : специальность 25.00.05 «Минералогия, кристаллография» : автореф. дис. на соискание учён. степ. д-ра геол.-минерал. наук. – СПб., 2009. – 40 с.
3. Блинов И. А. Гипергенные минералы цинка на сульфидных месторождениях Южного Урала : специальность 25.00.05 «Минералогия, кристаллография» : автореф. дис. на соискание учён. степ. канд. геол.-минерал. наук. – СПб., 2016. – 23 с.
4. Викентьев И. В., Тюкова Е. Э., Мурзин В. В. Викентьева О. В., Павлов, Л. Г. Воронцовское золоторудное месторождение. Геология, формы золота, генезис. – Екатеринбург : Форт Диалог-Исеть, 2016. – 204 с.
5. Кисин А. Ю., Коротеев В. А. Блоковая складчатость и рудогенез. – Екатеринбург : ИГГ УрО РАН, 2017. – 439 с.
6. Коротеев В. А., Сазонов В. Н., Огородников В. Н., Поленов Ю. А. Шовные зоны Урала как интегральные перспективные рудоносные тектонические структуры // Геология рудных месторождений. – 2009. – Т. 51, № 2. – С. 107–124.
7. Несис В. Н., Мотов А. П., Бутняков А. В. Вертикальная геохимическая зональность окисленных руд золоторудных месторождений Анна и Шиловское (Центральный Урал) // Руды и металлы. – 2019. – № 4. – С. 67–78.
8. Остапенко Н. С. Открытые и закрытые гидротермальные системы и их рудный потенциал (сравнительный анализ) // Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов Восточной Азии (Благовещенск, ИГИП ДВО РАН, 15–16 октября, 2012 г.) : сборник докладов Второй Всероссийской научной конференции. – Благовещенск. – 2012. – С. 122–127.
9. Juhlin C., Friberg M., Echler H. P. [at al.] Crustal structure of the Middle Urals: Results from the (ESRU) Europrobe seismic reflection profiling in Urals experiments // Tectonics. – 1998. – V. 17, № 5. – pp. 710–725.

REFERENCES

1. Aristov V. V. Zakonomernosti razmeshcheniya zolotorudnykh ob'ektov Yano-Kolymskoi provintsii [Patterns of placement of gold ore objects of the Yano-Kolyma province], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2019, V. 60, pp. 1–18. (In Russ.).
2. Belogub E. V. Gipergenez sul'fidnykh mestorozhdenii Yuzhnogo Urala : spetsial'nost' 25.00.05 "Mineralogiya, kristallografiya" : avtoref. dis. na soiskanie uchen. step. d-ra geol.-mineral. nauk [Hypergenesis of sulfide deposits in the South Urals. Extended abstract of Doctor's thesis], St. Petersburg, SPbGU Publ., 2009, 40 p.
3. Blinov I. A. Gipergennye mineraly tsinka na sul'fidnykh mestorozhdeniyakh Yuzhnogo Urala : spetsial'nost' 25.00.05 "Mineralogiya, kristallografiya" : avtoref. dis. na soiskanie uchen. step. kand. geol.-mineral. nauk [Hypergenic Zinc Minerals in Sulphide Deposits of the Southern Urals. Extended abstract of candidate's thesis], St. Petersburg, SPbGU Publ., 2016, 23 p.
4. Vikent'ev I. V., Tyukova E. E., Murzin V. V., Vikent'eva O. V., Pavlov L. G. Vorontsovskoe zolotorudnoe mestorozhdenie. Geologiya, formy zolota, genesis [Vorontsov gold deposit. Geology, forms of gold, genesis], Ekaterinburg, Fort Dialog-Iset' Publ., 2016, 204 p.
5. Kisin A. Yu., Koroteev V. A. Blokovaya skladchatost' i rudogenez [Block folding and ore genesis], Ekaterinburg, IGG UrO RAN Publ., 2017, 439 p.
6. Koroteev V. A., Sazonov V. N., Ogorodnikov V. N., Polenov Yu. A. Shovnye zony Urala kak integral'nye perspektivnye rudosnosnye tektonicheskie struktury [Suture zones of the Urals as integral promising orebearing tectonic structures], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii [Geology of Ore Deposits]*, 2009, V. 51, No 2, pp. 107–124. (In Russ.).
7. Nesis V. N., Motov A. P., Butnyakov A. V. Vertikal'naya geokhimicheskaya zonal'nost' okislennykh rud zolotorudnykh mestorozhdenii Anna i Shilovskoe (Tsentral'nyi Ural) [Vertical geochemical zoning of oxidized ores of gold ore deposits Anna and Shilovskoye (Central Urals)], *Rudy i metally [Ores and Metals]*, 2019, No 4, pp. 67–78. (In Russ.).
8. Ostapenko N. S. Otkrytye i zakrytye gidrotermal'nye sistemy i ikh rudnyi potentsial (sravnitel'nyi analiz) [Open and closed hydrothermal systems and their ore potential (comparative analysis)], *Voprosy geologii i kompleksnogo osvoeniya prirodnykh resursov Vostochnoi Azii (Blagoveshchensk, IGIP DVO RAN, 15–16 oktyabrya, 2012 g.)* :

sbornik докладov Vtoroi Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii [Problems of geology and integrated development of natural resources of East Asia (Blagoveshchensk, IGIP FEB RAS, October 15–16, 2012): a collection of reports of the Second All-Russian Scientific Conference], Blagoveshchensk, 2012, pp. 122–12.

9. Juhlin C., Friberg M., Echler H. P., Hismatulin T., Rybalka A., Green A. G., Ansorge J. Crustal structure of the Middle Urals: Results from the (ESRU) Europrobe seismic reflection profiling in Urals experiments, *Tectonics*, 1998, V. 17, No 5, pp. 710–725.

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND BOUNDARIES OF GOLD ORE FIELDS OF THE REGION INCLUDING GORNYACHKA AND PESCHERNOE DEPOSITS, NORTHERN URALS

Nesis V. N. (general director ¹)

Motov A. P. (PhD in geology and mineralogy, chief specialist of business development directorate ¹)

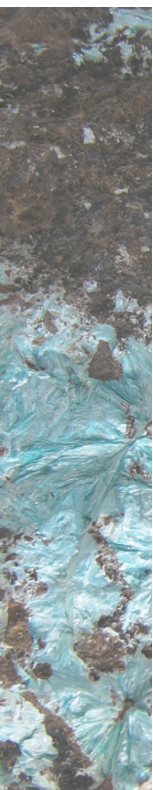
Butnyakov A. V. (deputy general director for the mineral resources base ²)

¹ JSC «Polymetal Management Company», St. Petersburg

² Ural Branch of JSC «Polymetal Management Company», Yekaterinburg

The signs of ore mineralization related to the gold-low-sulfide-quartz formation in the primary oxidized rocks of the central segment of the East Tagil structural-formation zone (SFZ) are the multiplicative halos Ag+Sb+As. These elements are part of secondary ore minerals (arsenates, antimony ochre, native silver), which replaced ore minerals of primary ores (arsenopyrite, faded ores), which were in close intergrowth with gold. The ore fields of the Gornychka and Peshchernoye deposits are shown as plots of clusters of multiplicative aureoles Ag+Sb+As with an area of the first square kilometers. Gold ore fields are limited by blocks of increased density, characterized by the magnesium content in the volcanic-sedimentary strata at a level of $\geq 1\%$ and positive gravity anomalies.

Keywords: gold-quartz deposits, characteristics and boundaries of gold ore fields, geochemical halos, blocks of increased density, East Tagil structural-formation zone.





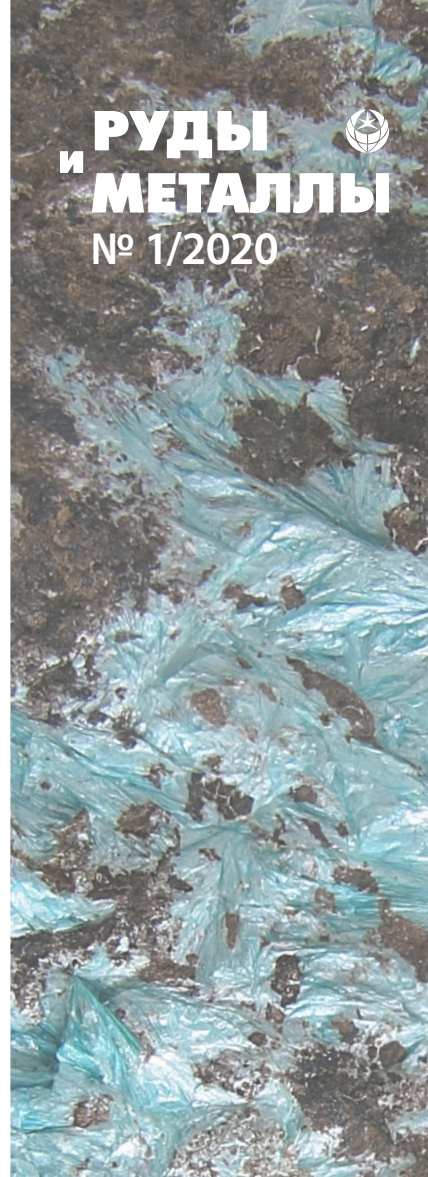
РЕКОНСТРУКЦИИ ПАЛЕОРЕЛЬЕФА ПРИ ПОИСКАХ ПОГРЕБЁННЫХ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТЕЛ НА ЗАКРЫТЫХ ТРАППОНАСЫЩЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ (на примере Алакит-Мархинского поля)

Дана характеристика подходов к восстановлению палеорельефа кимберлитовмещающего цоколя (КВЦ) как важного фактора при поисках погребённых коренных месторождений алмазов. Предложена методика реконструкции палеорельефа «репер снизу», учитывающая неравномерность распределения по латерали стратонов и отдельных пластов, выделяемых геофизическими методами, влияние пликативных структур и общий региональный наклон КВЦ. Реконструированный рельеф КВЦ Алакит-Мархинского кимберлитового поля позволяет уточнить региональные и локальные направления переноса обломочного материала и индикаторных минералов кимберлитов (ИМК). Для некоторых идентифицированных ореолов ИМК и их частей на основе анализа реконструированного палеорельефа прогнозируются дополнительные не выявленные источники поступления.

Ключевые слова: Алакит-Мархинское поле, палеорельеф кимберлитовмещающего цоколя, ореолы индикаторных минералов кимберлитов.

Алакит-Мархинское кимберлитовое поле (АМКП) расположено в юго-западной части Далдыно-Алакитского алмазоносного района (ДААР) Якутской алмазоносной провинции (ЯАП, запад Республики Саха (Якутия)). В структурном плане поле находится на юго-западном склоне Анабарской антеклизы, в зоне перехода к Тунгусской синеклизе. Кимберлитовмещающий цоколь (КВЦ) сложен венд-нижнепалеозойским структурным ярусом. Перекрывающий комплекс формируют терригенные и вулканогенные образования позднепалеозойско-раннемезозойского структурного яруса. Все они прорываются пластовыми и секущими телами долеритов позднепермского-раннетриасового возраста.

Восстановление палеорельефа погребённого структурного этажа, включающего объекты поисков – месторождения полезных ископаемых – необходимо для выделения перспективных участков на обнаружение коренных источников по выявленным погребённым ореолам рассеяния алмазов, золота и других и/или их индикаторных минералов и химических элементов. На начальных стадиях поисковых работ на алмазы в закрытых районах ДААР ЯАП карты погребённого рельефа строились по абсолютным отметкам карбонатного КВЦ, вскрытого скважинами. По результатам структурного бурения на площади АМКП выявлено существенное усложнение структурного плана и рельефа цоколя кимберлитовмещающих нижнепалеозойских отложений, обусловленное внедрившимися на различных гипсометрических уровнях силлами долеритов крайне изменчивой мощности по латерали. Стало понятно, что использование напрямую значений



**Салихов
Равиль Фанисович**

главный специалист геологического отдела¹
salikhovrf@alrosa.ru

**Толстов
Александр Васильевич**

доктор геолого-минералогических наук,
директор²
tolstovav@alrosa.ru

**Салихова
Валентина Владимировна**

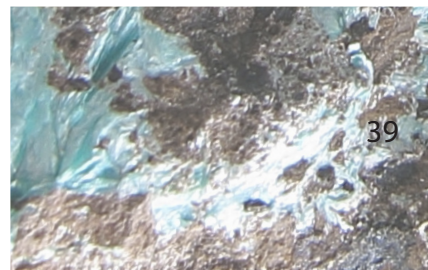
руководитель проекта¹
salikhovavv@alrosa.ru

**Кузьменок
Александра Николаевна**

ведущий геофизик¹
kuzmenokan@alrosa.ru

¹ Вилуйская геологоразведочная экспедиция АК «АЛРОСА» (ПАО),

² Научно-исследовательское геологоразведочное предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный



абсолютных отметок погребённого рельефа неприемлемо, поскольку оно приводит к системным отказам при поисках кимберлитовых тел на закрытых траппонасыщенных территориях. Это потребовало разработки методики восстановления палеорельефа по палеорекострукциям.

Методики построения палеорельефа. Палеорекострукции рельефа первоначально разрабатывались применительно к практике нефтегазовой геологии, т. к. для палеопостроений необходимы данные системного (площадного) бурения. Методики восстановления палеорельефа при поисках нефти и газа широко применяются, особенно при поисках неструктурных литолого-стратиграфических ловушек, а также для решения задачи прослеживания границ зон выклинивания (замещения) коллекторов [3, 10, 11]. Обусловлен интерес к подобным реконструкциям тем, что определённая часть таких ловушек связана с рельефом древних поверхностей континентальных перерывов (так называемые палеогеоморфологические ловушки).

Реконструкция древнего рельефа проводится методом реперных (опорных) поверхностей, предложенным В. А. Котлуковым [7]. Она основана на предположении, что осадки, слагающие опорный горизонт, формировались в пределах субгоризонтальной поверхности. Кровля или подошва такого пласта принимается за горизонтальную нулевую поверхность. Мощности по вертикали от выбранного элемента горизонта до анализируемой поверхности являются относительными превышениями палеорельефа над условным нулевым уровнем, но не абсолютными (!) высотами над уровнем моря и величинами мощностей коррелятных рельефу образований. Есть два пути реконструкции палеорельефа – «сверху» и «снизу». В первом случае за исходный горизонт-репер принимается поверхность выше исследуемой, во втором – ниже.

При реконструкции «сверху» анализируются мощности отложений, перекрывающих палеорельеф начиная с выбранного условного нулевого уровня – опорного слоя. Важным условием является обоснованный выбор опорного слоя (репера): он должен иметь региональное распространение, быть стратиграфически обоснован и обладать устойчивыми литологическими признаками, доказывающими его формирование в сходных условиях на обширной территории бассейна седиментации при отложении реперного слоя. Дополнительным критерием при выборе опорных слоёв является относительно близкое залегание к реконструируемой поверхности для минимизации влияния тектоники за время накопления выбранного стратона.

Методика сводится к определению мощности отложений от выбранного опорного слоя до анализируемой поверхности палеорельефа. На основе полученных данных строится карта изопахит, являющаяся обращённой (отрицательной) картой палеорельефа. На ней сокращённые мощности будут соответствовать положительным формам, а увеличенные – отрицательным элементам рельефа. Для привычной визуализации обычно дополнительно проводят математические операции инверсии (максимальное значение принимается за базовое и от него отнимают значения мощности в каждой скважине).

При реконструкции «снизу» выбирается опорный слой внутри слагающих палеорельеф отложений, для каждой скважины рассчитывается мощность до палеоповерхности, и на их основе строится карта изопахит. В методе «репер снизу» получается непосредственно рельеф размытой поверхности: увеличенные мощности интерпретируются как положительные формы рельефа, сокращённые отражают отрицательные элементы.

В большей части алмазоносных районов ЯАП, в частности приуроченных к восточному борту Тунгусской синеклизы (северо-запад Малоботубинского района и Моркокинский район), хорошо сохранился весь разрез верхнепалеозойских отложений от среднекаменноугольных свит (лапчанской и конёкской) до верхнепермской дегалинской свиты [13]. Это позволило на основе реконструкций «репер сверху» проследить эволюционное развитие палеорельефа для каждого мегацикла на протяжении длительного периода, воссоздать историю его развития, проследить эволюцию путей переноса алмазоносного материала и предположить направление поисков искоемых коренных источников алмазов [13, 15, 16]. Основной задачей палеопостроений при поисках на алмазы является восстановление наиболее древнего палеорельефа поверхности КВЦ, которое предлагалось осуществлять на основе проведения реконструкций по методу «репер сверху» [15].

Реконструкции на основе метода «репер снизу» довольно редко применяются в практике геологоразведочных работ. Для нефтегазовой геологии это обусловлено тем, что база данных по скважинам ограничивается в большинстве случаев глубинами промысловых горизонтов. Для алмазопроисковой геологии ограничения накладывает наличие в разрезе нижнепалеозойских кимберлитовмещающих отложений латерально изменчивых стратонов, для которых непонятно, как учитывать изменчивость их мощности (от нуля до нескольких десятков метров). Помимо классических способов построения палеорельефа на

основе реперных (опорных) поверхностей оригинальная методика восстановления основных форм погребённого рельефа предложена специалистами АК «АЛРОСА» (ПАО) на основе изучения морфоструктур базитового магматизма, широко проявленного на восточном склоне Тунгусской синеклизы, в т. ч. в рассматриваемом районе АМКП. Работами [2, 4, 6] установлен факт отрицательной коррелятивности планового распределения изопакит пермь-триасовых базитовых интрузивных вулканоструктур, которые выражены в современном рельефе, с элементами палеорельефа карбонатного цоколя в ранге палеодолин и древних водораздельных пространств.

Участки повышенной мощности субгоризонтальных интрузий долеритов имеют в плане вытянутые валлообразные формы, ориентированные длинной осью вдоль направлений основного продвижения магматического расплава. И. Г. Коробковым отмечается [6] преимущественная приуроченность валлообразных интрузий к днищам древних палеодолин. Сопряжённость тальвегов верхнепалеозойских водотоков и векторов движения базитовых расплавов выявляется, по его мнению, практически во всех алмазоносных районах ЯАП, где присутствуют интрузивные образования. Это даёт возможность определять направление регионального сноса обломочного материала, детализировать направления местного (локального) переноса алмазов и их индикаторных минералов в пределах отдельных площадей и локализовать кимберлитоперспективные участки [4, 6]. Соглашаясь, что в целом морфоструктурный план базитовых проявлений коррелируется с генеральными формами палеорельефа карбонатного цоколя, следует отметить наличие многочисленных факторов, которые вносят свой искажающий вклад в распределение объёмов базитовых тел (разрывная тектоника, литологические особенности верхнепалеозойских отложений как матрикса, куда внедряется базитовый расплав и пр.). Поэтому в практике алмазопроисковок работ данный методологический подход не нашёл широкого применения.

Реконструкции палеорельефа на площади АМКП. Палеореконструкции рельефа карбонатного цоколя на всю площадь АМКП на основе метода «репер сверху» впервые были применены в середине 1990-х годов (Фолисевич М. Я. и др., 1996, фондовые материалы). Уточнённая версия для локального участка «Структурный» в центральной части АМКП (площадь ~ 900 км²) была составлена в рамках тематических работ в 2000-х годах (Салихов Р. Ф. и др., 2008 г., фондовые материалы). За опорный пласт принималась граница контакта ниже- и

верхнеайхальской подсвит, представленная маркирующим горизонтом угленосных отложений. Айхальская свита является стратиграфическим аналогом средне-верхнекаменноугольной ботубинской свиты Моркокинского и Мало-Ботубинского алмазоносных районов – ключевого стратона для выбора элемента палеореконструкций по методу «репер сверху» [13, 16].

Отправной точкой для применения метода «репер сверху» было предположение, что бассейн осадконакопления терригенной толщи верхнего палеозоя был достаточно обширным, о чём свидетельствует выдержанный литологический состав этих отложений на значительных территориях к югу вплоть до Мало-Ботубинского района. Накопление осадков происходило в горизонтальном или очень близком к нему положении, которое при формировании конёкской и айхальской свит шло непрерывно, а отмечающиеся на отдельных участках незначительные местные перерывы существенной роли не играли. Положительным моментом при выборе этой границы была хорошая идентификация отложений по данным ГИС благодаря резкой смене гранулометрии пород с песчанистой на существенно глинистую.

Недостатком этого метода является то, что, по нашему мнению, надёжно идентифицировать границу можно лишь при условии сохранения в скважине отложений как ниже-, так и верхнеайхальской подсвит в достаточно большом объёме (не менее 20 м). Причина – обе подсвиты циклические, состоят из нескольких (обычно из двух) макроритмов мощностью около 10–30 м. Маркирующие углисто-глинистые отложения иногда входят в состав нескольких макроритмов, а иногда вообще отсутствуют в разрезе. Существенное влияние оказывают и силлы долеритов, часто внедряющиеся по границе между подсвитами, и приконтактовые изменения (осветление, ороговикование и пр.). Довольно уверенно выделять границу подсвит можно в западной и юго-западной части АМКП, где сохранились наиболее полные разрезы обеих подсвит. По мере движения на восток и северо-восток сокращается мощность разрезов подсвит, не всегда в них выявляется ритмичность, по которой можно идентифицировать границу подсвит.

К недостаткам также можно отнести фактор существенной неравномерности распределения выработок с маркирующим горизонтом угленосных отложений на границе ниже- и верхнеайхальской свит. По результатам проведённых нами работ, на основе анализа более 23 000 скважин и шурфов, в восточной части АМКП распределение таких отложений носит мозаичный характер, что

значительно снижает достоверность палеопостроений рельефа в восточной части поля. Так, к востоку от р. Сохолоох в АМКП, где расположены четыре из шести коренных месторождений алмазов, из более чем 7600 скважин с пересечениями выбранной границы на всей площади АМКП репер был встречен лишь в 1234 скважинах (рис. 1, а).

Неравномерность распределения точек с маркёром «репер сверху» и отсутствие уверенности в выделении границы «репер сверху» в восточной половине АМКП определили необходимость составить карту палеорельефа по методу «репер снизу». Первая такая карта на площадь АМКП была составлена В. П. Серовым, В. П. Афанасьевым (1999 г., фондовые источники) по недостаточно представительной базе данных, судя по обобщённой отрисовке форм рельефа. За репер был взят контакт между средне-верхнеордовикскими (кровля кылахской свиты) и нижнесилурийскими отложениями (подошва байтахской свиты). Величина сохранившейся от эрозии остаточной мощности силурийских отложений от подошвы репера до поверхности КВЦ принималась за значение высотной отметки палеорельефа (условный уровень) в точках наблюдения (скважинах).

Общий стратиграфический интервал отложений силура на площади АМКП охватывает диапазон от байтахской до неперендинской свиты (таблица) суммарной мощностью 160–200 м. Преобладающий фонд скважин на площади АМКП составляют выработки с углубкой в породы карбонатного цоколя < 20 м, что с учётом мощностей выделенных свит не позволяло надёжно проводить корреляцию разрезов нижнего палеозоя.

В связи с этим в практике поисков на алмазы на площади АМКП разрез каждой из нижнепалеозойских свит дополнительно расчленён на так называемые геофизические пласты. Под геофизическим пластом понимается интервал разреза свиты, характеризующийся выдержанностью по латерали таких параметров петрофизических свойств (естественной радиоактивности, магнитной восприимчивости и пр.), как интенсивность, внутренняя ритмичность, соотношение между различными петрофизическими характеристиками. Использование более дробной стратификации разреза позволило в большинстве поисковых скважин при стандартной углубке 20 м в нижнепалеозойские отложения вскрывать контакт между двумя геофизическими пластами, а в скважинах с углубкой 40–60 м – две-три геофизические границы и уверенно проводить корреляцию разрезов на площади АМКП.

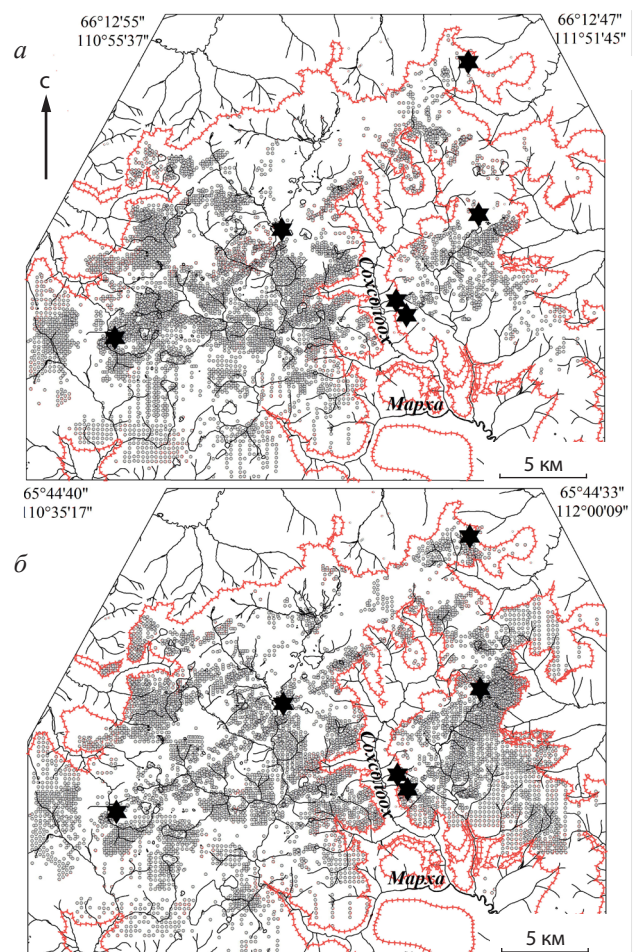


Рис. 1. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКВАЖИН С УСТАНОВЛЕННЫМИ ГРАНИЦАМИ НИЖНЕ- И ВЕРХНЕАЙХАЛЬСКОЙ ПОДСВИТ (а) И ОСТАТОЧНЫМИ МОЩНОСТЯМИ СИЛУРИЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ (б):

линия с бергштрихами – граница открытого карбонатного поля; звёздочками обозначены коренные месторождения алмазов; на всех рисунках контуры площади исследований совпадают

По мере накопления достаточного количества данных по скважинам появилась возможность составить на площадь АМКП уточнённый вариант карты палеорельефа карбонатного цоколя по методу «репер снизу». За репер нами была взята подошва байтахской свиты силура (подошва геофизического пласта 1). Базальные зеленоцветные мергели (иногда с прослоями и линзами конгломератов и гравелитов) байтахской свиты на площади АМКП залегают с размывом на различных слоях (геофизических пластах) красноцветных отложений кылахской свиты [1, 4]. Породы байтахской свиты с перекрывающими породами башен-

СВОДНЫЙ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ КИМБЕРЛИТОВМЕЩАЮЩИХ СРЕДНЕ-ПОЗДНЕОРДОВИКСКИХ И СИЛУРИЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ АМКП [14]

	Ярус	Свита	Мощность, м (в стратотипе) [5, 14]	№ геофизи- ческого пласта	Число пере- сечений	Мощность, м		
						от	до	средняя
Силурийская	Лландовер- рийский	Неппердинская <i>S_{1np}</i>	45,4	12				21
				11	44	5,8	18	18
				10	145	8,5	18,8	11
		Машковская <i>S_{1ms}</i>	106,1	9	229	4,4	31,6	17
				8	176	14,4	24,8	21
				7	446	2,6	20	6
				6	160	10	30,8	28
		Башенная <i>S_{1bs}</i>	43,6	5–4	68	28,6	72,8	49,5
Байтахская <i>S_{1bt}</i>	17	1–3	341	1	56,2	15		
Ордовикская	Карадокский – ашгилльский	Кылахская <i>O_{2-3kl}</i>	25,0	1/1–1/5	84	0	55	23,6
	Лланвирнский – лландейльский	Сытыканская <i>O_{2st}</i>	8,5–15,5	2	163	1,2	35,5	8,9

ной свиты имеют согласную границу и далее, весь разрез силурийских отложений не содержит перерывов и стратиграфических несогласий. Граница между кылахской и байтахской свитами надёжно отбивается не только по данным ГИС, но и, что особенно важно, по геологической документации в силу ярких вещественных отличий слагающих их пород. На площади АМКП имеется более 8300 скважин, пройденных в карбонатном цоколе с установленными границами между стратонами и геофизическими пластами. Распределение таких скважин по площади АМКП в целом более равномерное, чем выработок с границей «репер сверху» (см. рис. 1, б).

При определении остаточных мощностей использовалась база скважин, в которых был проведён комплекс ГИС, давший основу для проведения стратификации разреза скважин с выделением геофизических пластов. В качестве вспомогательных были использованы скважины, в которых не был проведён комплекс ГИС, но при геологической документации были установлены надёжные геологические границы. Это позволяет задействовать при расчётах весь фонд пробуренных скважин с данной границей, а не только с проведёнными ГИС, что повышает равномерность сети наблюдений.

Остаточная мощность силурийских отложений в каждой скважине обычно определялась добавлением средних мощностей геофизических пластов ниже вскрытой границы до подошвы байтахской свиты (см. табл.). Вместе с тем проведённый авторами анализ их распределения по латерали позволил установить, что мощности геофизических пластов изменчивы по площади АМКП в разной мере, но сильно. Для учёта реальной мощности в каждой скважине в программе *GEOSOFT* на основе скважин с полными пересечениями геофизических пластов и/или стратонов составлялись карты изопахит (гриды) для каждого из них. Далее значения мощностей каждого геофизического пласта или стратона с карты изопахит в каждой точке наблюдения (скважина, шурф) на площади АМКП добавлялись к значениям мощности силурийских отложений выше вскрытой границы и составлялась база остаточных мощностей силура. Полученная карта остаточных мощностей позволяет определить возможные направления поступления кимберлитового материала при формировании большей части выявленных ореолов индикаторных минералов кимберлитов (ИМК).

При создании карты палеорельефа на базе остаточных мощностей силурийских отложений необходимо всегда учитывать, что она строится на

предположении о строго горизонтальном залегании пород карбонатного цоколя на момент захоронения его рельефа перекрывающими верхнепалеозойскими отложениями. В этом случае остаточная мощность напрямую отражает относительные превышения палеорельефа перед захоронением: чем больше мощность в точке наблюдения, тем гипсометрически выше она (точка) располагалась относительно окружающих. На небольших по площади поисковых участках это допущение верно и не искажает картины направлений сноса ИМК для ореолов рассеяния. Поэтому карта остаточных мощностей является основной картой для работы при определении направления дальнейших поисковых работ по обнаружению возможных коренных источников выявленных ореолов ИМК (рис. 2).

Не меньшую по значимости для поискового прогнозирования роль играет карта остаточных мощностей и для выявления важных элементов локального структурного прогноза – околодиатремовых мульд оседания [9]. Околодиатремовые мульды оседания, которые сопровождают развитие большинства кимберлитовых трубок (диатрем), на карте остаточных мощностей силурийских отложений выражаются в появлении локальных, в той или иной мере субизометричных понижений (западин) в рельефе цоколя.

При использовании значений остаточных мощностей силура для палеогеографических реконструкций учитывалось предположение о горизонтальном залегании пород карбонатного цоколя, унаследовавших относительные превышения, на момент его захоронения перекрывающимися верхнепалеозойскими отложениями. Это применимо при рассмотрении палеогеографической обстановки на площади локальных субизометричных по форме поисковых участков, но при региональном анализе палеогеографической обстановки (начиная с ранга кимберлитового поля или его части) фактор фактического наклонного залегания пород карбонатного цоколя вносит существенные искажения. Кроме этого, ложные увеличения амплитуд относительных превышений по остаточной мощности получаются и за счёт пликтивных деформаций. При строго горизонтальной поверхности выравнивания остаточные мощности, полученные по скважинам, пробуренным в синформных структурах (синклиналиях, мульдах, впадинах), будут больше, чем на антиформных структурах (антиклиналиях, поднятиях). В этом случае при реконструкции вместо горизонтальной линии поверхности выравнивания получаются «поднятия» над синформами и «прогибы» над антиклиналиями и поднятиями.

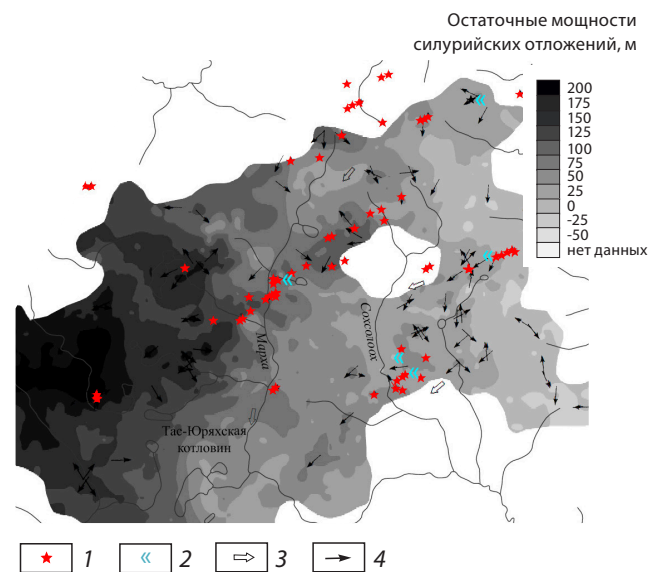


Рис. 2. КАРТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ МОЩНОСТЕЙ ОТЛОЖЕНИЙ СИЛУРА НА ПЛОЩАДИ АМКП:

отрицательные значения – участки с эродированными отложениями силура, на которых определялась мощность эродированных отложений ниже подошвы байтахской свиты; 1 – кимберлитовые тела; 2 – месторождения алмазов; 3 – локальные направления сноса; 4 – региональные направления сноса

Учесть эти факторы – региональный наклон и локальные пликтивные деформации – и внести на них поправки можно, используя данные структурного плана платформенного чехла, исходя из предположения, что палеорельеф КВЦ АМКП унаследован поверхностью кристаллического фундамента. Такое допущение вполне оправдано, т. к. терригенно-карбонатные породы нижнего палеозоя, несмотря на всё их разнообразие, довольно близки между собой по степени устойчивости к факторам денудации. Этим ситуация перед непосредственным захоронением палеоперехности карбонатного цоколя резко отличается от современной обстановки, в которой существенным фактором рельефообразования является степень насыщенности эродируемого геологического разреза долеритовыми интрузиями.

Детали строения поверхности фундамента наиболее полно отражаются на структурной карте кровли старореченской свиты венда, построенной П. И. Гапотченко по сейсмическим данным – отражающему горизонту КВ (рис. 3) [12]. Указанный сейсмогоризонт отделён от поверхности кристаллического фундамента маломощной толщей осадочных пород (160–200 м) и наследует её формы, отражая характер перестройки фундамента

на этапах платформенного развития территории. Абсолютный уровень залегания поверхности КВ ступенчато (террасовидно) погружается в сторону Тунгусской синеклизы от 1800 м на северо-восточном фланге Далдынского поля до 2950 м в районе тр. Моркока.

На структурной карте отмечается приуроченность подавляющего большинства кимберлитовых тел к малоамплитудным отрицательным структурам (типа депрессий), и лишь единичные тела наблюдаются в сводах антиформных структур. Статистическим анализом установлено, что кимберлитовые тела в ДААР размещаются на расстоянии 980 м от осей синформ (депрессий) и 1860 м от осей антиформ (поднятий), т. е. их локализация в синформных структурах предпочтительнее в два раза [12].

Именно отчётливо выраженный контроль размещения кимберлитовых тел пликативными (синформными) дислокациями, сохранившимися и в современном структурном плане поверхности фундамента и, соответственно, горизонта КВ, позволяет предположить, что на момент захоронения палеорельефа карбонатного цоколя рельеф фундамента и соответственно горизонта КВ были близки к современному. Речь идёт не об абсолютных значениях, а об относительных превышениях поднятий над впадинами, направлении общего наклона и пр. В противном случае при значительной перестройке рельефа фундамента после внедрения кимберлитов указанные закономерности вряд ли бы сохранились.

По сейсмоданным, для платформенного чехла установленным является факт уменьшения амплитуды пликативных структур в направлении от фундамента к дневной поверхности. Происходит как бы рассеивание пликативных деформаций по восстанию. Для учёта этого явления при расчётах значений восстановленного палеорельефа на основе горизонта КВ абсолютный уровень залегания поверхности КВ брался не в чистом виде, а из грида, составленного методом осреднения окном 10 × 10 км (рис. 4). Значение восстановленного палеорельефа в точке (скважине) складывалось из суммы значений залегания поверхности КВ в точке по гриду 10 × 10 км, мощности нижнепалеозойских отложений от кровли старореченской свиты до подошвы байтахской свиты (~ 2800 м) и остаточной мощности силурийских отложений. На основе рассчитанных значений была построена карта реконструированного рельефа (рис. 5).

Для определения палеогеографической обстановки формирования ореолов ИМК составлены литолого-геологические планы подошвенных горизонтов конёкской свиты и нижеайхальской

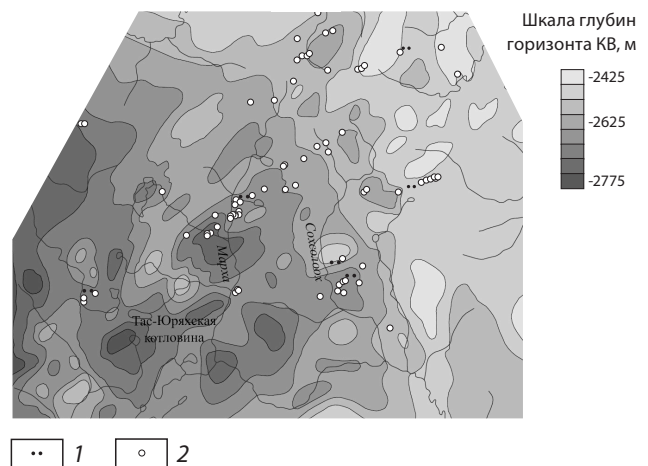


Рис. 3. СТРУКТУРНЫЙ ПЛАН ГОРИЗОНТА КВ НА ПЛОЩАДИ АМКП

1 – месторождения алмазов; 2 – кимберлитовые тела

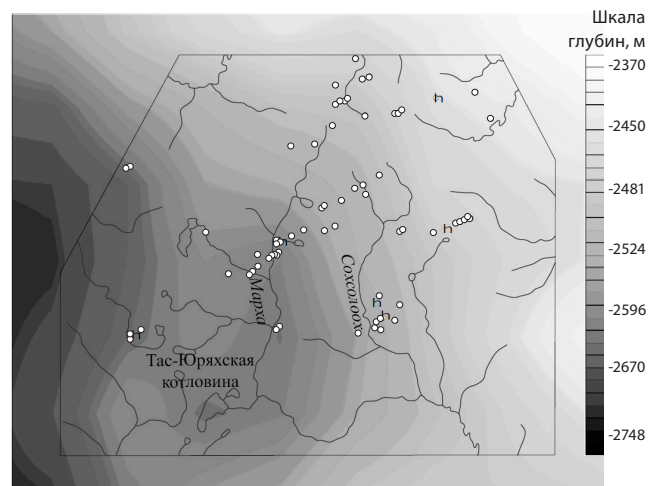


Рис. 4. ГРИД ПОВЕРХНОСТИ ГОРИЗОНТА КВ (окно осреднения 10 × 10 км):

кружками обозначены кимберлитовые трубки и жилы

подсвиты. При построении карты использовалась база данных АК «АЛРОСА» первичной документации поисковых скважин, стратиграфии и литологии базальных горизонтов, а также материалы специализированных схем и карт из производственных отчётов. Совместный анализ вышеуказанных материалов позволил (с определённой долей условности) установить палеогеографическую обстановку в пределах АМКП на момент формирования подошвенных горизонтов каменноугольных отложений, закартировать в рельефе карбонатного цоколя протяжённые палеодолины и разделяющие их водораздельные пространства, локальные палеоподнятия и палеодепрессии. На планах достаточно ясно прослеживаются регио-

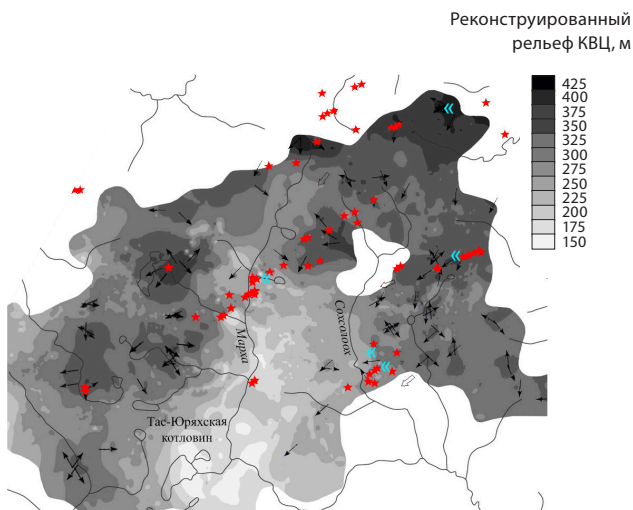


Рис. 5. КАРТА РЕКОНСТРУИРОВАННОГО РЕЛЬЕФА НА ПЛОЩАДИ АМКП:

усл. обознач. см. рис. 2

нальные и локальные направления сноса обломочного материала и ИМК, а также приуроченность шлиховых ореолов (особенно обширных) к определенным литодинамическим типам осадков.

По реконструируемому палеорельефу в палеогеоморфологическом плане территория АМКП представляла собой слаборасчлененную эрозионно-денудационную равнину. В целом степень расчлененности рельефа и перепад высот между самыми высокими и самыми низкими отметками близки к современному для района близлежащего (50–60 км) Далдынского кимберлитового поля, где отсутствуют перекрывающие КВЦ образования. Максимальная отметка водораздела на листе Q-49-57-В, Г (тр. Удачная) 480,4 м, минимальная на листе Q-49-58-В, Г (тр. Зарница) 262 м (устье р. Киенг в месте впадения в р. Далдын), перепад 218 м.

Основным элементом, определяющим особенности рельефа территории, является обширный амфитеатр, обрамляющий линейную палеодолину субмеридионального простирания, совпадающую примерно с долиной современной р. Мархи. В крайней западной части рассматриваемой площади фрагментарно картируется другая палеодепрессия, уходящая за рамки площади АМКП. Контуры палеодолины р. Марха извилистые, что обусловлено широким развитием боковых притоков. Палеодолина берёт своё начало на возвышенной северной части АМКП и сливается в южной его части с субизометричной Тас-Юряхской котловиной, уходящей за пределы изученной площади к югу. Протяжённость палеодолины в пределах АМКП 44 км, ширина от 0,5–1,2 км в верх-

нем течении до 9–10 км в нижней части. Превышения водораздельных частей над тальвегом долины в верховьях составляют 50–70 м, в средней и нижней частях (начиная с района оз. Гусиного – тр. Файнштейновская) 150–160 м. Общий перепад высот водораздельной отметки от истоков до нижней части долины составляет 240 м.

Центральная часть Тас-Юряхской котловины располагается в районе современного руч. Тас-Юрях. Размеры её в пределах изученной территории – 23 × 15 км от истоков руч. Быстрый, простирание северо-северо-восточное. Котловина осложнена рядом локальных палеоподнятий, из которых наиболее известно – в районе руч. Глубокий. Относительные превышения палеоподнятий над дном котловины 100–225 м.

Отсутствие в днище Тас-Юряхской котловины продуктов разрушения кимберлитовых тел, в том числе россыпей алмазов, объясняется двумя факторами. Во-первых, днище котловины сложено отложениями нижнеайхальской подсвиты, т. е. наиболее насыщенные ИМК отложения конёкской свиты, которые могли ранее сформироваться в днище котловины (а это вполне вероятно, т. к. в северной части котловины, севернее Глубоценского поднятия, базальный горизонт представлен конёкскими отложениями), уничтожены эрозионными процессами.

Во-вторых, базальный горизонт днища котловины представлен преимущественно мелкими по гранулометрии разностями терригенных пород (углистыми алевролитами и песчаниками, тонко-мелкозернистыми песчаниками, редко с галькой и гравием). Грубообломочные фации (конгломераты, гравелиты, брекчии) сохранились в виде небольших локальных фрагментов. Наиболее вероятный механизм формирования этой ситуации такой: в наиболее погружённой части котловины находятся более молодые отложения с более тонким гранулометрическим составом и низкими содержаниями ИМК – это развитие «полноводного» гидрологического режима на стадии погребения речной долины [8], которое приводит к рассеянию ИМК в условиях выположенного мигрирующего русла в пределах широкого днища долины. Возможность формирования палеогеографической ситуации в районе Тас-Юряхской котловины по данному сценарию (когда возможно отсутствие ореолов ближнего сноса от кимберлитов) необходимо учитывать при оценке перспектив прогнозируемых продолжений рудовмещающих разломов Айхальский, Ноябрьский и Чукукский, трассирующихся через центральную часть котловины.

По данным Устинова В. И. [15], древний рельеф КВЦ восточного склона Тунгусской синеклизы раз-

вивался унаследовано на протяжении позднего палеозоя, что выразилось в последовательном заполнении разноранговых форм рельефа на фоне постепенного снижения его контрастности и выполаживания продольных профилей палеодолин: от 1–2 м/км в начале среднего карбона до 0,1–0,5 м/км в ранней – средней перми. Незначительные уклоны реконструированных водотоков свидетельствуют об их низкой энергетической способности и обуславливают более тонкую гранулометрию осадков, формирующих заполнение форм палеорельефа.

Помимо крупной палеодолины субмеридиональной ориентировки на территории АМКП картируется ряд других палеодолин или их фрагментов более низкого порядка, заполненных аллювиальными фациями псаммито-псефитовых русловых отложений. К ним довольно часто приурочены и обширные площадные шлиховые ореолы с концентрациями ИМК, достигающими весовых значений. Особо выделяется крупный палеоводоток, протягивающийся от района тр. Сытыканская в юго-западном направлении, совпадающем с современной долиной р. Сохолоох, и примыкающего к Тас-Юрхской котловине в районе истоков современного руч. Быстрый, по которому отмечается преобладающее направление сноса обломочного материала с севера на юг. При анализе комплекта карт палеорельефа появились дополнительные данные, позволяющие предполагать другие (дополнительные) источники поступления ИМК для ранее уже идентифицированных ореолов или их частей. Для подтверждения корректности выводов авторов об идентификации ореолов рассеяния ИМК на основе реконструированного палеорельефа был проведён анализ положения ореолов ИМК по карте остаточных мощностей силура. По мнению авторов, формирование части существующих ореолов ИМК не может быть полностью объяснено известными кимберлитовыми телами, например:

- ореол тр. Юбилейная – его северо-западные и, возможно, юго-западные части отделены от тр. Юбилейная депрессией в рельефе, из-за которой продукты разрушения трубки не могли попасть в данные участки. Более вероятно поступление ИМК из самостоятельного коренного источника – с палеовозвышенности севернее оз. Бадаран;
- ореол тр. Олимпийская – его северная и северо-восточная части располагаются гипсометрически на 25–50 м выше самой тр. Олимпийская (рис. 6);
- ореол ИМК куста тр. Соболева и тр. Одинцова – возвышенность юго-западнее тр. Щукина и от-

рог юго-восточнее тр. Одинцова не позволяют предполагать наличие связи юго-юго-западной части ореола ИМК с трубками куста. Обращает на себя внимание наличие локальной «вспышки» ИМК высоких классов сохранности в районе скв. 8448А, располагающегося как раз на возвышенности к юго-западу от тр. Щукина – вероятно, часть ИМК в рассматриваемом ореоле поступала от ещё не установленного коренного источника в районе данного локального поднятия;

- ореол тр. Победа – его северная, часть центральной и юго-восточная части отделены от тр. Победа понижениями в рельефе, из-за которых продукты дезинтеграции трубки не могли попасть в данные участки;
- ореол тр. Восток – его юго-восточная и, возможно, юго-западная части отделены от тр. Восток понижениями в рельефе, из-за которых продукты разрушения трубки не могли попасть в данные участки и ряд других ореолов.

Созданная карта восстановленного палеорельефа позволяет получить представление об общем региональном направлении переноса обломочного материала и ИМК. На ней подтверждается ранее установленный факт тяготения кимберлитовых тел к водораздельным частям и склонам палеовозвышенностей, что позволяет прогнозировать новые объекты.

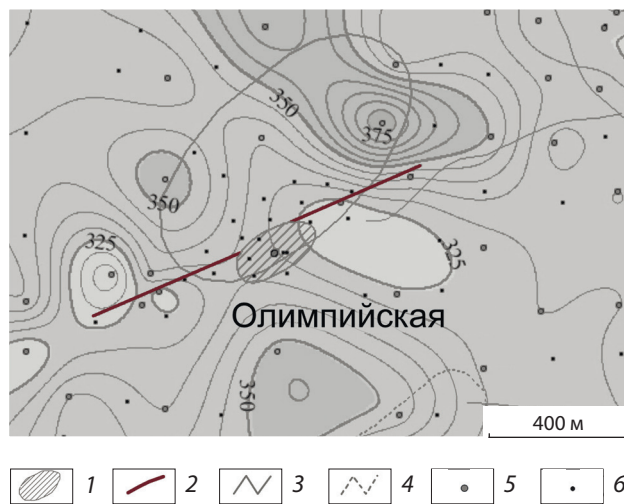


Рис. 6. ПОЛОЖЕНИЕ ИДЕНТИФИЦИРОВАННОГО ОРЕОЛА ИМК В РАЙОНЕ ТР. ОЛИМПЕЙСКАЯ В РЕКОНСТРУИРОВАННОМ ПАЛЕОРЕЛЬЕФЕ НА БАЗЕ ОСТАТОЧНЫХ МОЩНОСТЕЙ СИЛУРИЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ (горизонталы проведены через 5 м):

1 – трубки; 2 – жилы; ореолы ИМК: 3 – идентифицированные, 4 – неидентифицированные; 5 – скважины с установленными значениями остаточных мощностей силурийских отложений; 6 – рядовые скважины

Заключение. При поисках погребённых коренных месторождений алмазов в условиях траппонасыщенных разрезов кимберлитовмещающих образований и сокращённых по мощности и полноте ритмов разрезов средне-верхнекаменноугольных отложений восстановление палеорельефа КВЦ целесообразно проводить по методике «репер снизу». Требованиям к опорному реперу в условиях АМКП наиболее полно отвечает контакт между средневерхнеордовикскими (кровля кылахской свиты) и нижнесилурийскими отложениями (подшва байтахской свиты). Палеорельеф КВЦ аппроксимируется как остаточная мощность силурийских отложений от репера до поверхности цоколя. Для учёта латеральной изменчивости мощностей стратонов и геофизических пластов, на основе которых рассчитывается остаточная мощность силурийских отложений, необходимо строить для каждого из них карты изопохит, значения которых в каждой точке наблюдения будут более достоверно отражать картину вместо среднего для площади АМКП.

При реконструкции палеорельефа на значительных площадях (ранга кимберлитового поля) необходимо вносить поправки на региональный наклон и пликативные деформации структур КВЦ. В условиях АМКП это можно выполнять на основе осреднения структурного плана сейсмического горизонта КВ окном 10 × 10 км. Численный показатель реконструированного палеорельефа в отдельной точке (скважине) складывается из суммы значений залегания поверхности КВ в точке по гриду 10 × 10 км, мощности нижнепалеозойских отложений от кровли старореченской свиты до подошвы байтахской свиты (~ 2800 м) и остаточной мощности силурийских отложений.

Реконструированный таким образом рельеф КВЦ АМКП позволяет уточнить региональные и локальные направления переноса обломочного материала, алмазов и ИМК. На основе анализа для некоторых ореолов ИМК восстановленного палеорельефа прогнозируются новые коренные источники алмазов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бергер А. Я., Ковалевская Е. О., Тесаков Ю. И., Хромых В. Г. Пограничные отложения ордовика и силура в междуречье Оленека, Мархи и Моркоки (северо-восток Сибирской платформы) // Региональная геология и металлогения. – 2014. – № 58. – С. 54–58.
2. Васильев А. П., Бочкарева В. И., Коробков И. Г., Формы отражения морфоструктур кимберлитовмещающих образований в строении интрузивного комплекса базитовых вулканоструктур в Западной Якутии : Материалы XXVI Всероссийской молодёжной конференции (Иркутск, 20–25 апреля, 2015) // Строение литосферы и геодинамика. – Иркутск : ИЗК СО РАН, 2015. – С. 40–41.
3. Горина Д. Б., Илюхин Л. Н., Кузнецов В. Г., Постникова О. В., Тихомирова Г. И. О механизме формирования рифейского природного резервуара Юрубчено-Тохомской зоны // Геология нефти и газа. – 1992. – № 9. – С. 22–25.
4. Евстратов А. А. Базитовые вулканоструктуры северо-востока Тунгусской синеклизы (в связи с проблемой изучения алмазоносных "закрытых" территорий) : специальность 25.00.01 «Общая и региональная геология» : дис. на соискание степ. канд. геол.-минерал. наук // Алексей Андреевич Евстратов. – Иркутск : ИЗК СО РАН, 2015. – 181 с.
5. Каныгин А. В., Ядрёнкина А. Г., Тимохин А. В., Москаленко Т. А., Сычев О. В., Конторович А. Е. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Ордовик Сибирской платформы. – Новосибирск : ГЕО, 2007. – 269 с.
6. Коробков И. Г. Тектоника, палеогеография и базитовый магматизм алмазоносных районов восточного борта Тунгусской синеклизы. – Иркутск : ИЗК СО РАН, 2015. – 353 с.
7. Котлуков В. А. Значение и методы построения реконструкций палеорельефа суши платформенных областей // Методы палеогеоморфологических исследований. – М. : Недра, 1964. – Вып. 1. – С. 96–108.
8. Лелюх М. И., Родионов Н. Т. Поисковое значение палеогеоморфологических условий рассеяния и вторичной концентрации минералов-спутников алмаза на примере отдельных районов Западной Якутии // Наука и образование. – 2016. – № 1 (81). – С. 27–31.
9. Никулин В. И., Лелюх М. И., Фон-дер-Флаас Г. С. Алмазопрогностика : методическое пособие. – Иркутск : Алмаз-Прогноз, 2002. – 320 с.
10. Полянский Р. В., Турова А. В. Палеогеоморфология перспективной нефтегазоносной толщи венда юго-западной Якутии // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2012. – Т. 7, № 2. – 16 с. – URL: http://www.ngtp.ru/rub/2/30_2012.pdf.
11. Проницева М. В., Жернаков П. И. Опыт разработки количественных методов анализа палеорельефа // Геоморфология. – 1970. – №. 1. – С. 70–82.
12. Салихов Р. Ф., Гапотченко П. И., Зюзин Ю. М., Морозова Н. Е., Салихова Н. Н., Цой И. Г. Крупномасштабная прогнозная оценка территории на алмазы на основе ГИС-технологий (на примере юго-западной части Алакит-Мархинского кимберлитового поля) //

Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях, научное и методико-технологическое обеспечение их решений. – Якутск : РАН, ЯНЦ СО, 2008. – С. 274–281.

13. Салтыков О. Г., Эринчек Ю. М., Устинов В. Н., Мильштейн Е. Д. Позднепалеозойские терригенные коллекторы алмазов восточного борта Тунгусской синеклизы. – СПб. : ВСЕГЕИ, 1991. – 223 с.
14. Тесаков Ю. И., Предтеченский Н. Н., Лопушинская Т. В., Хромых В. Г., Базарова Л. С., Бергер А. Я., Ковалевская Е. О. Силур Сибирской платформы. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. – Новосибирск : СО РАН, GEO, 2000. – 403 с.
15. Устинов В. Н. Прогнозирование и поиски погребённых месторождений алмазов на основе комплексного изучения позднепалеозойских терригенных коллекторов : специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения» : автореф. дис. на соискание степ. д-ра геол.-минерал. наук / Виктор Николаевич Устинов. – СПб., 2009. – 24 с.
16. Устинов В. Н., Салтыков О. Г., Эринчек Ю. М. Реконструкция позднепалеозойского рельефа восточного борта Тунгусской синеклизы (Малоботуобинский и Моркокинский алмазоносные районы) // Геоморфология. – 1992. – № 3. – С. 90–96.

REFERENCES

1. Berger A. Ya., Kovalevskaya E. O., Tesakov Yu. I., Khromykh V. G. Pogranichnye otlozheniya ordovika i silura v mezhdurech'e Oleneka, Markhi i Morkoki (severo-vostok Sibirskoi platformy) [Border deposits of Ordovician and Silurian in the interfluvium of Olenek, Markha and Morkoki (northeast of the Siberian platform)], *Regional'naya geologiya i metallogeniya [Regional Geology and Metallogeny]*, 2014, No 58, pp. 54–58. (In Russ.)
2. Vasil'ev A. P., Bochkareva V. I., Korobkov I. G. Formy otrazheniya morfostruktur kimberlitovmeshchayushchikh obrazovaniy v stroenii intruzivnogo kompleksa bazitovykh vulkanostuktur v Zapadnoi Yakutii : Materialy XXVI Vserossiiskoi molodezhnoi konferentsii (Irkutsk, 20–25 aprelya, 2015) [Forms of reflection of morphostructures of kimberlite-bearing formations in the structure of the intrusive complex of basic volcanostuctures in Western Yakutia: Proceeding of the XXVI All-Russian Youth Conference (Irkutsk, April 20–25, 2015)], *Stroenie litosfery i geodinamika [Lithosphere structure and geodynamics]*, Irkutsk, IZK SO RAN Publ., 2015, pp. 40–41. (In Russ.)
3. Gorina D. B., Ilyukhin L. N., Kuznetsov V. G., Postnikova O. V., Tikhomirova G. I. O mekhanizme formirovaniya rifeiskogo prirodnoho rezervuara Yurubcheno-Tokhomskei zony [About the mechanism of formation of the Riphean natural reservoir of the Yurubcheno-Tokhomsky zone], *Geologiya nefiti i gaza [Oil and Gas Geology]*, 1992, No 9, pp. 22–25. (In Russ.)
4. Evstratov A. A. Bazitovye vulkanostuktury severo-vostoka Tungusskoi sineklizy (v svyazi s problemoi izucheniyaalmazonosnykh "zakrytykh" territorii): spetsial'nost' 25.00.01 "Obshchaya i regional'naya geologiya": dis. na soiskanie step. kand. geol.-mineral [Base volcanic structures of the north-east of the Tunguska syncline (in connection with the problem of studying diamond-bearing "closed" territories): Candidate's thesis], Irkutsk, IZK SO RAN Publ., 2015, 181 p.
5. Kanygin A. V., Yadrenkina A. G., Timokhin A. V., Moskalenko T. A., Sychev O. V., Kontorovich A. E. Stratigrafiya neftegazonosnykh basseinov Sibiri. Ordovik Sibirskoi platformy [Stratigraphy of the oil and gas basins of Siberia. Ordovician of the Siberian platform], Novosibirsk, GEO Publ., 2007, 269 p.
6. Korobkov I. G. Tektonika, paleogeografiya i bazitovyy magmatizmalmazonosnykh raionov vostochnogo borta Tungusskoi sineklizy [Tectonics, paleogeography and basic magmatism of diamondiferous regions of the eastern side of the Tunguska syncline], Irkutsk, IZK SO RAN Publ., 2015, 353 p.
7. Kotlukov V. A. Znachenie i metody postroeniya rekonstruktsii paleoreliefa sushi platformennykh oblastei [Significance and methods of constructing reconstructions of the paleorelief of platform areas], *Metody paleogeomorfologicheskikh issledovaniy [Paleogeomorphological research methods]*, Moscow, Nedra Publ., 1964, V. 1, pp. 96–108 (In Russ.).
8. Lelyukh M. I., Rodionov N. T. Poiskovoe znachenie paleogeomorfologicheskikh uslovii rasseyaniya i vtorichnoi kontsentratsii mineralov-sputnikov almaza na primere otdel'nykh raionov Zapadnoi Yakutii [Search value of paleogeomorphological scattering conditions and secondary concentration of diamond satellite minerals by the example of certain regions of Western Yakutia], *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki [Arctic and Subarctic Natural Resources]*, 2016, No 1 (81), pp. 27–31 (In Russ.).
9. Nikulin V. I., Lelyukh M. I., Fon-der-Flaas G. S. Almazoprognostika: metodicheskoe posobie [Diamond Diagnostics: A Toolkit], Irkutsk, Almaz-Prognoz Publ., 2002, 320 p.
10. Polyanskii R. V., Turova A. V. Paleogeomorfologiya perspektivnoi neftegazonosnoi tolshchi venda yugo-zapadnoi Yakutii [Paleogeomorphology of the prospective oil and gas bearing strata of the Vendian of so-

- uthwestern Yakutia), *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika [Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies]*, 2012, V. 7, No 2. (In Russ.). Available at: http://www.ngtp.ru/rub/2/30_2012.pdf.
11. Pronicheva M. V., Zhernakov P. I. Opyt razrabotki kolichestvennykh metodov analiza paleorel'efa [Experience in developing quantitative methods for analyzing paleorelief], *Geomorfologiya [Geomorphology RAS]*, 1970, No. 1, pp. 70–82 (In Russ.).
 12. Salikhov R.F., Gapotchenko P. I., Zyuzin Yu. M., Morozova N. E., Salikhova V. V., Tsoi I. G. Krupnomashtabnaya prognoznaya otsenka territorii na almazy na osnove GIS-tekhnologii (na primere yugo-zapadnoi chasti Alakit-Markhinskogo kimberlitovogo polya) [Large-scale predictive assessment of the territory for diamonds based on GIS technologies (using the example of the southwestern part of the Alakit-Markhinsky kimberlite field)], *Problemy prognozirovaniya i poiskov mestorozhdenii almazov na zakrytykh territoriyakh, nauchnoe i metodiko-tekhnologicheskoe obespechenie ikh reshenii [Problems of forecasting and prospecting for diamond deposits in closed areas, scientific, methodological and technological support for their solutions]*, Yakutsk, RAN, YaNTs SO Publ., 2008, pp. 274–281.
 13. Saltykov O. G., Erinchek Yu. M., Ustinov V. N., Millshtein E. D. Pozdnepaleozoiskie terrigennye kolektory almazov vostochnogo borta Tungusskoi sineklizy [Late Paleozoic terrigenous diamond collectors on the eastern side of the Tunguska syncline], St. Petersburg, VSEGEI Publ., 1991, 223 p.
 14. Tesakov Yu. I., Predtechenskii N. N., Lopushinskaya T. V., Khromykh V. G., Bazarova L. S., Berger A. Ya., Kovalevskaya E. O. Silur Sibirskoi platformy. Stratigrafiya neftegazonosnykh basseinov Sibiri [Silurian Siberian platform. Stratigraphy of oil and gas basins of Siberia], Novosibirsk, SO RAN, GEO Publ., 2000, 403 p.
 15. Ustinov V. N. Prognozirovaniye i poiski pogrebennykh mestorozhdenii almazov na osnove kompleksnogo izucheniya pozdnepaleozoiskikh terrigennykh kolektorov : spetsial'nost' 25.00.11 "Geologiya, poiski i razvedka tverdykh poleznykh iskopaemykh, minerageniya" : avtoref. dis. na soiskanie step. d-ra geol.-mineral. nauk [Prediction and search for buried diamond deposits based on a comprehensive study of Late Paleozoic terrigenous reservoirs. Extended abstract of Doctor's thesis], St. Petersburg, 2009, 24 p.
 16. Ustinov V. N., Saltykov O. G., Erinchek Yu. M. Rekonstruktsiya pozdnepaleozoiskogo rel'efa vostochnogo borta Tungusskoi sineklizy (Malobotuobinskii i Morkokinskii almazonosnye raiony) [Reconstruction of the Late Paleozoic relief on the eastern side of the Tunguska syncline (Malobotuobinsky and Morkokinsky diamondiferous regions)], *Geomorfologiya [Geomorphology RAS]*, 1992, No 3, pp. 90–96. (In Russ.)

PALEORELIEF RECONSTRUCTIONS IN SEARCHING FOR BURIED KIMBERLITE BODIES WITHIN CLOSED TRAPP ABUNDANT AREAS (by the example of the Alakit-Markha kimberlite field)

Salikhov R. F. (chief specialist of the geological department)

Tolstov A. V. (Doctor of geological and mineralogical sciences, director of the research geological enterprise)

Salikhova V. V. (project manager)

Kuzminok A. N. (lead geophysicist)

«ALROSA JSC» (Public Company), Mirny

In the paper, we have described the techniques of kimberlite enclosing socle (basis, KES) paleorelief reconstruction as a significant factor in searching for buried primary diamond deposits. We have also proposed a so called "underneath datum mark" technique that takes into account strata and specific layers determined by geophysical methods along the lateral distribution irregularity, plicate structures effect and general regional tilt KES. The reconstructed KES relief of the Alakit-Markha kimberlite field allows to clarify regional and local directions of clastic products and kimberlite indicator minerals (KIM) transportation. For several previously identified KIM's aureoles and their parts some additional entry sources introduces are predicted based on the reconstructed paleorelief analysis.

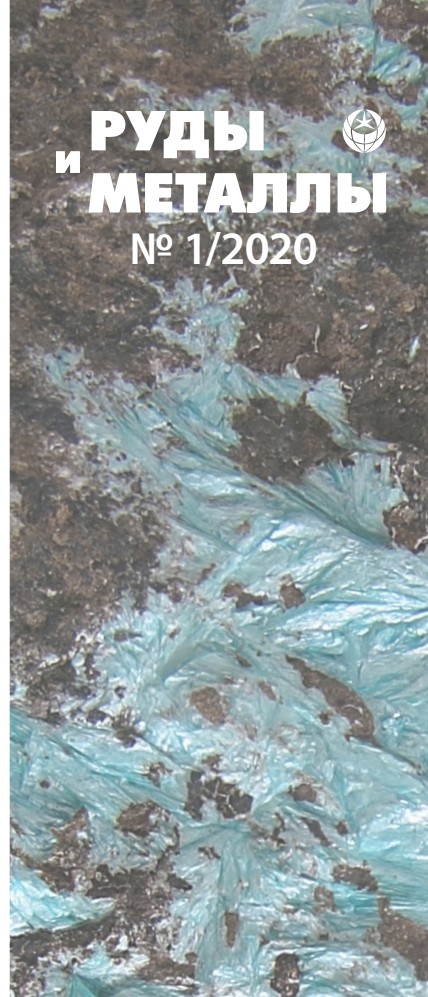
Keywords: Alakit-Markha field; paleorelief of a kimberlite enclosing socle (basis); kimberlite indicator minerals aureoles.

ТИПОМОРФИЗМ САМОРОДНОГО ЗОЛОТА КАК ИНДИКАТОР РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ОРУДЕНЕНИЯ КРУПНОГО СКАРНОВО-ПОРФИРОВОГО Au-Fe-Cu МЕСТОРОЖДЕНИЯ БЫСТРИНСКОЕ, ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ

Статья восполняет отсутствие публикаций по одному из главных промышленных компонентов Быстринского месторождения – золоту. Установлены особенности распределения самородного золота в рудах, частотность образования золотинок в различных минералах-матрицах, вариации состава, морфология и гранулометрический состав. Показано, что отложение самородного золота связано со всеми стадиями процесса минералообразования: апоскарновой, порфировой и полиметаллической. Наиболее информативная типоморфная характеристика самородного золота – состав: отмечена зависимость пробности от принадлежности самородного золота к той или иной части процесса минералообразования и отчасти от глубины локализации золотого оруденения. Выявлены закономерности редкого для месторождения обогащения отдельных участков руд золотом. Они приурочены к зонам трещиноватости и переработки первичных руд при наложении поздних процессов. Минеральным индикатором обогащения руд золотом является сонахождение пирит-халькопиритовых с магнетитом агрегатов предпочтительно в серпентинизированных апоскарнах с минералами, замещающими их. Среди них могут быть валлериит, халькопирит и магнетит последующих генераций (в т. ч. W-магнетит), пирит (особенно Co-пирит), сульфотеллуриды Vi, сульфиды полиметаллов, сульфосоли и др., что свидетельствует о переработке первичных концентраций Au. Геохимические маркеры обогащённых золотом руд – возрастающие в рудах содержания Mg, Cu, Co, Ag, Zn, W, Bi, Te, S, Pb, As, Sb, Hg – указывают на совмещение всех проявленных на месторождении процессов, способствующих концентрированию Au.

Ключевые слова: скарново-порфировое оруденение, самородное золото, типоморфизм, пробность, зональность, индикаторы обогащения руд.

Быстринское рудное поле известно с 1830 г. Несмотря на длительный период, прошедший со времени открытия месторождения, до сих пор не было публикаций с подробными характеристиками золотой минерализации и особенностей распределения золота в различных генетических типах оруденения, что стало причиной создания этой статьи. Другим фактором, побудившим к проведению этих исследований, является полигенность Быстринского месторождения, где наряду со скарновым промышленным оруденением



**Киселёва
Галина Дмитриевна**

кандидат геолого-минералогических наук
научный сотрудник
kis60@rambler.ru

**Языкова
Юлия Игоревна**

младший научный сотрудник
yuliyazykova@yandex.ru

**Коваленкер
Владимир Александрович**

доктор геолого-минералогических наук
главный научный сотрудник
vladkov2007@yandex.ru

**Трубкин
Николай Викторович**

кандидат геолого-минералогических наук
ведущий научный сотрудник
tru@igem.ru

**Борисовский
Сергей Евгеньевич**

кандидат геолого-минералогических наук
старший научный сотрудник
dronino@yandex.ru

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



присутствует двухстадийная минерализация порфирового типа в виде:

- непромышленных редких кварц-Мо-W-TR-жил;
- золотоносных кварц-пирит-халькопиритовых жил с минералами вольфрама и редких земель, приуроченных к дайкам и реактивированным разломам.

Также слабо развито субэпитемальное оруденение. Всё это мотивировало использовать типоморфные характеристики минералов [13, 14] и, в частности, самородного золота, для идентификации оруденения различных генетических типов.

В последнее десятилетие по результатам проведённых геологоразведочных работ промышленное золото-халькопирит-магнетитовое оруденение в скарнах выявлено на четырёх участках: В. Ильдикане, Быстринском-2, Малом Медном Чайнике и Южно-Родственном. Совокупность этих участков образует Быстринское золото-медно-железородное месторождение.

Балансовые запасы месторождения утверждены в ГКЗ по категориям В+С₁+С₂: руды – 290 млн т, Cu – 2,073 млн т, Au – 236 т, Ag – 1060 т (Ag/Au ≈ 4,5), Fe (магнетитового) – 68 млн т. Содержание Cu в рудах 0,3–16 %, среднее – 1,56 %, Au – 0,1–36 г/т, среднее – 0,54 г/т [20]. Крупные запасы Cu и Au, выводящие данное месторождение в разряд одного из важнейших объектов не только в Восточном Забайкалье, но и России, делают крайне актуальным его изучение.

Данная статья является частью результатов изучения месторождения на основе коллекций, собранных в течение 2-х полевых сезонов 2007–2008 гг. Была проведена документация 5 скважин на каждом из участков с отбором керна, имеется также значительное количество образцов из поверхностных горных выработок. При изучении руд использовались аналитические возможности лабораторий ИГЕМ РАН: рентгено-спектральный микроанализатор (РСМА) – микронзонд JBX-8100FS – при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе зонда 20 нА на цилиндры Фарадея, по линиям: AuL_α, AgL_α, CuK_α, HgH_β, FeK_α, время экспозиции 20 с; сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) – JSM 5610LV с энергодисперсионным спектрометром INCA с использованием ускоряющего напряжения 25 кВ. В целях повышения достоверности результатов применялись собственные эталоны – стехиометрические минералы.

Для определения содержания элементов-примесей в сульфидах, в частности Au, использовался метод масс-спектрометрического анализа с индуктивно-связанной плазмой и лазерным пробоотбором (LA ICP-MS) на квадрупольном масс-спектрометре Thermo XSeries 2 с лазерной приставкой New Wave Research 213 («ЦКП ИГЕМ-аналитика», аналитик В. Д. Абрамова). Плотность энергии лазера 4–7 Дж/см², частота 20 Гц, анализ проводился профилями, скорость съёмки 5–7 мкм/с, диаметр участка воздействия лазера 60–70 мкм, длина волны лазера 213 нм.

Быстринское месторождение расположено в юго-восточной части Восточного Забайкалья (51°32' с. ш., 118°38' в. д.). Сведения о геотектоническом положении, геологии, магматизме, метасоматических изменениях, минералого-геохимических особенностях Быстринского месторождения ранее были достаточно подробно освещены в ряде публикаций [3, 4, 6, 7, 11, 15, 18–20, 22], поэтому здесь мы ограничимся кратким изложением наиболее существенных сведений о самом месторождении.

Месторождение Быстринское (рис. 1) слагают карбонатные породы нижнего кембрия, терригенно-карбонатные отложения девона и нижнеюрские песчаники, алевролиты и аргиллиты. Оно приурочено к Быстринской вулканокупольной структуре, центром которой является массив диоритов первой фазы шахтаминского комплекса (J₂₋₃), площадью примерно 3×4 км. Вторая фаза магматизма шахтаминского комплекса сопровождалась внедрением штокообразных тел и даек диоритовых порфириров, гранодиорит-порфириров и др. Заключительным импульсом магматизма на территории месторождения являются дайки базальтов и лампрофириров (J₃). Массив имеет сложное строение с большим количеством апофиз [19]. По данным гравиметрической съёмки, Быстринская структура по площади вписывается в подземный контур интрузии основного состава, выделяясь площадным максимумом силы тяжести. Эта структура осложнена экстремумами, отражающими выходы на поверхность габброидов ундинского комплекса (P–T₁), окаймляющих с запада Быстринскую структуру, а также нескрытого в современном эрозионном срезе лополитоподобного тела основного состава, залегающего на глубине ~1500 м, с корневым аппаратом в верховьях пади Ильдикан [15].

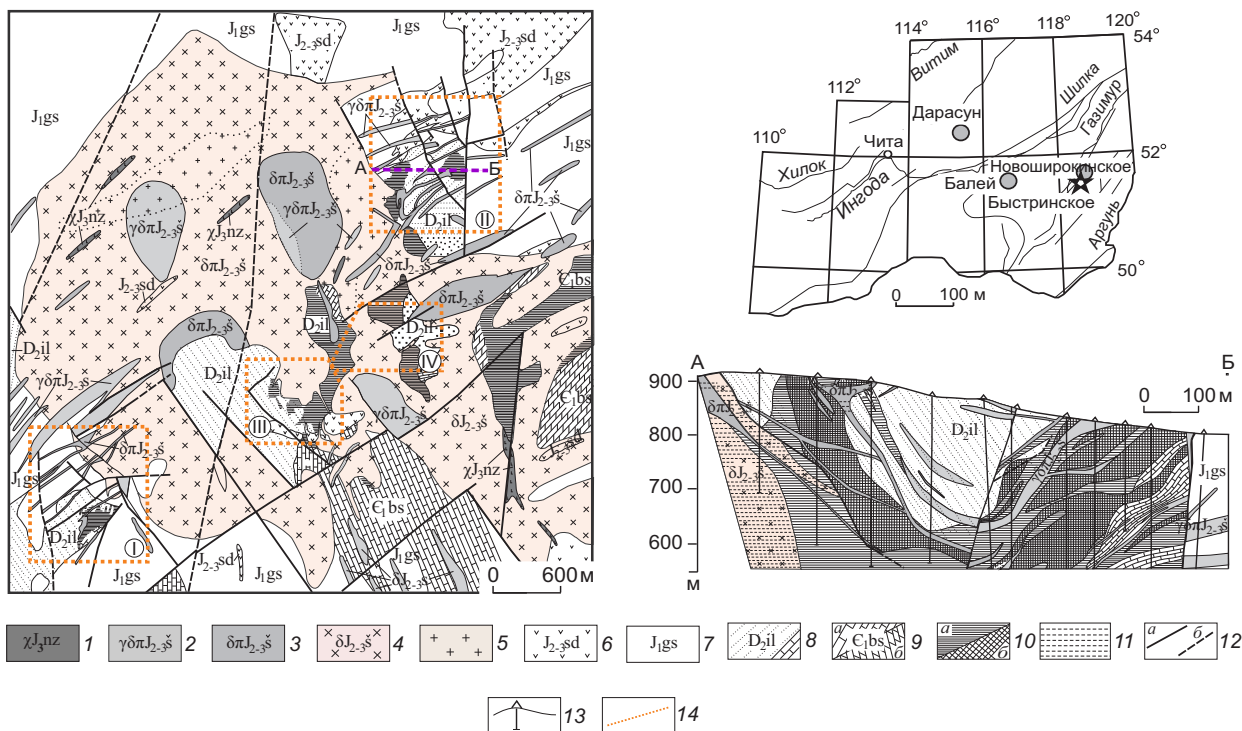


Рис. 1. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА МЕСТОРОЖДЕНИЯ БЫСТРИНСКОЕ (а) И РАЗРЕЗ ПО ЛИНИИ А–Б ЧЕРЕЗ УЧАСТОК БЫСТРИНСКИЙ-2 (б) (по данным В. М. Козлова, 2006 г.):

1 – дайки базальтов, андезитов, лампрофиров нерчинскозаводского комплекса; магматические породы шахтаминского комплекса: 2 – гранодиорит-порфиры, 3 – диоритовые порфиры, 4 – диориты; 5 – метасоматическая гранитизация диоритов шахтаминского комплекса; 6 – андезиты, андезит-дациты, дациты шадоронского комплекса; 7 – песчаники, алевролиты, аргиллиты, конгломераты государевской свиты; 8 – песчаники, алевролиты, аргиллиты, известняки ильдикинской свиты; 9 – осадочные породы быстринской свиты: известняки (а), доломиты (б); 10 – скарны и скарнированные породы (а), магнетитовые скарны (б); 11 – эндоскарны; 12 – разломы установленные (а), предполагаемые (б); 13 – скважины; 14 – границы участков с промышленным оруденением (I – В. Ильдикан, II – Быстринский-2, III – Малый Медный Чайник, IV – Южно-Родственный)

Рудные зоны всех четырёх участков приурочены к зонам скарнирования в экзоконтактах Быстринского массива диоритов (см. рис. 1). Основные из них, В. Ильдикан и Быстринский-2, включающие более 90 % запасов руды и металлов, характеризуются значительными (до 700 м по простиранию) размерами плито-плащеобразных рудных тел мощностью в десятки метров. Распространённость рудных залежей на глубину варьирует, но на двух главных участках они прослеживаются на глубине более 700–800 м. Основное влияние на локализацию рудных залежей оказала морфология контактовой части Быстринского массива и складчатые структуры в терригенно-карбонатных толщах. Участки рудных залежей с наиболее высоким содержанием рудных компонентов обычно приурочены к маг-

нетитовым экзоскарнам. Незначительная часть вкрапленной медной и молибденовой минерализации присутствует и в эндоконтактах магматических пород [4].

Главными типами изменений пород, вмещающих интрузии и оруденение, являются ороговикование, скарнирование, преобразования скарнов на стадии водных силикатов с проявлением амфиболизации, флогопитизации, серпентинизации и др., сопровождающим отложение магнетита, позже – сульфидов. С порфировым типом минерализации связаны калишпатизация, окварцевание и местами биотитизация. Скарны, апоскарны и магматические породы участками пропилитизированы с появлением эпидота, карбоната, хлорита, альбита, сфена и др., нередко сопровождающихся пиритом и халькопиритом.

Березитоподобные изменения, местами сходные с лиственитами, представленные преимущественно железистым и магнезиально-железистым карбонатом, реже – серицитом и кварцем, развиты вдоль трещин и контактов с дайками, цементируют брекчии, сопровождают кварц-пиритовые и кварц-полиметаллические прожилки. Аргиллизация, представленная в основном каолинитом и другими минералами этой группы, точнее пока не диагностированными, развита преимущественно по секущим трещинным зонам и местами совмещена с более ранними типами преобразований.

Месторождение характеризуется большим количеством новообразованных минералов. Выявлено около 100 минералов, 87 из которых является гипогенными. Часть гипогенных минералов представлена несколькими генерациями, относящимися к различным стадиям процесса. Главные рудные минералы на всех четырёх участках месторождения одинаковы: магнетит, халькопирит и пирит.

Наиболее распространённым промышленным рудным минералом на месторождении является магнетит, большая часть которого сформировалась в ходе апоскарнового процесса. Он образует гнездовые, вкрапленные и массивные текстуры. Отмечено не менее трёх его генераций, поздняя характеризуется осцилляторной зональностью, обусловленной различным содержанием примеси W. Второй по распространённости промышленный рудный минерал – халькопирит, у него также встречаются массивные текстуры с обогащением отдельных интервалов (до 50 % халькопирита), хотя преобладающим типом текстур медных руд являются гнездово-вкрапленные, вкрапленные и прожилково-вкрапленные. Халькопирит в ходе эволюции процесса минералообразования отлагается неоднократно и представлен 3–4 генерациями. Ранняя имеет характерный для высокотемпературного халькопирита типоморфный признак – наличие в нём крестовидных микровключений железистого сфалерита [5]. Следующий по распространённости из главных рудных минералов – пирит, образующий не менее пяти генераций. Второстепенные рудные минералы – марказит, пирротин (на глубине его количество иногда возрастает до разряда широко распространённого), блёклая руда, арсенопирит, молибденит, шеелит, Со-пирит, гематит.

Малораспространёнными и редкими новообразованными рудными минералами являются самородное золото, сфалерит, галенит, герсдорфит, миллерит, кобальтин, линнеит, бравоит, ульманит, бурнонит, тетрадимит, вольфрамит, аргентопентландит, Th-(Ce)-уранинит, торит, молибдошеелит, тунгстенит, киноварь, кубанит*, цервеллеит*, антимонит*, галенобисмутит*, зигенит, гессит*, висмутин*, тетрааурикуприд*, людвигит*, котоит*, дюмортьерит*, ссайбелиит*, якобит*.

Наиболее распространённые нерудные минералы – клинопироксен, актинолит, калишпат, флогопит, карбонаты, второстепенные нерудные – гранат (на участке Малый Медный Чайник он входит в разряд главных минералов), серпентин (входит в состав главных минералов на участках Южно-Родственный и Быстринский-2), тальк, серицит, альбит, мусковит, кварц, тремолит, апатит, биотит, эпидот, клиноцоизит, сфен, хлорит, рутил, лейкоксен. Малораспространённые и редкие минералы – шпинель, ортит, монацит, W-рутил, гидроксилбастнезит, ксенотим, пренит, турмалин, клиногумит, андалузит*, кордиерит*, скаполит* и др.

В результате относительно слабых гипергенных преобразований появляются гётит и, в небольшом количестве, ковеллин, халькозин, повеллит, борнит, самородная медь, куприт*, тенорит, халькантит*, малахит, самородное серебро, англезит, церуссит, целестин, Ва-целестин, Sr-барит, гипс, эритрин, хоулиит*, брошантит* и др.

Последовательность минералообразования можно наметить лишь схематически, поскольку этот процесс в реальности намного сложнее в связи с полихронностью скарнирования и преобразования одновременных скарнов, наложением минерализации порфирирового семейства и пр. Стадийность процесса минералообразования к настоящему времени представляется следующей (рис. 2):

1. Ороговикование и скарнирование, связанные с внедрением интрузии диоритов.

2. Регрессивное преобразование скарнов по мере остывания скарнирующих флюидов, отложение водных силикатов, магнетита в контактах с интрузией диоритов, возможно, части шеелита, затем золотоносного высокотемпературного

* минералы, установленные в результате предыдущих исследований [2, 8, 19]

халькопирита-I, пирротина с тонкими редкими вростками сульфидов Ni и Co, а также пирита, развивающихся по минералам скарнов и апоскарнов как псевдоморфно, так и нередко залечивая трещины в магнетите и других минералах.

3. Внедрение дайкового комплекса диоритовых порфириров-гранодиорит-порфириров с развитием двухстадийной минерализации порфирирового типа, вторая стадия является золотоносной.

4. Березитизация (лиственитизация), приуроченная большей частью к тектоническим зонам, порфирировым дайкам. Этот тип изменений иногда полностью преобразует вмещающие породы (скв. 139), местами является цементом обломков вмещающих пород, подробленного пирита, кварц-молибденитовых прожилков и пр. С ним сопряжены широко развитые на месторождении кварц-пиритовые и редкие золотоносные кварц-карбонат-полиметаллические прожилки и вкрапленность. В полиметаллических прожилках встречается разнообразная Ni-Co минерализация: значительное количество хорошо образованных кристаллов герсдорфита с осцилляторной зональностью за счёт вариаций содержания Co; возникают такие минералы, как ульманнит, аргентопентландит, пириты с осцилляторной зональностью за счёт обогащения отдельных зон кристаллов Co или As, корродированные выделения минералов группы линнеита с широкими колебаниями Fe и более слабыми вариациями Ni и Co. Галенит обрастает минералы Ni и Co. Золото, образованное в эту стадию, встречается в халькопирите, сфалерите и блёклых рудах на контакте с галенитом.

5. Карбонатные и кварц-карбонатные жилы и прожилки, наложение которых на рудные интервалы вызывает небольшое переотложение рудных минералов. Появляется поздняя генерация магнетита, гематит, небольшое количество галенита, халькопирита, сфалерит, очищается от примесей Fe и нередко содержит Cd (до 1,2 масс. %), что сближает эти минеральные образования с карбонатной стадией ближайшего Новоширокинского месторождения.

6. Аргиллизация.

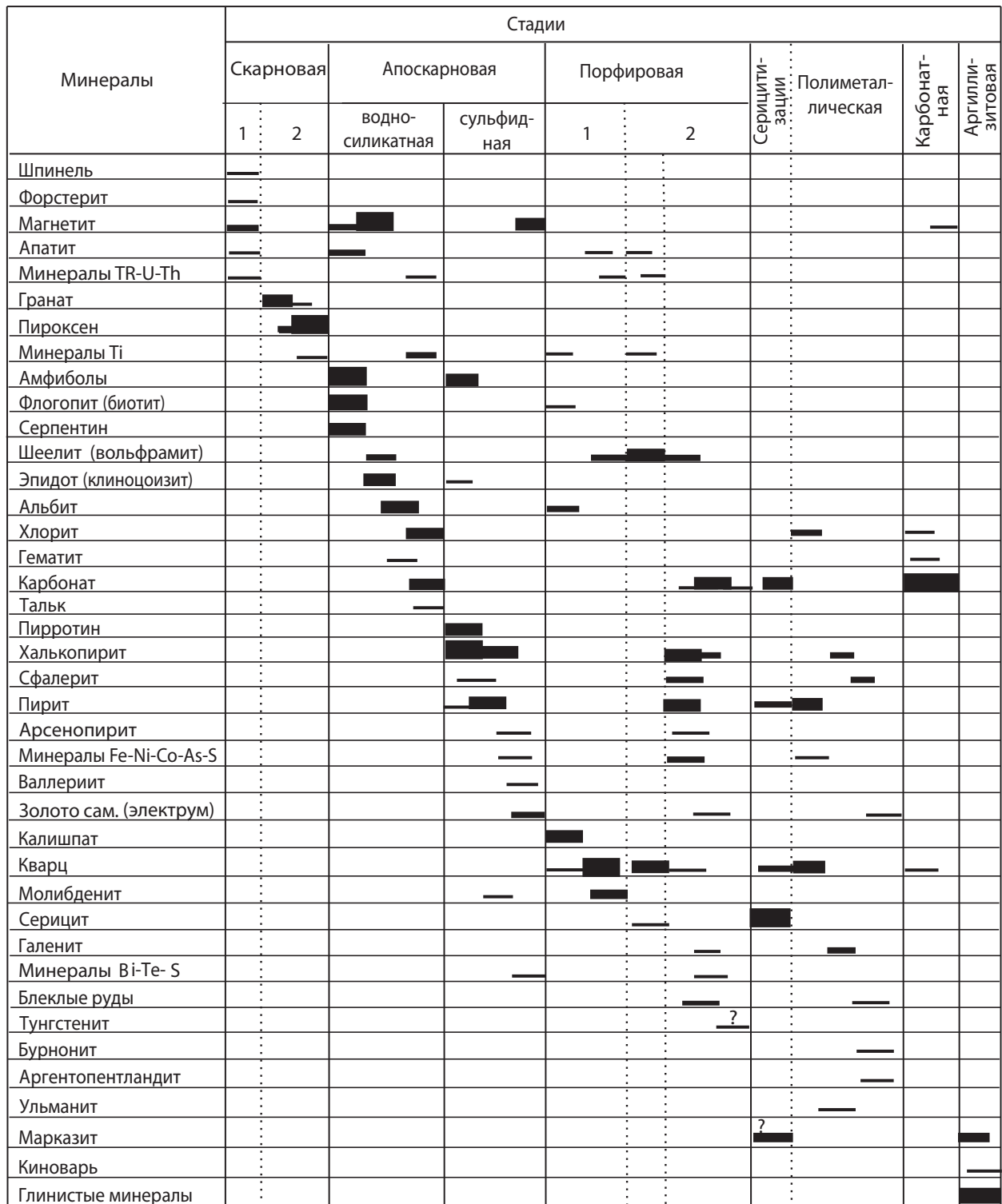
С использованием метода LA-ICP-MS получены первые результаты состава примесей сульфидов участка В. Ильди́канский. Анализировались пирит и халькопирит верхних частей скв. 107,

с глубин 19,2 и 28,4 м. Эти данные свидетельствуют о сравнительно высоком среднем (12 анализов) содержании Au в халькопирите – 0,9 ppm (при колебаниях от 0,3 до 1,86 ppm), в пирите (21 анализ) – 1,2 ppm (при вариациях от 0,01 до 5,6 ppm). В халькопирите наблюдается положительная корреляция Au и Bi ($r = 0,54$), Au и Co ($r = 0,5$), Au и Ag ($r = 0,52$). В пирите отмечена только очень слабая прямая корреляция примеси Cu с Au ($r = 0,33$), Hg и Au ($r = 0,34$). Возможный механизм образования золота в сульфидах по [16] предложил В. Л. Таусон [17]: сорбция атомов и микрочастиц золота на поверхности растущих кристаллов сульфидов, прежде всего на дефектах поверхности с дальнейшей трансформацией в нанокристаллы [23].

На площади месторождения присутствует коренное и россыпное золото. Россыпи по ручьям Ильди́кан, Родственный, Токовый и р. Быстрая отработаны в прошлом веке и нами не изучались.

Коренное золото встречено на месторождении только в самородном виде. Оно распределено в пределах месторождения неравномерно. Подавляющая часть золотин приурочена к минералам сульфидных руд в скарнах, значительно меньшая – к сульфидам кварц-пирит-халькопирит-редкометалльных жил порфирирового типа. Золотоносная кварц-карбонат-полиметаллическая минерализация на территории месторождения в силу незначительного распространения, видимо, не может оцениваться как промышленно значимая. Кварц-молибденитовые жилы также, как и на соседних Шахтаминском и Бугдаинском месторождениях, практически не золотоносны.

Вмещающим золото минералом в целом по участкам из 484 обнаруженных золотин (рис. 3) в 34 % случаев является пирит, 10 % золотин установлено в Co-содержащем пирите. В халькопирите встречено 30,4 % от всех найденных золотин, 3 % приурочено к контакту халькопирита с пиритом или Co-пиритом. За редким исключением наблюдается закономерное увеличение количества золотин в тех участках образцов, где больше халькопирита, тяготеющего в основном к магнетитовым экзоскарнам. В порфирировом типе минерализации матрицей золотосодержащего пирита также является халькопирит, по объёму многократно превышающий спорадические включения пирита с золотом, синхрон-



Толщина линии соответствует степени относительной распространённости минералов:

- распространённые
- малораспространённые
- второстепенные
- редкие

Рис. 2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ СХЕМА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ

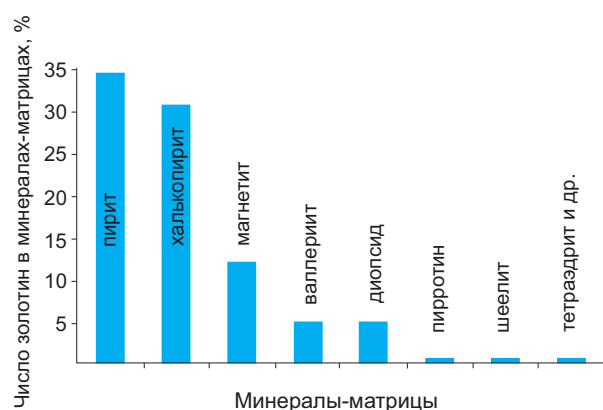


Рис. 3. ГИСТОГРАММА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОЛОТИН В РАЗЛИЧНЫХ МИНЕРАЛАХ-МАТРИЦАХ

ным с сульфотеллуридами Bi , при этом золото локализовано как в пирите, так и на контакте этих двух сульфидов. При отсутствии халькопирита руды обогащены Au довольно редко. В нашей коллекции имеется только один не содержащий халькопирита образец с многочисленными частицами самородного золота, приуроченными к пириту в серпентинизированном апоскарне. Остальное количество обнаруженных золотин рассеяно в минералах скарнов в виде единичных включений и лишь иногда даёт скопления в таких минералах, как диопсид (4,7 %), валлериит (4,7 %), магнетит (11,8 %), при этом во всех перечисленных случаях в образцах с этими минералами всегда преобладает халькопирит. Кроме того, установлено самородное золото в виде редких включений в пирротине, сфалерите, шеелите, хлорите, гётите, на контакте блёклой руды и галенита. Следует особенно подчеркнуть, что при достаточно большом количестве изученных образцов пока не было встречено золотин в кварце, что необычно для золотых месторождений Восточного Забайкалья. Можно допустить, что изучение дополнительного каменного материала привело бы к таким находкам, однако в любом случае золото, локализованное в кварце, для данного месторождения не характерно.

На месторождении преобладают изометричные формы золотин, как округлые, так и с намечающимися гранями, и лишь 12,4 % являются удлинёнными с отношением длины к ширине более 2, сюда же относятся прожилковидные золотины. Мелкие частицы значитель-

но чаще изометричны, чем крупные. Довольно редкие находки удлинённых прожилковидных золотин в ранней ассоциации (в трещинах и интерстициях рудных минералов первой генерации) могут свидетельствовать о переотложении золота в результате воздействия более поздних процессов.

В апоскарнах изометричные золотины наиболее распространены в пирите, халькопирите и магнетите. Среди изометричных золотин в раннем халькопирите скарнов отмечены формы с почти правильными квадратными, пятиугольными и треугольными сечениями, примерно такие же формы и размеры имеет и отложившийся здесь тонкий галенит. Для изометричных золотин в пирите апоскарнов свойственны как округлые формы со сглаженными гранями (рис. 4, а), так и угловатые (см. рис. 4, б, в). В валлериите, развитом по минералам апоскарнов, форма золотин чаще удлинённая с неровными, извилистыми очертаниями и заливообразными востками в промежутки между лейстами этого минерала и вмещающего валлериит магнетита (см. рис. 4, г). Золотины в валлериите местами содержат тонкие реликты кобальтина и Co -пирита. Следует отметить, что в данном случае наблюдается резкое укрупнение золотин при переходе от вмещающих валлериит магнетита и пирита, насыщенных тонкодисперсными (размером 1 мкм и менее) изометричными, преимущественно угловатыми частицами золота, к валлерииту. Очевидно, этому способствуют особенности строения валлериита, сложенного высокопроницаемыми чешуйчатыми и пластинчатыми агрегатами. В Co -пирите золото отлагается нередко по трещинам (см. рис. 4, д, е) в виде извилистых пластин, просечек и микропрожилков. Характерна также локализация как удлинённых, так и изометричных золотин по контакту Co -пирита с халькопиритом. В халькопирите, развитом в диопсиде с примесью актинолита, наряду с ультратонкими изометричными частицами самородного золота встречаются и относительно крупные, приуроченные к участкам трещиноватости (см. рис. 4, ж). В диопсиде скарнов, в промежутках между кристаллами которого развита богатая пирротин-халькопиритовая минерализация, золотины имеют преимущественно удлинённые формы и развиваются, подобно халькопириту, в интерстициях диопси-

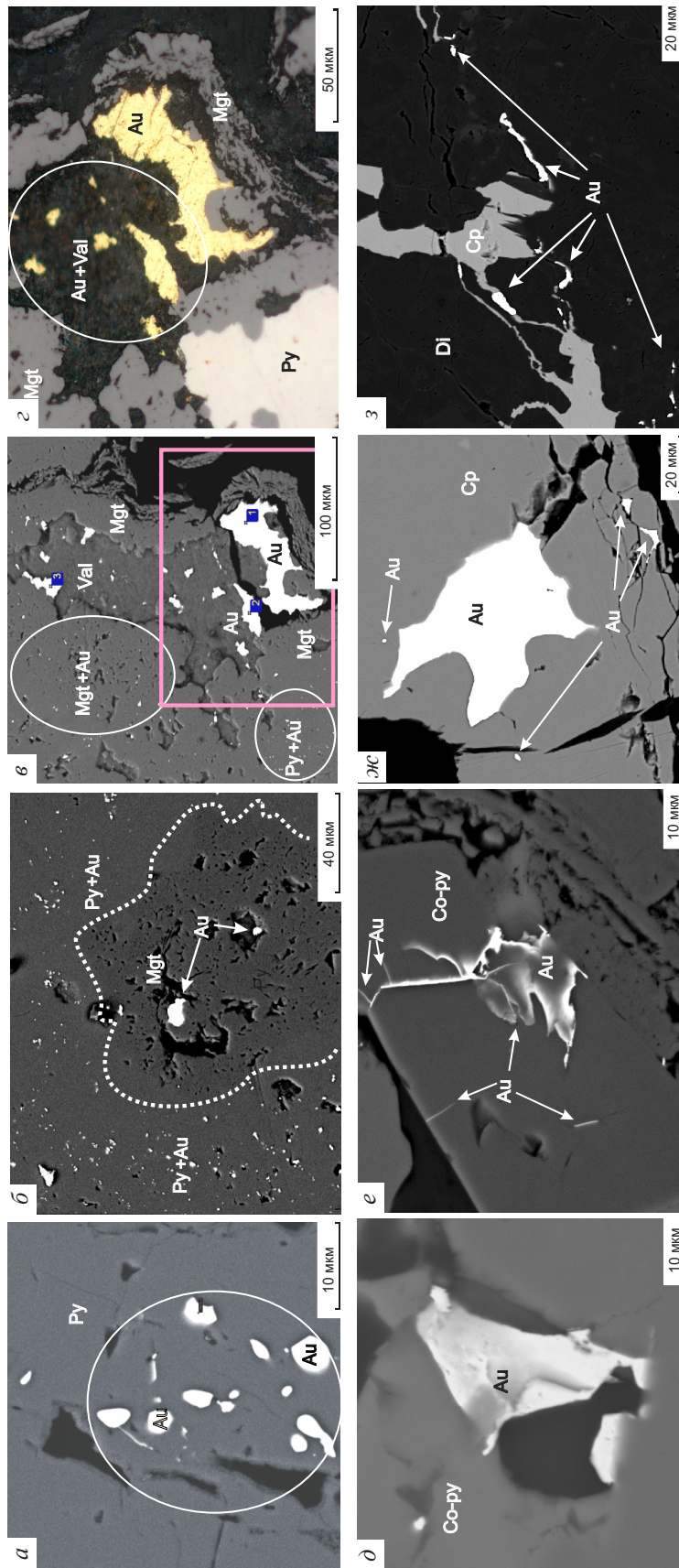


Рис. 4. ФОРМА, РАЗМЕРЫ И ХАРАКТЕР СРАСТАНИЙ ЗОЛОТИН С СОПУТСТВУЮЩИМИ МИНЕРАЛАМИ В АПОСКАРНАХ:

a – округлые золотины в пирите; *б* – густая вкрапленность ультрамелкого, преимущественно изометричной формы самородного золота в пирите, в центре – магнетит с небольшим количеством валлериита и более крупными золотинами; *в* – магнетит с небольшим количеством пирита и тонкораспылённым золотом, при замещении валлериитом образуются более крупные частицы золота, самая крупная золотина развивается в валлериите и врастает в промежутики между кристаллами магнетита; *г* – увеличенный фотоснимок того же участка; *д*, *е* – самородное золото в Со-пирите в виде изогнутых пластин и микропросечек; *ж* – ультрамелкие вкрапленные золотины в массивных ненарушенных частях кристалла халькопирита и относительно крупные – вблизи и внутри микротрещин; *з* – вкрапленное и (в основном) прожилковидное самородное золото в диопсиде и совместные золото-халькопиритовые микропрожилки. Снимки в обратно-рассеянных электронах, кроме *б*): Mgt – магнетит; Au – самородное золото; Val – валлериит; Py – пирит; Cp – халькопирит; Co-py – Со-содержащий пирит; Di – диопсид

да (см. рис. 4, з), а также по трещинам, значительно реже в виде очень тонких изометричных включений в диопсиде и халькопирите. В пирротине установлены единичные ультратонкие (1–2 мкм) округлые включения самородного золота. В раннем железистом сфалерите скарнов были встречены тонкие золотины с прямоугольными изометричными или слабо удлинёнными очертаниями размером до 10 мкм.

В жилах порфирового типа (скв. 107, 19,2 м) встречены «запечатанные» в пирите изометричные округлые золотины, интерстициальное же золото в этих образцах в основном имеет слабоудлинённые формы (рис. 5, а), отчасти подчиняющиеся форме интерстиций.

Золото в полиметаллической ассоциации (скв. 139) в маложелезистом сфалерите и халькопирите полиметаллической ассоциации – это ультратонкие округлые изометричные золотины размером около 2 мкм. На контакте галенита с Ag-тетраэдритом в этом же типе минерализации золотины того же размера имеет шестиугольный срез. В редких прожилках сульфидов полиметаллов в пределах жил порфирового типа золото не обнаружено.

Размер частиц коренного золота, по нашим данным, колеблется от < 1 до 95 мкм, длина микропрожилков самородного золота не превышает 100 мкм. По данным предыдущих исследований, размер золотин достигает 3 мм. Статистическая обработка данных (рис. 6, а) показала, что максимальное количество золотин, 58 %, имеет размер до 2 мкм, 31 % попадает в интервал 3–10 мкм. С последующим нарастанием размера золотин отмечено резкое уменьшение их количества. Так, в разряде 11–20 мкм находится уже всего 5 % золотин, 21–30 мкм – 2,7 %, 31–40 мкм – 1,4 %. В интервале от 41 до 100 мкм встречено только 9 частиц самородного золота (по 1–3 золотины на каждый интервал – 41–50, 51–60 и т. д.), что в целом составляет менее 2 %. Наиболее крупные изометричные золотины встречены в скв. 107 (298,2 м) в апоскарнах (участок В. Ильди-кан) (см. рис. 4, ж) в халькопирите, и, как уже отмечалось, тут же встречаются и удлинённые частицы самородного золота на контактах диопсида и халькопирита (см. рис. 4, з). Кроме того, относительно крупные золотины приурочены к валлерииту апоскарнов. Укрупнение и концентрирование золотин в валлериите, кроме бла-

гоприятных физических свойств последнего, очевидно, связано с замещением им халькопирита, пирита и магнетита, содержащих тонкое золото (см. рис. 4, в, з). Сравнение гранулометрического состава золотой минерализации различных генетических типов свидетельствует, что золотины в рудах порфирового и скарнового типов иногда имеют размер более 10 мкм и все относительно крупные золотины обнаружены именно в ранних типах минерализации, тогда как поздние кварц-полиметаллические жилы содержат, по нашим немногочисленным данным, только частицы ультратонкого самородного золота размером < 10 мкм.

Содержание Au в золотинах колеблется от 60,7 до 100 масс. % (таблица). Средняя пробность по проанализированным золотинам (109 анализов) составляет 800. Пробность выше 700 имеет 86 % золотин, из них 45 % – выше 800 (см. рис. 6, б). По данным определения состава частиц самородного золота методом РСМА, среднее отношение Au/Ag \approx 4. Изометричные золотины в большинстве случаев, за исключением содержащихся в минералах полиметаллической ассоциации, имеют наиболее высокую пробность.

Наблюдается разделение по пробности золотин различных стадий. Золотины двух более ранних рудных стадий скарново-порфирового оруденения в среднем отличаются значительно более высокой пробностью, чем золотины полиметаллической ассоциации, где значения пробности колеблются в интервале 647–727, что объясняется нарастанием роли серебра к поздним стадиям процесса. Самое низкое значение пробности при этом соответствует золотине, матрица которой содержит Ag в своём составе (Ag-содержащий тетраэдрит). В халькопирите полиметаллической ассоциации самородное золото имеет пробность 727, что значительно ниже средней по месторождению и существенно отличается от наиболее часто встречающейся высокой пробности золотин в халькопирите апоскарнов. Самородное золото в апоскарнах имеет высокую пробность, как правило, более 800 ‰.

Пробность самородного золота, «запечатанного» в пирите жил порфирового типа, самая высокая – 1000 ‰ (скв. 107, глуб. 19,2 м), что сближает этот тип золотоносных жил с подобным оруденением Бугдаинского месторождения [9,

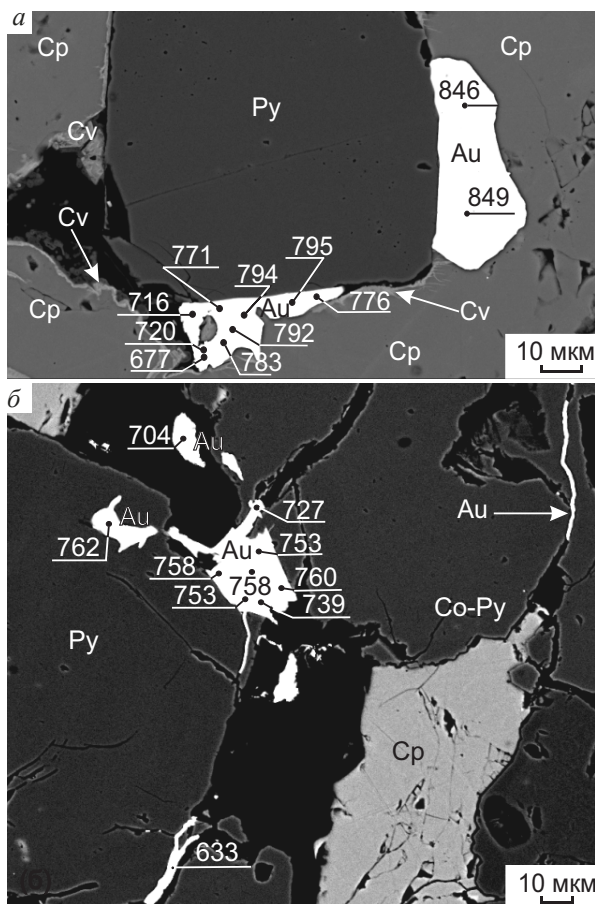


Рис. 5. ВАРИАЦИИ СОСТАВА ЗОЛОТА ПО ДАННЫМ РСМА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТИПА МИНЕРАЛИЗАЦИИ:

а – порфировый; *б* – апоскарновый; в обоих случаях фиксируется снижение пробности участков внутри золотин (Au), примыкающих к кавернам и притрещинам (чёрное) с каёмками ковеллина (Cv), остальные усл. обозн. см. рис. 4

12]. Но интерстициальное самородное золото в этом же образце имеет более низкую и непостоянную пробность. При этом отчётливо заметно, что около расширенных, более пронцаемых участков интерстиций и, что важно, с присутствием ковеллина и гётита, золотины приобретают существенно более низкую пробность с нарастанием серебра и появлением микропримеси ртути (см. рис. 5; см. табл.). Соседняя золотина, локализованная в притёртом контакте того же кристалла пирита и халькопирита, имеет высокую пробность, практически однородна по составу и не содержит Hg. Подобная закономерность – приуроченность Hg-

содержащих (сотые – десятые доли масс. % Hg) золотин с более низкой пробностью к полостям и зонам микротрещиноватости, особенно в присутствии серебросодержащего ковеллина – характерна для приповерхностных участков рудных залежей любого генетического типа Быстринского месторождения. Обогащение серебром отдельных золотин, приуроченных к кавернам в приповерхностных участках месторождений, отмечается на соседнем Au-Mo(W)-порфировом Бугдаинском месторождении [9, 12] и связано с осаждением на частицах золота самородного серебра и амальгам серебра в слабо гипергенно изменённых золотых рудах. Среди других примесей в незначительном количестве местами присутствует Си, обычно сотые – десятые доли масс. %, однако в некоторых участках рудных залежей (скв. 107) к ак на верхних горизонтах, так и на глубине более 300 м (скв. 107), наряду с незначительной примесью Си в части анализов присутствует малое количество Fe, местами, очевидно, обусловленное захватом халькопирита при анализе на микрозонде.

Как было показано, на месторождении в целом преобладает рассеянное в сульфидах золото с невысокими содержаниями в рудах, тогда как участки значительных скоплений золотин в рудах редки. Макроиндикаторами процессов обогащения руд золотом могут быть заметная трещиноватость и прожилковые текстуры сульфидов (возможно, с кварцем), рассекающих первичное магнетит-халькопиритовое оруденение. Обогащённые золотом части рудных тел на микроуровне выделяются по разнообразию минерального состава, присутствию нескольких генераций халькопирита, магнетита, пирита (особенно развитого по пирротину), Со-содержащего пирита или кобальтина в халькопиритовой матрице, валлериита, наличию псевдоморфоз пирита по магнетиту, минералов Vi-Te, иногда – присутствию включений минералов полиметаллической ассоциации. Кроме того, для рудных участков с максимальным обогащением золотом характерны золотины с большими вариациями форм и размеров (от < 1 до 95 мкм, обр. М10Б), при этом они локализованы чаще всего почти во всех имеющихся минералах, а в пирите, магнетите и халькопирите – в виде скоплений одиночных изометричных ультратонких включений (см. рис. 4, б–з) с увеличением раз-

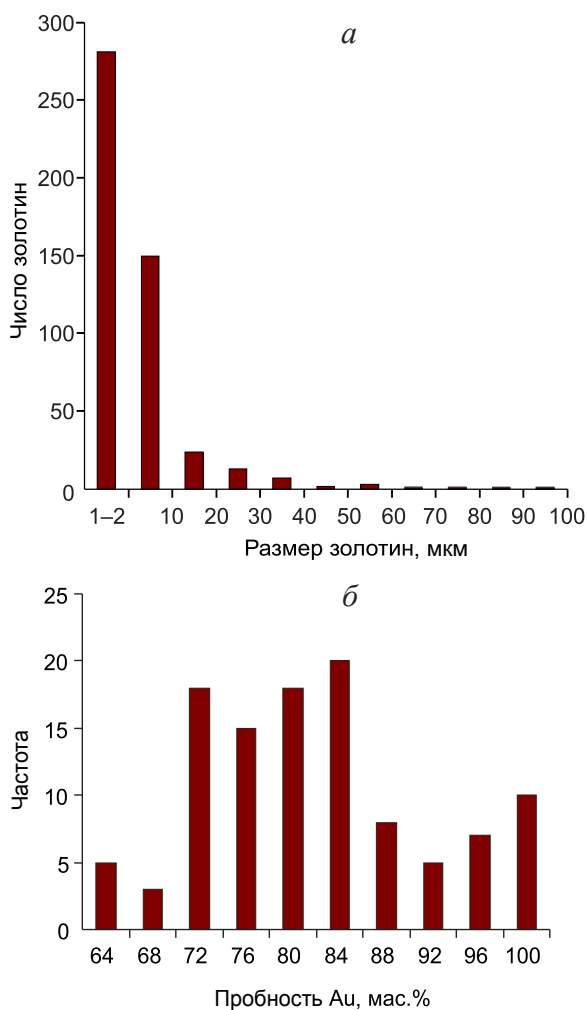


Рис. 6. ГИСТОГРАММЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ (а) И ПРОБНОСТИ (б) ЗОЛОТИН В РУДАХ

меров золотин в интерстициях этих минералов и участках микротрещиноватости. Можно предположить, что наиболее богатые золотом руды развиваются по апомагнезиальным скарнам, учитывая заметное обогащение золотом в наших образцах именно серпентинизированных, иногда при этом и валлериитизированных разностей с сульфидами и магнетитом нескольких генераций.

Геохимическим индикатором более высокой золотоносности является обогащённость руд такими элементами, как Mg, Cu, Ag, W, Co, Fe, Bi, Te, Zn, Pb, As, Sb и др., что указывает на совмещение всех проявленных на месторождении процессов, способствующих концентрированию Au.

Недостаточное количество наблюдений не позволяет сделать собственные обобщающие выводы о зональности месторождения. Тем не менее к элементам вертикальной зональности можно отнести участок В. Ильдикан (скв. 107) где проявлено нарастание золотоносности (и меденосности) по мере приближения к контакту экзоскарнов с вмещающими известняками (рис. 7). Можно отметить элементы вертикальной зональности в распределении пробности в доступном для наших исследований диапазоне глубин 0–333 м – преобладание в интерстициальных и прожилковых золотилах относительно более низкой пробности на верхних горизонтах [21]. Это характерно для многих Au-месторождений и связано с повышением роли Ag в: 1) поздних минеральных ассоциациях, тяготеющих чаще к верхним частям месторождений, 2) гипергенных процессах, что фиксируется появлением самородного Ag, отложением Ag в ковеллине и краевых частях золотин, примыкающих к проницаемым участкам (неплотных интерстициях, кавернах, микротрещинах). Известный на месторождении фактор вертикальной зональности – уменьшение количества пирротина на верхних горизонтах рудных залежей – может указывать на некоторое обеднение золотом на больших глубинах, где пирротина больше, поскольку в пирротине видимое под микроскопом самородное золото встречается редко. Дисульфидизация пирротина в верхних частях залежей способствует значительному концентрированию золота в пирите и магнетите-II, заместивших пирротин в близповерхностных рудах.

Присутствие россыпей на территории месторождения с более крупными золотилами по сравнению с изученными может указывать на существование ныне сэродированной верхней части месторождения, где более интенсивно могли быть проявлены наложенные процессы, способствующие укрупнению золотин. Об этом же может свидетельствовать и наличие золотоносной минерализации порфирирового типа в верхних частях скв. 107 с концентрированием W и укрупнением шеелита, а также присутствие молибденового и полиметаллического оруденения в интенсивно изменённых березитизированных породах в опущенном блоке на периферии залежи участка В. Ильдикан в скв. 139, вскрывшей кровлю диоритов под юрскими от-

**ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ САМОРОДНОГО ЗОЛОТА ПО ДАННЫМ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫХ АНАЛИЗОВ ОРУДЕНЕНИЯ
АПОСКАРНОВОГО И ПОРФИРОВОГО ТИПОВ МЕТОДАМИ РСМА И СЭМ**

Обр. № / участок	Ассоциация	Матрица	Au	Ag	Cu	Hg	Fe	Сумма	Формула	Проб., ‰	
Малый Медный Чайник, 2/07	Апоскарн с mgt, cp, cob, py, mo, goe, cv	Контакт cob, mgt & Co-Ni-py	77,58	21,3	< п.о.	< п.о.	< п.о.	98,88	Au ₂ Ag	785	
			77,59	21,3	< п.о.	1,05	< п.о.	99,98	Au ₆₆ Ag ₃₃ Hg	784	
			73,87	25,77	< п.о.	1,07	< п.о.	100,71	Au ₆₀ Ag ₃₉ Hg	741	
7/07	Апоскарн с cp, py, Co-py, mgt	Co-py	74,61	26,12	0,00	0,4	0,18	101,3	Au _{1,6} Ag	741	
		Co-py/cp	75,77	23,75	0,08	0,24	0,44	100,28	Au _{1,7} Ag	761	
		Ср	75,3	25,68	< п.о.	< п.о.	< п.о.	100,98	Au _{1,6} Ag	746	
		Co-py/cp	75,3	23,68	< п.о.	< п.о.	< п.о.	98,98	Au _{1,8} Ag	761	
		Co-py/cp	72,47	27,28	< п.о.	< п.о.	< п.о.	99,75	Au _{1,4} Ag	727	
		Co-py/cp	74,17	24,45	< п.о.	< п.о.	< п.о.	98,62	Au _{1,6} Ag	752	
M10B	Серпентинизированный скарн с mgt и ср двух генераций, py, val, Co-py, сульфотеллуридом Bi	Val	95,21	5,51	< п.о.	< п.о.	< п.о.	100,72	Au ₉ Ag	945	
		Val	93,46	6,66	< п.о.	< п.о.	< п.о.	100,12	Au _{7,3} Ag	933	
		Val/Co-py	86,86	13,14	< п.о.	< п.о.	< п.о.	100	Au _{3,5} Ag	869	
		Py	91,59	7,97	< п.о.	< п.о.	< п.о.	99,56	Au ₆ Ag	920	
		Val	89,99	10,02	< п.о.	< п.о.	< п.о.	100,01	Au ₄ Ag	899	
		Val	89,02	11	< п.о.	< п.о.	< п.о.	100,2	Au _{4,4} Ag	888	
		Val/Co-py	87,82	12,17	< п.о.	< п.о.	< п.о.	99,99	Au ₄ Ag	878	
		Py	90,52	5,51	< п.о.	< п.о.	< п.о.	96,04	Au ₉ Ag	943	
107/19.2 В. Ильдикан	Qtz-she-cob-cp-py-жила (порф.) с примесью сульфотеллурида Bi, тунгстениита	Py	100,0	< п.о.	< п.о.	< п.о.	< п.о.	99,99	Au	1000	
			100,0	< п.о.	< п.о.	< п.о.	< п.о.	99,99	Au	1000	
			85,03	9,05	< п.о.	< п.о.	< п.о.	94,08	Au _{5,3} Ag	903	
		Контакт ср & py в каверне на контакте ср & cv	85,71	11,85	< п.о.	< п.о.	< п.о.	97,56	Au ₄ Ag	878	
			69,46	25,91	< п.о.	< п.о.	< п.о.	95,37	Au _{1,4} Ag	728	
			66,77	29	< п.о.	< п.о.	< п.о.	99,77	Au _{1,3} Ag	697	
			77,53	19,79	< п.о.	0,52	< п.о.	99,53	Au _{2,3} Ag	796	
			84,57	15,17	0,55	< п.о.	0,52	100,82	Au _{3,1} Ag	839	
			78,71	19,81	0,72	0,12	0,5	99,86	Au _{2,2} Ag	788	
			69,02	26,28	2,11	0,78	1,12	98,83	Au _{1,4} Ag	724	
107/184.5	Апоскарн с ср, py, mgt	Mgt/Co-py	87	13,76	1,81	0,52	1,2	100,77	Au _{3,5} Ag	863	
107/294.5	Ср-руда с ро, act	Po	87,38	12,47	< п.о.	< п.о.	< п.о.	99,85	Au _{3,8} Ag	875	
107/298.2	Ср-руда с ро, act, di	Ср	82,12	16,61	< п.о.	< п.о.	< п.о.	99,5	Au _{2,7} Ag	832	
			83,68	15,69	< п.о.	< п.о.	< п.о.	99,4	Au ₃ Ag	842	
			83,72	15,51	0,14	0	0,13	98,87	Au ₃ Ag	844	
107/333	Mgt-po-cp-goe-act	Co-py	79,76	19,59	0,03	0	0,02	100,52	Au _{2,2} Ag	803	
312-264.5 Быстринский-2	Серпентинизированный скарн с py	Py	Ср	92,12	8,4	< п.о.	< п.о.	< п.о.	100,52	Au _{6,1} Ag	916
			85,05	15,28	< п.о.	< п.о.	< п.о.	100,33	Au ₃ Ag	848	
			90,49	10,86	< п.о.	< п.о.	< п.о.	101,35	Au _{4,5} Ag	893	
			89,74	9,24	< п.о.	< п.о.	< п.о.	98,98	Au _{5,3} Ag	906	
			89,85	12,42	< п.о.	< п.о.	< п.о.	102,27	Au ₄ Ag	879	

Примечание. < п.о. – ниже предела обнаружения, аст – актинолит, cob – кобальтин, cv – ковеллин, di – диопсид, goe – гётит, mgt – магнетит, qtz – кварц, py – пирит, ро – пирротин, she – шеелит, val – валлериит, порф. – оруденение порфинового типа.

ложениями, т. е. в самой верхней части месторождения. В связи с этим напрашивается вывод, что при формировании месторождения, видимо, существовала прямая зональность в распределении различных генетических типов оруденения, и не исключено появление более богатых золотых и (Mo)-W руд в опущенных менее эродированных блоках залежей, контактирующих с золотоносными апоскарнами.

Горизонтальная зональность Быстринского месторождения, установленная Таусоном и др. [18], выражается в тяготении золотоносной полиметаллической минерализации к периферическим частям рудных залежей.

Типоморфная особенность золотой минерализации Быстринского месторождения, а именно резкое преобладание ультратонкого, рассеянного в большинстве рудных минералов в скарнах и апоскарнах самородного золота высокой пробы, приуроченного в основном к сульфидам ранних генераций и ранним минералам скарнов, свидетельствует о том, что, вероятно, основная часть золота отложилась на ранних высокотемпературных этапах процесса минералообразования, близсинхронно или несколько позже кристаллизации сульфидов первых генераций. Такой преимущественно тонкодисперсный характер распределения в основном изометричных золотин скорее всего свидетельствует о незначительном развитии на современном уровне эрозионного среза существенных поздних преобразований. Об этом же говорит факт преобладания в медных золотоносных рудах именно первой высокотемпературной генерации халькопирита с сохранившимся крестовидным сфалеритом, переотложенным лишь в редких случаях. Появление высокотемпературных же минеральных ассоциаций порфирирового типа после внедрения даек приводит к образованию ультратонких высокопробных беспримесных включений золота в пирите, однако появляются и более крупные золотины по контакту пирита и халькопирита и проч., а также прожилковое золото в участках наложенной микротрещиноватости в первичных апоскарновых рудах, что можно рассматривать как перераспределение первичного золота. Переотложение Au с укрупнением его частиц в стадии реализации порфирирового процесса не было широко проявлено, о чём свидетельствует и ста-

тистически резко преобладающее количество изометричного тонкодисперсного золота и отсутствие золотин в кварце.

Крайне бедная и, в основном, пространственно разобщённая с первичным золото-медным оруденением на уровне современного эрозионного среза золотоносная полиметаллическая минерализация также слабо повлияла на раннее золото-медное оруденение в скарнах. Отмечены лишь редкие микровключения галенита в халькопирите-I апоскарнового оруденения, что способствовало, однако, обогащению этого халькопирита золотом, и прожилки сульфидов полиметаллов в жилах порфирирового типа, не содержащие Au.

Процессы гипергенеза способствовали частичному разрушению сульфидов и сульфосолей, содержащих Ag, и его переотложению в самородной форме. Кроме того, в участках развития обогащённых медью гипергенных минералов вдоль каверн и участков трещиноватости, как было показано, пробность золотин существенно колеблется (с диапазоном до 200 ‰), уменьшаясь по направлению к периферии золотин и участкам трещиноватости, возможно за счёт привноса дополнительного серебра, намного более подвижного в зонах гипергенеза, чем золото. Не исключено гипергенное обогащение золотом гётита и других гипергенных минералов, развивающихся по золотоносным сульфидам. Гипергенное разрушение породообразующих и рудных минералов в участках дренирования рудных тел привело к образованию россыпей. Указывается на возможность криогенного обогащения благородными металлами близповерхностных руд [1].

Особенность морфологии золотин в разностадийных ассоциациях (преобладание тонкого изометричного самородного золота) может свидетельствовать о собственной золотоносности каждой из стадий и, соответственно, как минимум о трёх разностадийных генерациях золота. Одним из выводов на основании результатов изучения особенностей распределения золотин и их морфологии является то, что образование рудных столбов, существенно обогащённых золотом, при современном эрозионном срезе на Быстринском месторождении маловероятно из-за редкой совмещённости и относительно слабой проявленности процессов, влияю-

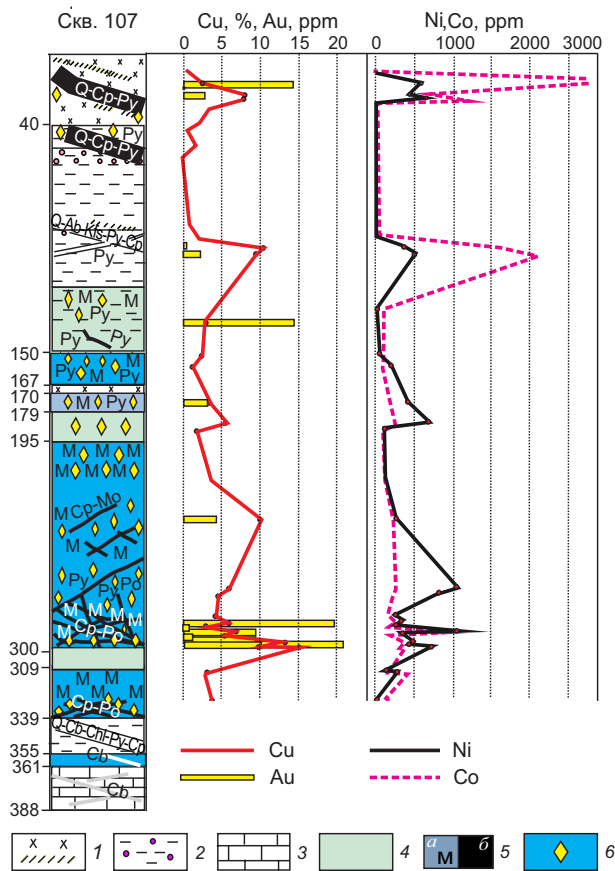


Рис. 7. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ Cu, Au, Co, Ni В ПОРОДАХ И РУДАХ, ВСКРЫТЫХ скв. 107:

1 – диоритовые порфириды (штриховка – березито-подобные изменения); 2 – песчаники, алевролиты, аргиллиты (кружки – калишпатизация); 3 – известняки; 4 – скарноиды; 5 – скарны с вкрапленным магнетитом (а), с массивными магнетит-пирротин-халькопиритовыми рудами (б); 6 – халькопирит; Мо – молибденит, Kfs-калишпат, Chl – хлорит, Ab – альбит, Po – пирротин; остальные усл. обозн. см. рис. 4

щих на перераспределение и дальнейшее концентрирование золота.

Данное исследование позволяет довольно определённо заявить, что в дискуссии о типе процессов, приведших к возникновению крупного Au-Fe-Cu Быстринского месторождения, предпочтение следует отдать оруденению скарного типа, о чём свидетельствует комплекс признаков:

- контроль основного Au-Cu-оруденения зонами скарнов и апоскарнов;
- в целом высокое и неравномерное содержание Cu, иногда с массивными текстурами

раннего преобладающего халькопирита-I, что не свойственно медно-порфировым рудам, преимущественно вкрапленно-прожилковым, с более низким (обычно < 1 %) и относительно более равномерным содержанием гипогенной меди;

- присутствие пирротина или псевдоморфоз по нему дисульфидов Fe, что не характерно для руд порфирового типа;
- отсутствие золота в кварце и пр.

Минерализация порфирового типа на уровне современного эрозионного среза имеет подчинённое значение, что выражается в отсутствии промышленных запасов Mo и W (учитывая расположение Быстринского месторождения в металлогенической зоне, специализированной в числе других металлов и на Mo и W), однако продукты поздней золотоносной кварц-сульфидно-редкометальной части этого процесса, по-видимому, на отдельных участках всё же существенно дополняют запасы меди и золота, приуроченные к скарным, что, в частности, наблюдалось при вскрытии рудных тел скв. 107.

Причиной слабого проявления поздних процессов на месторождении с его разнообразным полихронным магматизмом и тектоникой и, соответственно, высоким флюидным потенциалом, возможно, является денудация Быстринского месторождения, оставившая только его средние и нижние части, о чём могут свидетельствовать существующие россыпи с укрупнённым (по сравнению с изученным нами) самородным золотом.

Слабое развитие поздних процессов, при которых появляются такие нежелательные примеси, как As, Hg и др., обусловило незначительное количество сопутствующих токсичных элементов в составе рудной массы.

Источник вещества при формировании этого месторождения, очевидно, комплексный, о чём могут свидетельствовать утяжелённые значения δS^{34} (в среднем $\approx +10,5$ ‰ с незначительными вариациями) во всех сульфидах ($n = 31$) [10].

Выводы:

1. Общей типоморфной особенностью самородного золота месторождения является преобладающий тонкорассеянный характер, преимущественно в сульфидах.

2. Наиболее информативной типоморфной характеристикой самородного золота месторождения является пробность, высокая для ранней

высокотемпературной скарново-порфировой минерализации и средняя для поздней полиметаллической.

3. Вариации пробности, проявленные в каждом из генетических типов, являются функцией нескольких факторов: а) глубины локализации самородного золота, б) степени проникновения поверхностных вод, в) состава (содержания Ag) минерала-матрицы.

Авторы благодарят Б. И. Гонгальского, А. В. Волкова и В. Ю. Прокофьева за предоставленные образцы, О. Ю. Плотинскую за успешно проведенные полевые работы и П. А. Неволько за очень полезные консультации. Выражаем признательность рецензенту, конструктивные замечания которого способствовали совершенствованию текста статьи.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ, проекты 18-05-00673 и 19-05-00476.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров С. М. Золото в процессах эндогенного и гипергенного изменения сульфидов в магнезиальных скарнах // Геохимия. – 2007. – № 2. – С. 180–198.
2. Александров С. М., Тронева М. А. Генезис и состав боратов серии людвигита-вонсенита в магнезиальных скарнах Урала, Сибири и Дальнего Востока // Геохимия. – 2004. – № 5. – С. 525–543.
3. Берзина А. П., Берзина А. Н., Гимон В. О. [и др.]. Шахтаминская Мо-порфировая рудно-магматическая система (Восточное Забайкалье): возраст, источники, генетические особенности // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, № 6. – С. 764–786.
4. Бессонов Н. Н. Выделение молибден-медно-порфирирового типа оруденения на территории юго-восточного Забайкалья // Вестник Читинского государственного университета. – 2009. – № 1. – С. 12–17.
5. Воробьев Ю. К. Изучение фазовых превращений в сульфидах с помощью высокотемпературного рудного микроскопа // Записки Всесоюзного минералогического общества. – 1986. – Вып. 2. – С. 235–240.
6. Зоненшайн Л. П., Кузьмин М. И., Натанов Л. М. Тектоника литосферных плит территории СССР. Книга 1. – М.: Недра, 1990. – 328 с.
7. Зорин Ю. А., Беличенко В. Г., Рутштейн И. Г. [и др.]. Геодинамика западной части Монголо-Охотского складчатого пояса и тектоническая позиция рудных проявлений золота в Забайкалье // Геология и геофизика. – 1998. – Т. 39 (11). – С. 1578–1586.
8. Кантор М. З. Особенности скарнов Забайкалья и задачи их изучения // Вопросы рудоносности Восточного Забайкалья. – М.: Недра, 1967. – С. 141–163.
9. Киселева Г. Д., Коваленкер В. А., Трубкин Н. В. Гипогенная и гипергенная золотосеребряная минерализация на Au-Mo(W)-порфирировом Бугдаинском месторождении // Материалы конференции к 100-летию Н. В. Петровской. – М.: ИГЕМ РАН, 2010. – С. 246–248.
10. Коваленкер В. А., Абрамов С. С., Киселева Г. Д. [и др.]. Золотоносные порфирировые и порфириро-скарновые системы Восточного Забайкалья // Материалы Всероссийской конференции, посвященной 85-летию ИГЕМ РАН. – 2015. – С. 128–129.
11. Коваленкер В. А., Абрамов С. С., Киселева Г. Д. [и др.]. Крупное Cu-Au-Fe Быстринское месторождение (Восточное Забайкалье) – первый в России пример ассоциированной с адакитами скарново-порфирировой рудообразующей системы // Доклады академии наук. – 2016. – Т. 488, № 5. – С. 547–552.
12. Коваленкер В. А., Киселева Г. Д., Крылова Т. Л., Андреева О. В. Минералогия и условия формирования руд золотоносного W-Mo-порфирирового Бугдаинского месторождения (Восточное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений. – 2011. – Т. 53, № 2. – С. 107–142.
13. Коваленкер В. А., Плотинская О. Ю., Киселева Г. Д. [и др.]. Шеелит скарново-порфирирового Cu-Ag-Fe месторождения Быстринское (Восточное Забайкалье, Россия): генетические следствия // Геология рудных месторождений. – 2019. – Т. 61, № 6. – С. 67–88.
14. Коваленкер В. А., Трубкин Н. В., Абрамова В. Д. [и др.]. Типоморфные характеристики молибденита Быстринского Cu-Au-скарново-порфирирового месторождения (Восточное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений. – 2018. – Т. 60, № 1. – С. 68–90.
15. Спиридонов А. М., Зорина Л. Д., Китаев Н. А. Золотоносные рудно-магматические системы Забайкалья. – Новосибирск: Наука, 2006. – С. 129–149.
16. Спиридонов Э. М. Обзор минералогии золота в ведущих типах Au минерализации // Золото Кольского полуострова и сопредельных регионов. Труды Всероссийской (с международным участием) научной конференции, посвященной 80-летию Кольского НЦ РАН. – Апатиты: К & М, 2010. – С. 143–171.

17. Таусон В. Л., Кравцова Р. Г., Гребенщикова В. И. Типохимизм поверхности кристаллов пирита золоторудных месторождений // Доклады академии наук. – 2004. – Т. 399. – С. 673–677.
18. Таусон Л. В., Баумштейн В. И., Зорина Л. Д. Геохимические поля Быстринского рудного узла // Геология рудных месторождений. – 1985. – № 5. – С. 34–44.
19. Фёдорова А. А., Чернышева Н. Е. Особенности формирования метасоматических образований и руд на Быстринском золото-железо-медном месторождении Восточного Забайкалья // Вестник Читинского государственного университета. – 2009. – № 1 (52). – С. 136–143.
20. Харитонов Ю. Ф., Четкин В. Е., Шевчук Г. А. и др. Минерально-сырьевые ресурсы Читинской области. – Чита, 2003. – С. 84–87.
21. Языкова Ю. И., Трубкин Н. В. О составе и ассоциациях самородного золота в рудах скарнового месторождения Быстринское (Восточное Забайкалье) // Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию Н. В. Петровской. – М. : ИГЕМ РАН, 2010. – Т. 2. – С. 321–323.
22. Ярмолюк В. В., Коваленко В. И., Кузьмин М. И. Северо-Азиатский суперплюм в фанерозое: магматизм и глубинная геодинамика // Геотектоника. – 2000. – № 5. – С. 3–29.
23. Palenic C. S., Utsunomiya S., Reich M., Kesler S. E., Wang L. & Ewing R. C. «Invisible» gold revealed: Direct imaging of gold nanoparticles in a Carlin-type deposit // American Mineralogist. – 2004. – V. 89. – pp. 1359–1366.

REFERENCES

1. Aleksandrov S. M. Zoloto v protsessakh endogenno-go i gipergennogo izmeneniya sul'fidov v magnezial'nykh skarnakh [Gold in the processes of endogenous and hypergenic changes in sulfides in magnesian skarns], *Geokhimiya [Geochemistry International]*, 2007, No 2, pp. 180–198. (In Russ.).
2. Aleksandrov S. M., Troneva M. A. Genesis i sostav boratov serii lyudvigita-vonsenita v magnezial'nykh skarnakh Urala, Sibiri i Dal'nego Vostoka [Genesis and composition of borates of the ludwigite-wonsenite series in magnesian skarns of the Urals, Siberia and the Far East], *Geokhimiya [Geochemistry International]*, 2004, No 5, pp. 525–543. (In Russ.).
3. Berzina A. P., Berzina A. N., Gimon V. O., Krymskii R. Sh., Larionov A. N., Nikolaeva I. V., Serov P. A. Shakhtaminskaya Mo-porfirovaya rudno-magmaticheskaya sistema (Vostochnoe Zabaikal'e): vozrast, istochniki, geneticheskie osobennosti [Shakhtaminsk Mo-porphyry ore-magmatic system (Eastern Transbaikalia): age, sources, genetic features], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2013, V. 54, No 6, pp. 764–786. (In Russ.).
4. Bessonov N. N. Vydelenie molibden-medno-porfirovogo tipa orudneniya na territorii yugo-vostochnogo Zabaikal'ya [Isolation of a molybdenum-copper-porphyry mineralization type in the territory of southeastern Transbaikalia], *Vestnik Chitinskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Chita State University]*, 2009, No 1, pp. 12–17. (In Russ.).
5. Vorob'ev Yu. K. Izuchenie fazovykh prevrashchenii v sul'fidakh s pomoshch'yu vysokotemperaturnogo rudnogo mikroskopa [The study of phase transformations in sulfides using a high-temperature ore microscope], *Zapiski vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, 1986, V. 2, pp. 235–240. (In Russ.).
6. Zonenshain L. P., Kuz'min M. I., Natapov L. M. Tektonika litosfernykh plit territorii SSSR. Kniga 1 [Tectonics of lithospheric plates of the USSR. Book 1], Moscow, Nedra Publ., 1990, 328 p.
7. Zorin Yu. A., Belichenko V. G., Rutshtein I. G., Zorina L. D., Spiridonov A. M. Geodinamika zapadnoi chasti Mongolo-Okhotskogo skladchatogo poyasa i tektonicheskaya pozitsiya rudnykh proyavlenii zolota v Zabaikal'e [Geodynamics of the western part of the Mongol-Okhotsk fold belt and tectonic position of gold ore occurrences in Transbaikalia], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 1998, V. 39 (11), pp. 1578–1586. (In Russ.).
8. Kantor M. Z. Osobennosti skarnov Zabaikal'ya i zadachi ikh izucheniya [Features of skarns of Transbaikalia and tasks of their study], *Voprosy rudonosnosti Vostochnogo Zabaikal'ya [Ore Issues in Eastern Transbaikalia]*, Moscow, Nedra Publ., 1967, pp. 141–163.
9. Kiseleva G. D., Kovalenker V. A., Trubkin N. V. Gipogennaya i gipergennaya zolotoserebryanaya mineralizatsiya na Au-Mo(W)-porfirovom Bugdainskom mestorozhdenii [Hypogenic and hypergenic gold-silver mineralization at the Au-Mo(W)-porphyry Bugdain deposit], *Materialy konferentsii k 100-letiyu N. V. Petrovskoi [Conference proceedings on the 100th anniversary of N. V. Petrovskaya]*, Moscow, IГЕМ РАН Publ., 2010, pp. 246–248.

10. Kovalenker V. A., Abramov S. S., Kiseleva G. D., Kossova S. A., Krylova T. L., Yazykova Yu. I. Zolotonosnye porfirovye i porfirovo-skarnovye sistemy Vostochnogo Zabaikal'ya [Gold-bearing porphyry and porphyry-skarn systems of East Transbaikalia], *Materialy Vserossiiskoi konferentsii, posvyashchennoi 85-letiyu IGEM RAN [Materials of the All-Russian Conference dedicated to the 85th anniversary of IGEM RAS]*, 2015, pp. 128–129.
11. Kovalenker V. A., Abramov S. S., Kiseleva G. D., Krylova T. L., Yazykova Yu. I., Bortnikov N. S. Krupnoe Cu-Au-Fe Bystrinskoe mestorozhdenie (Vostochnoe Zabaikal'e) – pervyi v Rossii primer assotsirovannoi s adakitami skarnovo-porfirovoi rudoobrazuyushchei sistemy [The large Cu-Au-Fe Bystrinskoye deposit (East Transbaikalia) is the first Russian example of a skarn-porphyry ore-forming system associated with adakites], *Doklady akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*, 2016, V. 488, No 5, pp. 547–552. (In Russ.).
12. Kovalenker V. A., Kiseleva G. D., Krylova T. L., Andreeva O. V. Mineralogiya i usloviya formirovaniya rud zolotonosnogo W-Mo-porfirovogo Bugdainskogo mestorozhdeniya (Vostochnoe Zabaikal'e, Rossiya) [Mineralogy and conditions for the formation of ores of the gold-bearing W-Mo-porphyry Bugdainsky deposit (Eastern Transbaikalia, Russia)], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii [Geology of Ore Deposits]*, 2011, V. 53, No 2, pp. 107–142. (In Russ.).
13. Kovalenker V. A., Plotinskaya O. Yu., Kiseleva G. D., Minervina E. A., Borisovskii S. E., Zhilicheva O. M., Yazykova Yu. I. Sheelit skarnovo-porfirovogo Su-Ag-Fe mestorozhdeniya Bystrinskoe (Vostochnoe Zabaikal'e, Rossiya): geneticheskie sledstviya [Scheelite of the skarn-porphyry Cu-Ag-Fe deposit of Bystrinskoye (East Transbaikalia, Russia): genetic consequences], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii [Geology of Ore Deposits]*, 2019, V. 61, No 6, pp. 67–88. (In Russ.).
14. Kovalenker V. A., Trubkin N. V., Abramova V. D., Plotinskaya O. Yu., Kiseleva G. D., Borisovskii S. E., Yazykova Yu. I. Tipomorfnye kharakteristiki molibdenita Bystrinskogo Su-Au-skarnovo-porfirovogo mestorozhdeniya (Vostochnoe Zabaikal'e, Rossiya) [Typomorphic characteristics of molybdenite of the Bystrinsky Cu-Au-skarn-porphyry deposit (Eastern Transbaikalia, Russia)], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii [Geology of Ore Deposits]*, 2018, V. 60, No 1, pp. 68–90. (In Russ.).
15. Spiridonov A. M., Zorina L. D., Kitaev N. A. Zolotonosnye rudno-magmaticheskie sistemy Zabaikal'ya [Gold-bearing ore-magmatic systems of Transbaikalia], Novosibirsk, Nauka Publ., 2006, pp. 129–149.
16. Spiridonov E. M. Obzor mineralogii zolota v vedushchikh tipakh Au mineralizatsii [A review of gold mineralogy in the leading types of Au mineralization], *Zoloto Kol'skogo poluostrova i sopredel'nykh regionov. Trudy Vserossiiskoi (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 80-letiyu Kol'skogo NTs RAN [Gold of the Kola Peninsula and adjacent regions. Proceedings of the All-Russian (with international participation) scientific conference dedicated to the 80th anniversary of the Kola Science Center RAS]*, Apatity, K & M Publ., 2010, pp. 143–171.
17. Tauson V. L., Kravtsova R. G., Grebenshchikova V. I. Tipokhimizm poverkhnosti kristallov pirita zolotrudnykh mestorozhdenii [Typochemism of the surface of pyrite crystals of gold deposits], *Doklady akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*, 2004, V. 399, pp. 673–677. (In Russ.).
18. Tauson L. V., Baumshtein V. I., Zorina L. D. Geokhimicheskie polya Bystrinskogo rudnogo uzla [Geochemical fields of the Bystrinsky ore cluster], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii [Geology of Ore Deposits]*, 1985, No 5, pp. 34–44. (In Russ.).
19. Fedorova A. A., Chernysheva N. E. Osobennosti formirovaniya metasomaticheskikh obrazovaniy i rud na Bystrinskom zoloto-zhelezo-mednom mestorozhdenii Vostochnogo Zabaikal'ya [Features of the formation of metasomatic formations and ores in the Bystrinsky gold-iron-copper deposit of East Transbaikalia], *Vestnik Chitinskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Chita State University]*, 2009, No 1 (52), pp. 136–143. (In Russ.).
20. Kharitonov Yu. F., Chechetkin V. E., Shevchuk G. A. i dr. Mineral'no-syr'evye resursy Chitinskoj oblasti [Mineral resources of the Chita region], Chita, 2003, pp. 84–87.
21. Yazykova Yu. I., Trubkin N. V. O sostave i assotsiatsiyakh samorodnogo zolota v rudakh skarnovogo mestorozhdeniya Bystrinskoe (Vostochnoe Zabaikal'e) [About the composition and associations of native gold in ores of the Bystrinskoye skarn deposit (East Transbaikalia)], *Materialy Vserossiiskoi konferentsii, posvyashchennoi 100-letiyu N. V. Petrovskoi [Materials of the All-Russian Conference dedicated to the 100th anniversary of N. V. Petrovskaya]*, Moscow, IGEM RAN Publ., 2010, V. 2, pp. 321–323.
22. Yarmolyuk V. V., Kovalenko V. I., Kuz'min M. I. Severo-Aziatskii superplyum v fanerozoje: magmatizm i glubinnaya geodinamika [North-Asian superplume in Phanerozoic: magmatism and deep geodynamics], *Geotektonika [Geotectonics]*, 2000, No 5, pp. 3–29. (In Russ.).

23. Palenic C. S., Utsunomiya S., Reich M., Kesler S. E., Wang L. & Ewing R. C. "Invisible" gold revealed: Direct ima-

ging of gold nanoparticles in a Carlin-type deposit, American Mineralogist, 2004, V. 89, pp. 1359–1366.

NATIVE GOLD TYPOMORPHISM AS INDICATOR OF VARIOUS TYPES OF MINERALIZATION OF LARGE SKARN-PORPHYRY Au-Fe-Cu DEPOSIT BYSTRINSKOE, EASTERN TRANSBAIKALIA

Kiseleva G. D. (PhD in geology and mineralogy, researcher)

Yazykova Yu. I. (junior researcher)

Kovalenker V. A. (doctor of geological and mineralogical sciences, chief researcher)

Trubkin N. V. (PhD in geology and mineralogy, leading researcher)

Borisovsky S. E. (PhD in geology and mineralogy, senior researcher)

FSBII «Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences», Moscow

The paper makes up for the lack of publications on one of the main industrial components of the Bystrinskoye deposit - gold. The features of the distribution of native gold in ores, the frequency of gold formation in various matrix minerals, compositional variations, morphology and particle size distribution are established. It has been shown that the deposition of native gold is associated with all stages of the process of mineral formation: aposcarnic, porphyry and pyrite. The most informative typomorphic characteristic of native gold is composition: the dependence of fineness on the belonging of native gold to one or another part of the mineral formation process and partly on the depth of localization of gold mineralization is noted. The regularities of the enrichment of certain sections of ores with gold, rare for the deposit, were revealed. They are confined to zones of fracture and processing of primary ores during the application of late processes. A mineral indicator of gold enrichment is the coexistence of pyrite-chalcopyrite and magnetite aggregates, preferably in serpentinized aposcarns with minerals replacing them. Among them there may occur valeriitis, chalcopyrite and magnetite of subsequent generations (including W-magnetite), pyrite (especially Co-pyrite), sulfotellurides Bi, sulfides, sulfosalts, etc., which indicates the processing of primary concentrations of Au. The geochemical markers of gold-enriched ores - increasing contents of Mg, Cu, Co, Ag, Zn, W, Bi, Te, S, Pb, As, Sb, Hg in the ores - indicate the combination of all the processes that appear in the deposit that contribute to the concentration of Au.

Keywords: skarn-porphyry mineralization, native gold, typomorphism, fineness, zonality, ore concentration indicators.



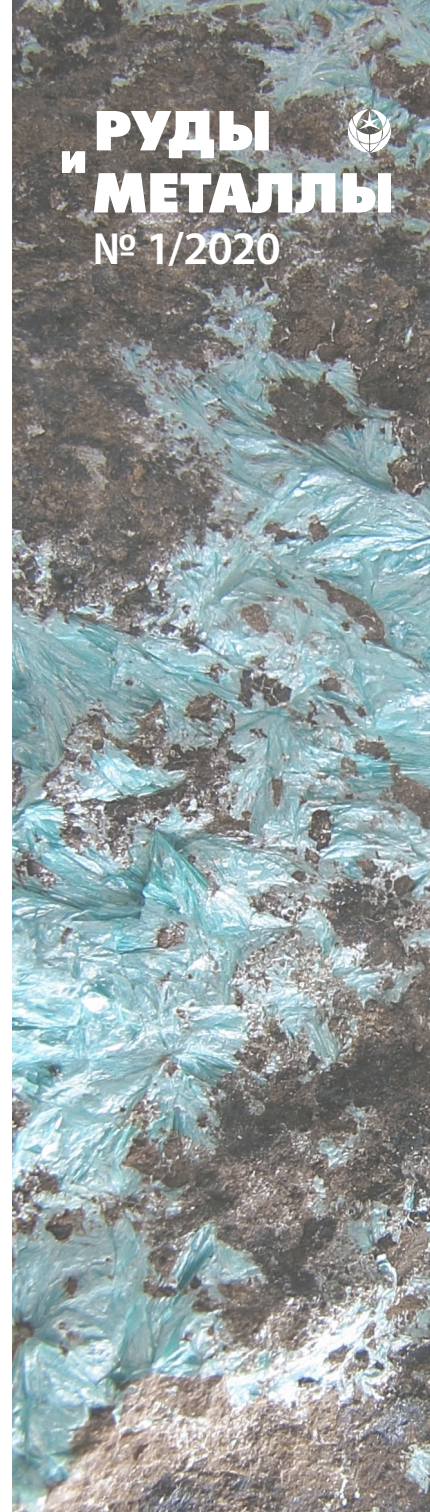
Au-Pd-Cu-Se-U-РУДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ РУДОПРОЯВЛЕНИЯ СВЕТЛОЕ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ КАРЕЛИИ

Au-Pd-Cu-Se-U минерализация рудопроявления Светлое (Центральная Карелия) формировалась близповерхностно в условиях привноса селена, меди, свинца, благородных металлов, урана и интенсивного окисления ~1500 млн лет назад. Оруденение содержит халькопирит, борнит, клаусталит и более редкие селениды, тонкодисперсное самородное золото (Ag 1–13 %), Au-Pd-Cu-фазы, глобулярные сростания Au-Pd-Se, Pd-As-Sb, минералы урана и редкоземельных элементов, а также гематит, гётит, халькозин и более сложные соединения зоны окисления. Рудная минерализация приурочена к зоне низкотемпературного щелочного метасоматоза и сброса Mg-Fe-компонентов, сформировавшейся вблизи контакта карбонатных пород и габбро-долеритов. Характером изменений и рудной минерализацией проявление Светлое подобно Au-Cu-U-месторождениям падминского типа в Онежской структуре и некоторым объектам Лапландского зеленокаменного пояса в Финляндии.

Ключевые слова: Au-Pd-Cu-Se-U минерализация, золото, палладсид, порпецит, купроаурид палладия, метасоматические изменения, палеопротерозой, Карелия.

Рудопроявление Светлое было открыто в палеопротерозойской Кумсинской структуре центральной Карелии предприятием «Невскгеология» (производственные работы Ю. В. Петрова за 1990 г.) в конце прошлого столетия. В одной из проб с богатой Cu-S минерализацией содержание Au доходило до 27 г/т [13]. Впоследствии при поверхностном опробовании изменённых пород с вкрапленно-прожилковым оруденением было установлено, что рудная зона характеризуется средними концентрациями Cu (2,7 %), U (2,16 %), содержит Au (1 г/т на 0,3 м), Pb (до 1,45 %), V (до 0,1 %), Cr (0,1 %), As (0,01 %), Y (0,07 %), Bi (до 0,03 %), Ag (99 г/т), Pt (1,1 г/т), Pd (1,3 г/т) [9]. Локализация в палеопротерозойских отложениях и геохимическая специализация оруденения в зоне складчато-разрывных деформаций (СРД) и щелочно-железomagнезиального метасоматоза подобны характеристикам известных комплексных палеопротерозойских месторождений и рудопроявлений падминского типа Онежской структуры [2, 8, 11, 12], Салла-Пана-Куоляярвинской структуры [1, 3, 5–8 и более ранние производственные поисковые работы А. Д. Дайна за 1978 г.], месторождениям палеопротерозойского Лапландского зеленокаменного пояса и сланцевого пояса Куусамо и Перяпохья в Финляндии (месторождения района Куусамо, Юомасуо, Ромпас, Перяпохья, Сааттопора, Суурикуусикко) [18]. Часть Au-Cu-U-месторождений финской Лапландии со значительными ресурсами разрабатывается [14, 19, 20, 24–28, 31–33].

Финские геологи выделяют три основных типа месторождений (проявлений) в изменённых вмещающих толщах [18–20, 26]: 1 – собственно гидротермальные орогенической группы



Кулешевич Людмила Владимировна

кандидат геолого-минералогических наук
ведущий научный сотрудник
kuleshev@krc.karelia.ru

Лавров Олег Борисович

научный сотрудник, руководитель музея
геологии докембрия
petrlavrov@list.ru

ФГБУН Институт геологии Карельского
научного центра РАН,
г. Петрозаводск



золото-сульфидные, приуроченные к шир-зонам; 2 – золото-медно-сульфидные с атипичной минеральной ассоциацией (Au, Cu, Ni, Co, Bi с U, REE); 3 – палеороссыпные в осадках и конгломератах, часто с наложенной благороднометалльной минерализацией. В последние десятилетия в связи с открытием крупнейшего месторождения Олимпик Дам (Fe-O-Cu-Au-REE-U) в Австралии [29, 30] рифейского возраста (~1,5 млрд лет) в мире особенно возрос интерес к комплексным железо-оксидно-золото-медным объектам и родственным им золото-медно-сульфидным месторождениям [15]. Подобные рудные объекты типа IOCG (оксидно-железо-медно-сульфидные) были выделены в отдельную группу и в палеопротерозойских толщах севера Финляндии [24, 25].

Геохимический тип оруденения рудопроявления Светлое, связь с щелочно-железосиликатным характером изменений вмещающих пород, схожесть рудных минерализаций этого рудопроявления и месторождений падминской группы в Онежской структуре – всё это важные причины детального изучения характера изменений и рудных ассоциаций в палеопротерозойской Кумсинской структуре. Фактический материал для данной работы – образцы вмещающих пород (габброидов, базальтов и карбонатных толщ), их метасоматически преобразованных разновидностей, околорудных метасоматитов и руд, отобранные на рудопроявлении Светлое, а также результаты общегеологического изучения строения всей Кумсинской структуры.

Изучение закономерностей строения зон метасоматического изменения (геологическим, минералого-петрографическим и геохимическим картированием изменённых пород и оруденения) проводилось традиционными методами изучения околорудных низкотемпературных щелочных и сопряжённых им железомagneзиальных метасоматитов с отбором образцов по выделенным зонам. Силикатный и микрокомпонентный составы вмещающих пород, метасоматитов и руд определялись количественным химическим и ICP-MS анализами в Аналитическом центре Института геологии КарНЦ РАН (г. Петрозаводск). Минеральный состав рудных и нерудных минералов метасоматических зон изучался оптической (в шлифах и аншлифах) и электронно-зондовой микроскопией. Рудные минералы исследовались в аншлифах на электронном сканирующем микроскопе VEGA II LSH (Tescan) с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350. Радиологическое датирование (Rb-Sr и Pb²⁰⁶/Pb²⁰⁷) было выполнено по образцам Л. В. Кулешевич в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН [3].

Кумсинская структура – узкий, вытянутый в северо-западном направлении палеопротерозойский синклинорий в центральной части Карелии (рис. 1). На юго-востоке он соединяется с Пергубской и более крупной Онежской структурами. Кумсинская структура образовалась на архейском (лопийском) основании. Она сложена отложениями сумийско-сариолийского (PR₁sm-sr, 2,6–2,3 млрд лет) надгоризонта, который перекрывается породами ятулийского надгоризонта (PR₁jt, 2,3–2,1 млрд лет). Именно к ятулийскому надгоризонту приурочены все известные рудопроявления Кумсинской структуры. Отложения ятулийского надгоризонта представлены нижним сегозерским и верхним онежским горизонтами (все названия даются по местной стратиграфической шкале). Сегозерский горизонт объединяет кварцевые конгломераты, кварцитопесчаники и базальты, онежский горизонт – доломиты, карбонатсодержащие песчаники и сланцы (алевролиты, аргиллиты), чередующиеся с основными вулканитами. Палеопротерозойские отложения через кору выветривания залегают на архейских породах лопийского надгоризонта и гранитах Чебинского массива возраста ~2,99 млрд лет. Ятулийские толщи прорываются силлами габбродолеритов (~2,0 млрд лет). Силлы габбродолеритов прослеживаются в северо-западном направлении вдоль р. Кумса от города Медвежьегорска на участках Медные Горы, Падун, Светлое (см. рис. 1). На участке Светлое разрез представлен преимущественно верхними толщами ятулийского надгоризонта (карбонатами, аргиллитами, базальтами), прорванными силлами габбродолеритов.

Кумсинская структура испытала складчатость и, в позднесвекофенское время, СРД северо-западного простирания (см. рис. 1). Дометаморфические преобразования сопровождались диагенезом осадков и интенсивной объёмной альбитизацией (спилитизацией) всех основных пород. Ранние метаморфические преобразования вмещающих ятулийских пород и секущих их тел габброидов отвечают зеленосланцевой фации и происходили ~1,78–1,76 млрд лет назад (табл. 1). К осевой плоскости складок приурочены сдвиговые деформации и рассланцевание. Зоны рассланцевания в наиболее сжатых складках в осадочных толщах сопровождаются щелочным и железомagneзиальным метасоматозом, в габбродолеритах развиты жилы секущих альбититов.

В зонах северо-западного рассланцевания развиты слюдисто-карбонатно-хлоритовые метасоматиты, которые секутся жилами низкотемпературных карбонатсодержащих альбититов (эйситов). Альбититы сопровождаются медно-сульфидной мине-

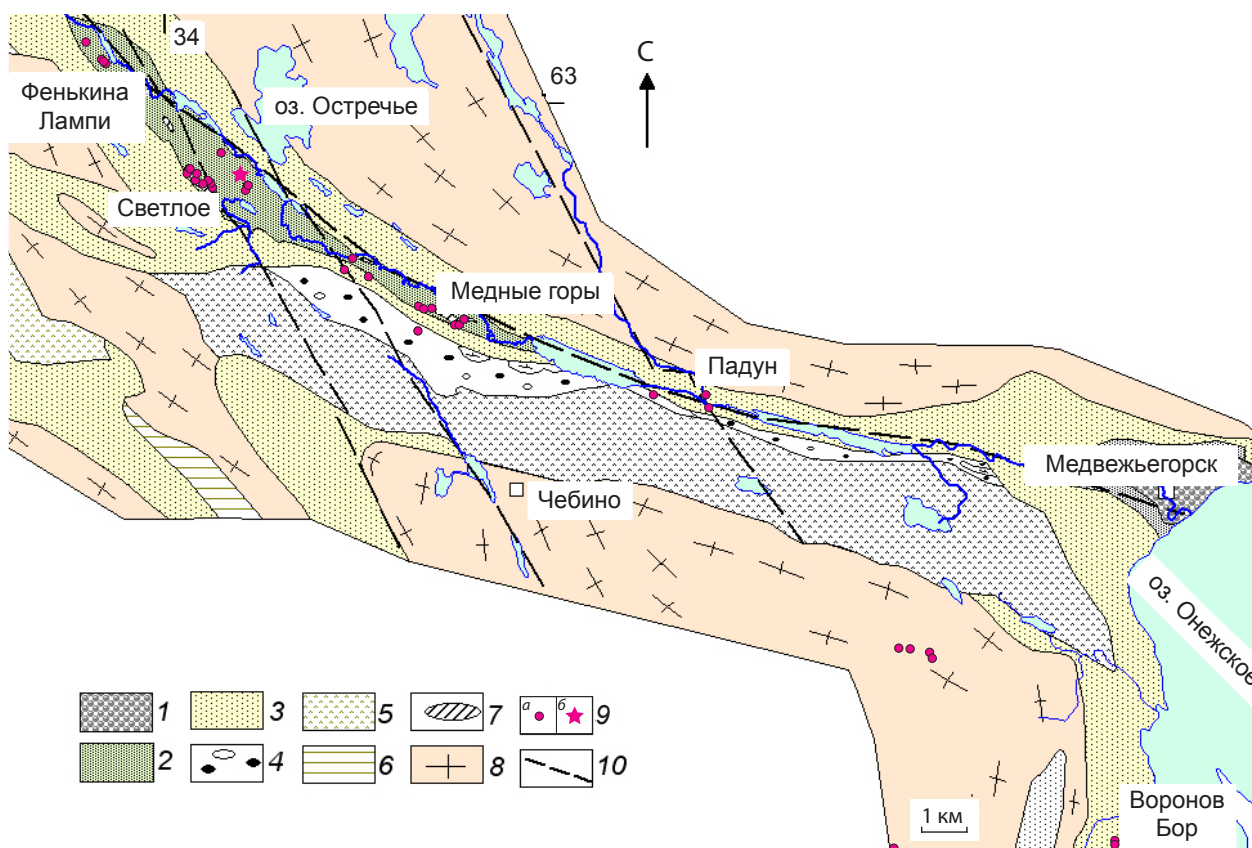


Рис. 1. СХЕМА ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ КУМСИНСКОЙ СТРУКТУРЫ (составлена автором с использованием материалов предшествующих работ):

1 – четвертичные отложения; ятулийский надгоризонт: 2 – базальты, карбонаты, алевролиты (PR₁jt₂), 3 – базальты, кварцитопесчаники (PR₁jt₁); 4 – полимиктовые конгломераты сариолийского надгоризонта (PR₁sr); 5 – метабазальты и андезибазальты, туфы сумийского надгоризонта (PR₁sm); 6 – лопийский надгоризонт (AR₂lp₁); 7 – габбродолериты, диориты (PR₁); 8 – граниты (AR₂); 9 – точки отбора образцов (а), рудопроявление Светлое (б); 10 – тектонические нарушения

рализацией на участках Светлое, Медные горы в Кумсинской и Воронов Бор в Пергубской структурах, соединяющихся южнее с Онежской структурой. Радиологическим датированием метасоматически изменённых пород с рудной минерализацией, проведённым Rb-Sr методом [3], установлено время их образования как более позднее – 1,50–1,41 млрд лет (см. табл. 1). Промежуточные цифры (~1,6 млрд лет), вероятно, отражают смешение минерального вещества (метаморфических и метасоматических ассоциаций).

Петрографо-петрохимические особенности вмещающих пород и метасоматитов. *Метабазальты* – тёмно-зелёные мелкозернистые миндалекаменные, массивные или слабодиссоцированные породы, составляющие основной объём ятулийских вулканогенных толщ. Они сложены минералами исключительно метаморфической ассо-

циации (актинолитом, хлоритом, раскисленным плагиоклазом, эпидотом, кальцитом, кварцем, акцессорным титанитом). Химический состав метабазальтов отличается от секущих их силлов габбродолеритов повышенным содержанием Fe₂O₃, MgO, Al₂O₃, Na₂O, умеренным содержанием TiO₂ и всех микрокомпонентов, низким ΣREE (табл. 2).

Карбонатные толщи представлены светлосерыми, иногда слегка желтоватыми мелкозернистыми породами из кальцита, доломита и незначительного количества других минералов (кварца, хлорита, серицита, акцессорного рутила). Для карбонатных пород характерно низкое содержание всех петрогенных и микрокомпонентов, за исключением CaO, в том числе низкий уровень содержания редкоземельных элементов (табл. 3; рис. 2, б). Потери при прокаливании (ППП) представлены преимущественно CO₂. Прослои полос-

1. ВОЗРАСТ ИЗМЕНЁННЫХ ПОРОД И ОРУДЕНЕНИЯ НА РУДОПРОЯВЛЕНИЯХ СВЕТЛОЕ, МЕДНЫЕ ГОРЫ КУМСИНСКОЙ И ВОРОНОВ БОР ПЕРГУБСКОЙ СТРУКТУР

Проявление	Породы, их изменения и рудная минерализация	Образец	Возраст, млн лет
Медные горы	Метаморфизованные габбродолериты (с титанитом)	МГ-6*	1763,2 ± 4,3
Воронов Бор	Метаморфизованные кварцитопесчаники	ВБ-17	1778,4 ± 6
	Метабазальты изменённые (с сульфидами)	ВБ-1а, 1в	1663,2 ± 7 1644 ± 11
	Альбитизированные породы с сульфидами	ВБ-4а, ВБ-4, ВБ5а	1609 ± 9,3 1606 ± 11 1597 ± 6,1
Медные горы	Альбититы, секущие габбродолериты, с халькопирит-карбонатными прожилками	МГ-7	1495 ± 7 1495 ± 13 1494 ± 17 1492 ± 10
Светлое	Тремолит-карбонатные метасоматиты по карбонатной толще с вкрапленностью пирита	СВ-6	1404,8 ± 7,9
	Тремолит-(хлорит)-карбонатные метасоматиты по карбонатной толще (на контакте с базитами)	СВ-9/4	1637 ± 5,6 1454,6 ± 5,3
	Fe-Mg-метасоматиты из центральной части рудной зоны с Au-Pd-Cu-Se-U минерализацией и жилой альбитита	СВ-12	1460 ± 17 1457 ± 7,3
	Альбит-(хлорит, эпидот)-кварцевая жила в альбитите с единичными сульфидами	СВ-7	1490 ± 5,2 1492 ± 21

Примечание. Определение возраста проводилось по минералам и валовому составу породы Rb-Sr методом или Pb^{206}/Pb^{207} методом по титаниту (*).

чатых тонкозернистых аргиллитов выходят на поверхность северо-западнее участка Светлое. Они пёстрые, сильнодеформированные и смятые в мелкие гофрированные складки.

Силлы габбродолеритов прослеживаются вдоль Кумсинской структуры. Они секут базальты, карбонатные толщи и совместно с вмещающими толщами смяты в складки. Габбродолериты – мелкозернистые плотные зеленовато-чёрные породы массивной текстуры, содержат амфибол, замести-вший пироксен, раскисленный плагиоклаз (от ан-

дезина до альбита), хлорит, эпидот, биотит, реже кварц, кальцит (минералы стадии метаморфических изменений). Первичные силикаты в них практически не сохраняются. На месте первичных пироксенов образуются кальциевая роговая обманка и актинолит, в шлифах просматриваются лишь теневые структуры первичных пироксенов. Рудные минералы представлены титаномагнетитом, ильменитом и образующимся по ним титанитом, редкой вкрапленностью халькопирита и пирротина. Габбродолериты характеризуются повышенными

2. ХИМИЧЕСКИЙ И МИКРОКОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ МЕТАБАЗАЛЬТОВ, ГАББРОДОЛЕРИТОВ И ГАББРОДИОРИТОВ УЧАСТКА СВЕТЛОЕ (масс. %, г/т)

Порода	Метабазальты (к северо-западу от проявления Светлое)		Габбродолериты с бедной халькопиритовой вкрапленностью			Хлоритизи- рованные габбродолериты вблизи зоны изменения	Диориты, габбродиориты					
	№ пп	1	2	3	4		5	6	7	8	9	10
Образец	220K	201K	CB-2/3	CB-3*	CB-8/4	CB-5/6	DSV-4	DSV-2	DSV-5	DSV-3	DSV-6	
SiO ₂ , %	47,96	51,36	50,32	48,66	48,40	44,24	59,84	56,40	56,04	53,40	52,64	
TiO ₂	1,61	1,27	2,54	2,4	2,18	2,48	0,86	1,65	1,71	1,63	1,56	
Al ₂ O ₃	14,93	14,12	11,74	13,14	13,28	12,14	15,93	14,65	13,31	13,30	14,96	
Fe ₂ O ₃	8,7	8,85	7,44	7,39	6,83	2,85	5,31	2,62	7,66	8,13	2,70	
FeO	3,66	3,16	7,90	9,63	10,13	11,85	3,09	3,44	4,53	5,60	4,31	
MnO	0,206	0,162	0,155	0,181	0,133	0,19	0,04	0,091	0,072	0,088	0,012	
MgO	8,01	6,99	3,08	4,52	4,54	10,18	2,08	5,80	3,59	4,16	8,15	
CaO	6,59	6,01	8,47	6,86	7,70	6,64	2,49	4,39	3,88	3,95	4,32	
Na ₂ O	4,0	4,24	3,13	2,78	3,08	2,46	8,96	6,75	7,50	6,96	5,57	
K ₂ O	0,47	0,28	0,21	1,38	0,61	0,83	0,16	1,38	0,10	0,58	2,74	
H ₂ O	0,20	0,18	0,22	0,34	0,14	0,21	0,25	0,25	0,22	0,21	0,24	
ППП	3,11	2,66	4,11	2,67	2,85	5,11	0,60	1,84	0,94	1,17	2,42	
P ₂ O ₅	0,18	0,17	0,45	0,28	0,30	0,38	0,28	0,25	0,30	0,30	0,27	
Σ	99,72	99,55	99,77	100,2	100,1	99,56	99,89	99,51	99,85	99,54	99,89	
alk	4,47	4,52	3,34	4,16	0,75	3,29	9,12	8,13	7,60	7,54	8,31	
Cr, г/т	217	201	33	18	30		7,12					
V	288	267	330	516	584	454	119	209	190	247	267	
Ni	104	81	35	52	61	26	5	6	2,5	6,5	8	
Co	48	36	62	47	57	28	18	21	30	17	22	
Cu	9,1	7,6	349	253	193	57	10	14	15	15	12	
Ag	0,07	0,10	0,53	0,36	0,34	0,39	0,35	0,19	0,23	0,19	0,16	
Pb	4	3	1,8	5,3	1,4	0,5	2,5	1,2	2,1	1,5	1,1	
Bi	0,03	0,04	0,12	0,08	0,08				0,13			
Sb	0,71	0,50					0,21	0,24	0,29	0,21	0,28	
Zr	72	64	300	193	205	294	604	244	283	269	183	
Sr	164	133	185	151	108	23	41	18	38	17	33	
Ba	248	174	45	211	54	100	35	40	45	33	59	
Y	24	21	48	28	51	53	22	29	35	36	20	
ΣREE	62	54	198	139	150	134	199	86	122	204	48	
Th	1,4	1	4,2	3	3,2	3,6	18	5,9	8,7	6,9	4,8	
U	0,4	0,3	1,2	0,6	0,7	4,4	2	2,1	1,8	1,5	2	

Примечание. * – с биотитом. Малые элементы определялись методом ICP-MS, пустые клетки – элемент не определялся, ΣREE – сумма редкоземельных элементов (здесь и далее), alk = (Na₂O + K₂O).

3. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД И МЕТАСОМАТИТОВ РУДОПРОЯВЛЕНИЯ СВЕТЛОЕ (масс. %, г/т)

Зона метасоматической колонки	Карбонатные породы (внешняя зона 1)		Тремолит-карбонатные породы с бордовым карбонатом и редкой вкрапленностью пирита (зона 2)		Пирит-тремолит-карбонатные метасоматиты ⁽¹⁾ , иногда с гематитом ⁽²⁾ (зона 3)			Рудная зона с сульфидами меди ⁽³⁾ , клаусталитом ⁽⁴⁾ и уранинитом (внутренняя зона 4)				
	Образец	СВ-3/3	СВ-5/3	СВ-8	СВ-8/6	СВ-6*	СВ-8/3 ¹	СВ-8/5 ²	СВ-9/4 ³	СВ-9/4 ³	7 ⁴	PCB-7L
SiO ₂ , %	1,18	4,19	2,42	3,99	10,19	4,48	6,99	7,54				
TiO ₂	0,02	0,06	0,01	0,03	0,05	0,04	0,07	0,13				
Al ₂ O ₃	2,95	2,32	2,22	1,8	2,95	2,19	3,4	1,24				
Fe ₂ O ₃	0,08	0,27	1,1	2,1	1,88	2,72	4,23	4,77				
FeO	0,14	1,44	0,5	0,57	1,68	1,11	2,23	0,57				
MnO	0,063	0,334	0,331	0,322	0,271	0,277	0,275	0,301				
MgO	2,53	2,06	13,67	17,67	4,89	1,14	4,78	2,09				
CaO	49,48	50,22	36,8	30,66	43,65	48,92	43,38	45,26				
Na ₂ O	0,02	0,03	0,03	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02				
K ₂ O	0,13	0,01	0,01	< 0,01	0,01	0,01	0,01	0,08				
H ₂ O	0,23	0,23	0,21	0,27	0,17	0,014	0,14	0,29				
ППП	42,75	38,33	42,22	42,14	33,75	38,60	33,98	37,24				
P ₂ O ₅	0,05	0,06	0,005	0,01	0,01	0,04	0,04	0,02				
Σ	99,62	99,55	99,53	99,57	99,54	99,97	99,54	99,55				
Cr, г/т	3	5	12	18	4	25	8	1796	1691	1145	1229	
V	5	10	11	22	10	23	29	878	815	534	599	
Ni	6	5	7,5	8	7	7,4	9	13	16	12	5,4	
Co		0,3	7,4	3,3	112	98	35	26	25	21	20	
Cu	2	13	7	10	11	10	32	3947	3298	1814		
Ag			0,06	0,12	0,06		0,06	2,96	3,1	7,2	4,33	
Pb	1,0	1,5	1,1	1,5	0,8	3,9	0,7	35,5	481	5917	4440	
Bi		0,03		3,62	0,05	0,04		13,7	12,66	8,76	10,12	
Sb			0,17	0,35				1,14	1,03	0,79	1,07	
Se								19	16	1350	1562	
Zr	2	7	8	11	6	10	12	9	6	5	6	
Sr	178	170	66	35	171	217	184	129	108	89	104	
Ba	11	5	12	15	8	9	3	41	36	14	15	
Y	1,2	3,3	1,8	3,2	2,0	3,8	2,3	392	387	204	211	
ΣREE	6,2	5,5	8,7	15,6	3,5	3,9	5,3	628	577	422	457	
Th	0,2	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	1	0,1	0,2	0,3	0,3	
U	0,1	2,3	0,8	2,7	1,7	2,1	4,7	551	567	801	773	
Au			0,20		0,1		0,16		0,12	0,86	0,31	
ΣЭПГ			0,31				0,07		0,13	1,77–2,0	0,23	

Примечание. Малые элементы определялись методом ICP-MS. Пустая клетка – элемент не определялся.

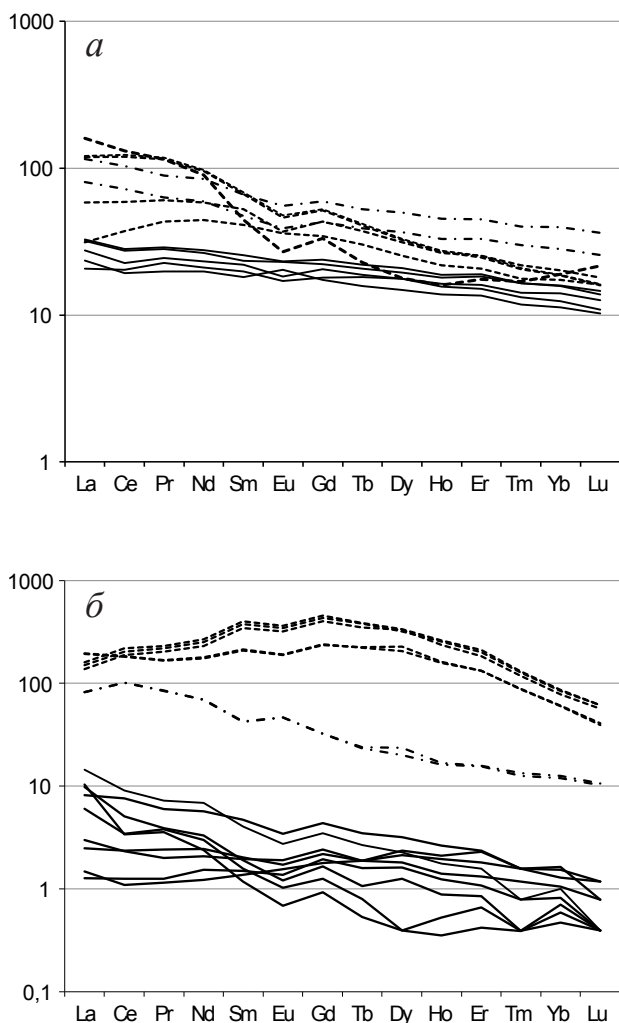


Рис. 2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (нормализовано относительно хондрита C_1):

a – базальты (сплошная линия), габбро-диориты (штрих-пунктир), габбро-диориты (штрих); *б* – карбонатные породы (сплошная линия), пирит-тремолит-кальцитовые метасоматиты (штрих-пунктир), метасоматиты околорудной зоны (штрих)

концентрациями TiO_2 (2,18–2,54 %), ΣFe ($FeO > Fe_2O_3$) и более низкими (относительно базальтов) Al_2O_3 , MgO (см. табл. 2).

Метагаббродиориты прослеживаются западнее участка Светлое. Они красновато-чёрного цвета, массивной текстуры, обычно выделяются как дифференциаты габбро-диоритов. Породы содержат роговую обманку, плагиоклаз (раскисленный до альбита), биотит, иногда микроклин, в меньшем количестве – вторичные минералы (хлорит, эпи-

дот), ильменит, титанит. Акцессорные минералы представлены цирконом и монацитом. Породы содержат SiO_2 до 53–60 %, Na_2O до 5,57–8,96 %, в них низкая концентрация MgO , ΣFe (причем $Fe_2O_3 > FeO$), также присутствуют TiO_2 , CaO , Cr , V , Mn , Cu , Ni , Co (см. табл. 2). Породы имеют высокую существенно натриевую щёлочность и характеризуются повышенным и неоднородным распределением K_2O , Zr , Th и REE (см. рис. 2, *a*). Локально породы бывают биотитизированы, при этом в них повышается содержание K_2O до 1,34–2,74 %.

Метасоматические изменения по базитам. В зонах СРД и рассланцевания северо-западного простирания на контактах разнородных пород (основных и карбонатных) развивается железо-магнезиальный метасоматоз. Линза изменённых базитов в центре участка Светлое полностью преобразуется в зелёные хлоритовые сланцы, в химическом составе изменённых пород увеличивается содержание MgO и FeO (см. табл. 2). На этапе более поздних деформаций metabasalts и габбро-диориты секутся телами эйцитов и кварц-кальцитовыми жилами с медно-сульфидной минерализацией.

Метасоматические изменения по карбонатной толще. Биметасоматические изменения развиваются на такого же типа контактах разнородных пород; формируются амфибол-карбонатные метасоматиты, сопровождающиеся вкрапленностью пирита. В центральной зоне метасоматической колонки присутствуют слюды, хлорит, кальцит, развита рудная минерализация. Протяжённость зоны метасоматически изменённых пород на участке Светлое 420 м, мощность зоны с рудной минерализацией 6–20 м. Микрокомпонентный состав изменённых карбонатных пород представлен в табл. 3 и на графиках рис. 3. Рудная минерализация приурочена к внутренней, четвёртой, зоне колонки.

Изменение карбонатных пород начинается с замещения доломита кальцитом (см. табл. 3), затем в них начинают выделяться метакристаллы светло-зелёного игольчатого амфибола (тремолита). Амфибол-кальцитовые метасоматиты зоны 3 (см. табл. 3) содержат вкрапленность пирита пентагондодекаэдрического габитуса (до 7–15 %). Тремолит на поздних стадиях изменения незначительно замещается хлоритом. Хлорит ассоциирует с гематитом и акцессорным рутилом, его температура образования оценивается в 215–190 °С [9].

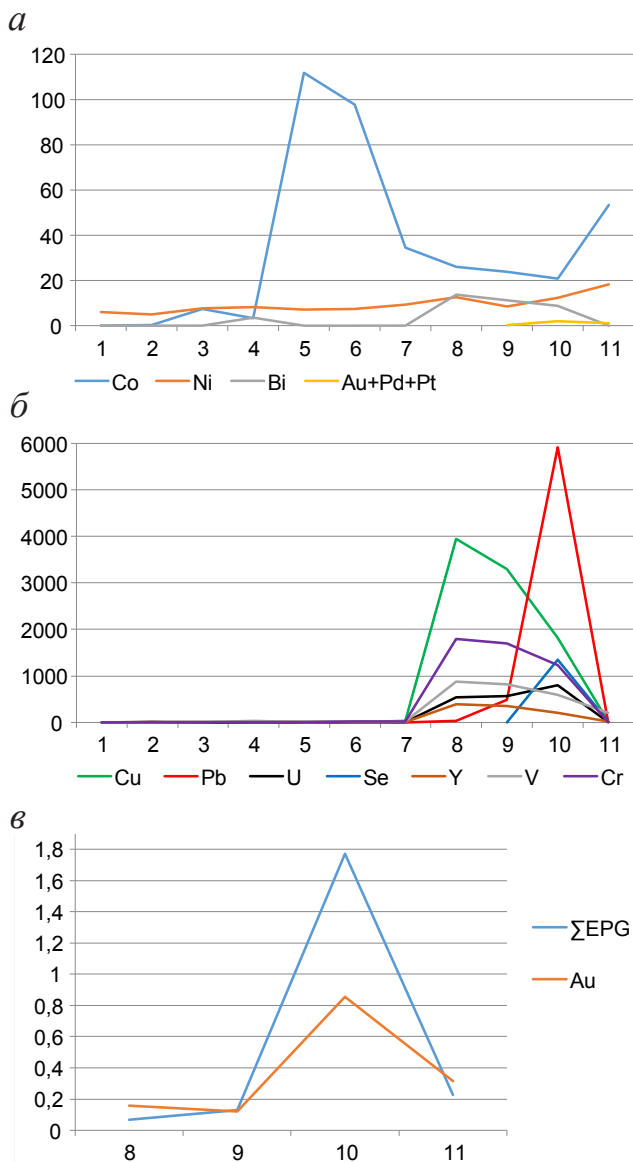


Рис. 3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ В ОКОЛУРУДНЫХ МЕТАСОМАТИТАХ РУДОПРОЯВЛЕНИЯ СВЕТОЕ:

а – Co, Ni, Bi, (Au + Pd + Pt); б – Cu, Pb, U, Se, Y, V, Cr; в – ΣEPG, Au; номера проб по оси x соответствуют номерам в табл. 2

Появление зоны «бордовых карбонатов» обусловлено выпадением гематита. Во внутренней (центральной) зоне 4 развиты хлорит-слюдисто-кальцитовые метасоматиты и кальцитовые жилы с Cu-Pb-Se-S-U-рудной минерализацией с благородными металлами.

Карбонатные толщи внешней зоны метасоматической колонки (зона 1) содержат самые низкие

концентрации рудогенных и редкоземельных элементов (см. табл. 3; см. рис. 3). Тем не менее уже и в этой зоне фиксируются фоновые содержания U до 2,3 г/т (см. табл. 3). Амфибол-карбонатные метасоматиты зоны 2 выделяются повышенным содержанием MgO. В зоне 3, содержащей вкрапленность пирита, заметно повышается концентрация Co, возрастает суммарное содержание железа, SiO₂ и, незначительно, Cu, Bi, U. Метасоматиты центральной части рудной зоны (зона 4) представлены карбонат-слюдисто-хлоритовыми сланцами, пронизанными более поздними кальцитовыми жилами с Pd-Au-U-Cu-Pb-Se-S минерализацией. Они содержат аномальные концентрации всех рудогенных и редких элементов.

В рудной зоне в целом значительно возрастают содержания окисленного железа (Fe₂O₃), Cr, V, Cu, Pb, Bi, Se, S, U, ΣREE (до 628 г/т) и особенно Y (до 392 г/т), а также благородных металлов, однако распределены они неравномерно.

Au-Pd-Cu-Pb-Se-U минерализация рудопроявления Светлое приурочена к зоне сброса Mg-Fe-компонентов (слюдисто-хлоритовая зона). Нерудная ассоциация зоны 4 представлена голубовато-зелёными и жёлто-зелёными минералами – хлоритами, Cr-V-содержащими слюдами, кальцитом, сложными минеральными смесями зоны окисления. Рудная минерализация формировалась вблизи поверхности при дефиците серы и сопровождалась привнесом селена, меди, свинца, урана и благородных металлов, отложением оксидов и гидроксидов железа. Рудная зона выделяется по геохимическому признаку – повышенным концентрациям Cr, V, U, ΣREE, Y, Se, Cu и благородных элементов (см. рис. 3; см. табл. 3), которые находят отражение в минеральном составе. Форма выделения ранних гидротермальных минералов (сульфидов и селенидов) прожилковая, вкрапленно-гнездовая, у поздних гипергенных ассоциаций, образующихся в приповерхностной зоне окисления, – натёчная, почковидная, в виде шариков и зональных обрастаний, веточек, игольчатая (у гётита) (рис. 4–6).

Сульфиды и селениды. Среди сульфидов наиболее распространёнными являются халькопирит и борнит Cu₅FeS₄ (Cu 59,74 %, Fe 10,27 %, S 10,27 %). Они образуются первыми, при окислении интенсивно замещаются халькозином, ковеллином, купритом. Реже встречается галенит и очень редко – акантит Ag₂S, иногда в сростании с самородным серебром. Состав сульфидов меди и свинца обыч-

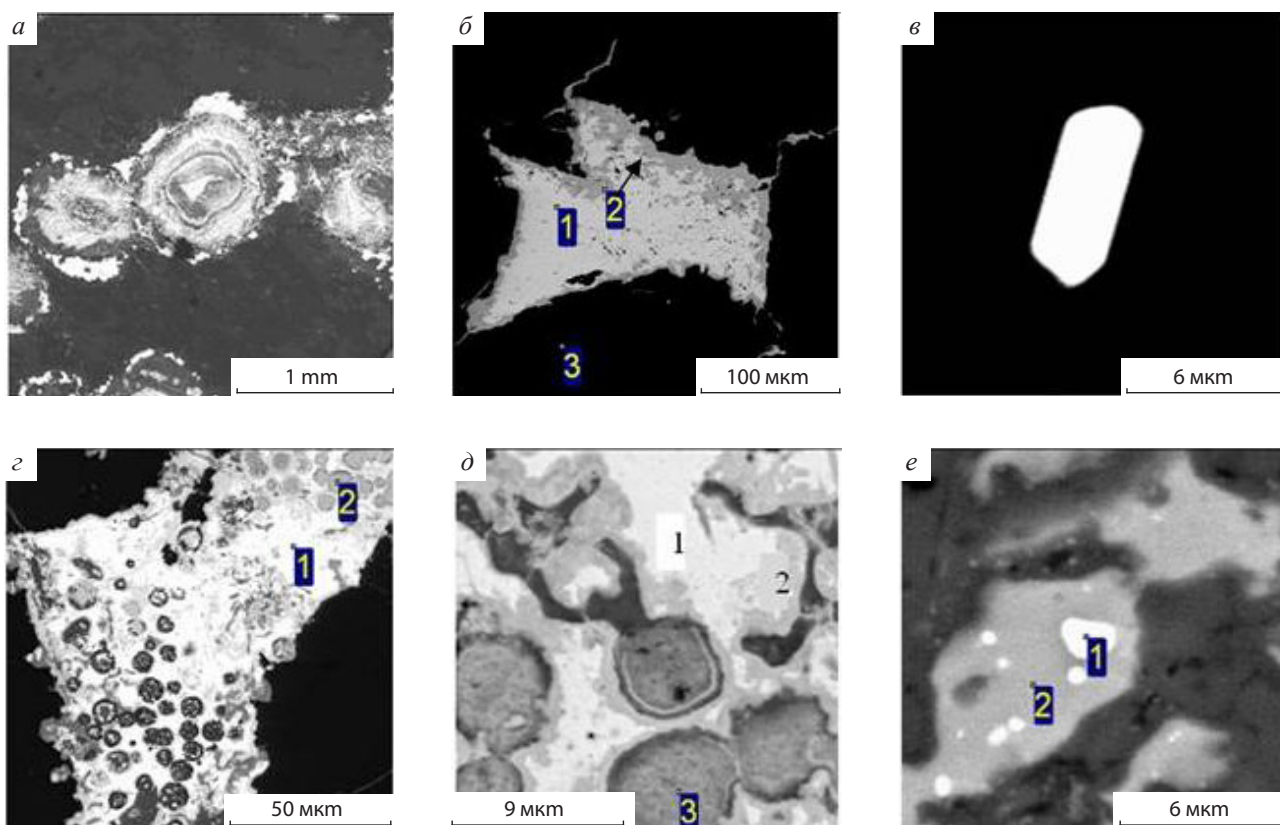


Рис. 4. СЕЛЕНИДЫ РУДОПРОЯВЛЕНИЯ СВЕТЛОЕ:

а – зональные почки клаусталита (белый), гематита (серый), уранинита (белый во внешней кайме); *б* – клаусталит (1) в кальците, в кайме – молибдоменит (2); *в* – гуанахуатит; *г* – клаусталит (1), в порах – сложная минеральная смесь (2); *д* – клаусталит (1) замещается молибдоменитом (2), серые овальные стяжения состоят из Y-Fe-Cu-Se-Pb-минеральной смеси (3); *е* – богдановичит (1) в ковеллине (2)

4. СЕЛЕНИДЫ И Se-СОДЕРЖАЩИЕ СУЛЬФИДЫ РУДОПРОЯВЛЕНИЯ СВЕТЛОЕ (масс. %)

	Ковеллин (с Se)		Ковеллин (с Ag, Se)	Клаусталит		Эвкайрит	Гуанахуатит	Богдановичит	Умангит	Тиманнит
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Образец	СВ9-4	лРСВ-9	лРСВ-9	СВ7а	СВ7а	СВ9-4	СВ-8/3	Лрsv-9	СВ	лРСВ9
S	29,67	33,04	29,01			4,09				
Cu	62,64	63,85	56,97			13,97			53,95	
Fe						4,07				
Se	7,17	3,11	4,07	29,98	29,76	33,13	33,66	20,80	46,05	25,82
Pb				70,02	70,24					
Ag			9,96			44,75		42,92		
Hg										74,18
Bi							66,34	36,28		
Σ	99,4	100	100,01	100	100	99,99	100	100	100	100

но стандартный. Халькозин и ковеллин Cu_2S_2 , образующиеся при окислении, содержат примеси селена (3–7 %) и серебра (10 %) (табл. 4).

При понижении температуры на стадии привноса Se отлагаются селениды. Они преобладают над сульфидами и обычно ассоциируют с халькозином и уранинитом. Наиболее распространённый среди них – клаусталит $PbSe$ (см. рис. 4). К более редким относятся низкотемпературные селениды Ag, Cu, Bi, Hg. Содержание Pb и Se пропорционально возрастает к центральной части рудной зоны.

Клаусталит встречается в прожилках, гнездах, выделяется в тонких просечках, секущих сульфиды меди (см. табл. 4). Он начинает отлагаться после халькопирита, продолжает совместно с уранинитом и образует концентрически зональные почковидные сростания с гематитом (см. рис. 4, а, б). При окислении замещается молибденомитом $PbSeO_3$ (см. рис. 4, в). Все остальные селениды – более редкие минералы (< 1 %), они представлены Fe-эвкайритом $Ag(Cu,Fe)Se$, науманнитом Ag_2Se , богдановичитом $AgBiSe_2$, умангитом Cu_3Se_2 , тиманнитом $HgSe$ (см. табл. 4). Эвкайрит ($T_{обр.} < 190$ °C) и науманнит ($T_{обр.} < 128$ °C) встречаются в сростаниях с борнитом, замещаются вторичными сульфидами меди (халькозином, ковеллином). При этом в халькозине и ковеллине избыточный селен выделяется в мельчайших включениях клаусталита (~1–2 мкм), реже науманнита и богдановичита (см. рис. 4, е; см. табл. 4); для последних из-за мелкого размера зёрен состав не всегда чётко рассчи-

тывается. В пирит-тремолит-кальцитовых метасоматитах зоны 3 установлен достаточно редкий селенид висмута – гуанахуатит Bi_2Se_3 , образующий мелкие, но хорошо огранённые кристаллы (см. табл. 4; см. рис. 4, в). В центре рудной зоны обнаружены микронные зёрна наиболее редких селенидов меди и ртути – умангита и тиманнита (см. табл. 4). Умангит ($T_{обр.} < 143$ °C) бывает окружён ореолом ковеллина. Тиманнит установлен в ассоциации с настураном и Y-фазами; минерал очень редкий.

Благороднометалльная минерализация. Золото (табл. 5; рис. 5) в рудной зоне встречается в двух генерациях: 1-я – в ассоциации с гидротермальными сульфидами и селенидами, 2-я – в виде тонкодисперсного гипергенного золота в зоне окисления, входящего в состав Au-Pd глобул. Содержание золота в рудной зоне неравномерное: от 0,1–0,86 (см. табл. 2) до 27 г/т по [13]. Самородное золото 1-й генерации имеет неправильную форму, размер до 10 x 40 мкм, выделяется в халькопирите и сохраняется в куприте, образующемся при окислении халькопирита (см. рис. 5, а). Золото входит в состав редких интерметаллидов Au-Pd-Cu-фаз – порпецита (Au,Pd) и купроаурида палладия $(Cu,Pd)_3Au_2$ (табл. 6; см. рис. 5, б). Иногда в ассоциации с халькопиритом встречается самородный висмут (100 % Bi), который при окислении замещается оксидом висмута – бисмитом (Bi_2O_3).

Гипергенное золото 2-й генерации образует глобулы – овальные выделения и шарики неоднородного состава (см. рис. 5, г–е). Размер глобул от

5. СОСТАВ ЗОЛОТА РУДОПРОЯВЛЕНИЯ СВЕТЛОЕ (масс. %)

Образец	Золото 1-й генерации		Золото 2-й генерации (центральная зона 4)										
	RSV-9aL		RSV-9L			RSV-9aL			RSV-9L				PCB-9к
	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	13	14	15
Ag	12,06	11,78	8,61	8,52	12,74	9,13	8,80	8,90	7,21	9,3	8,65	7,43	5,63
Au	87,94	88,22	91,39	91,48	87,26	90,87	91,20	91,10	92,79	90,7	91,35	92,57	94,37
Σ	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

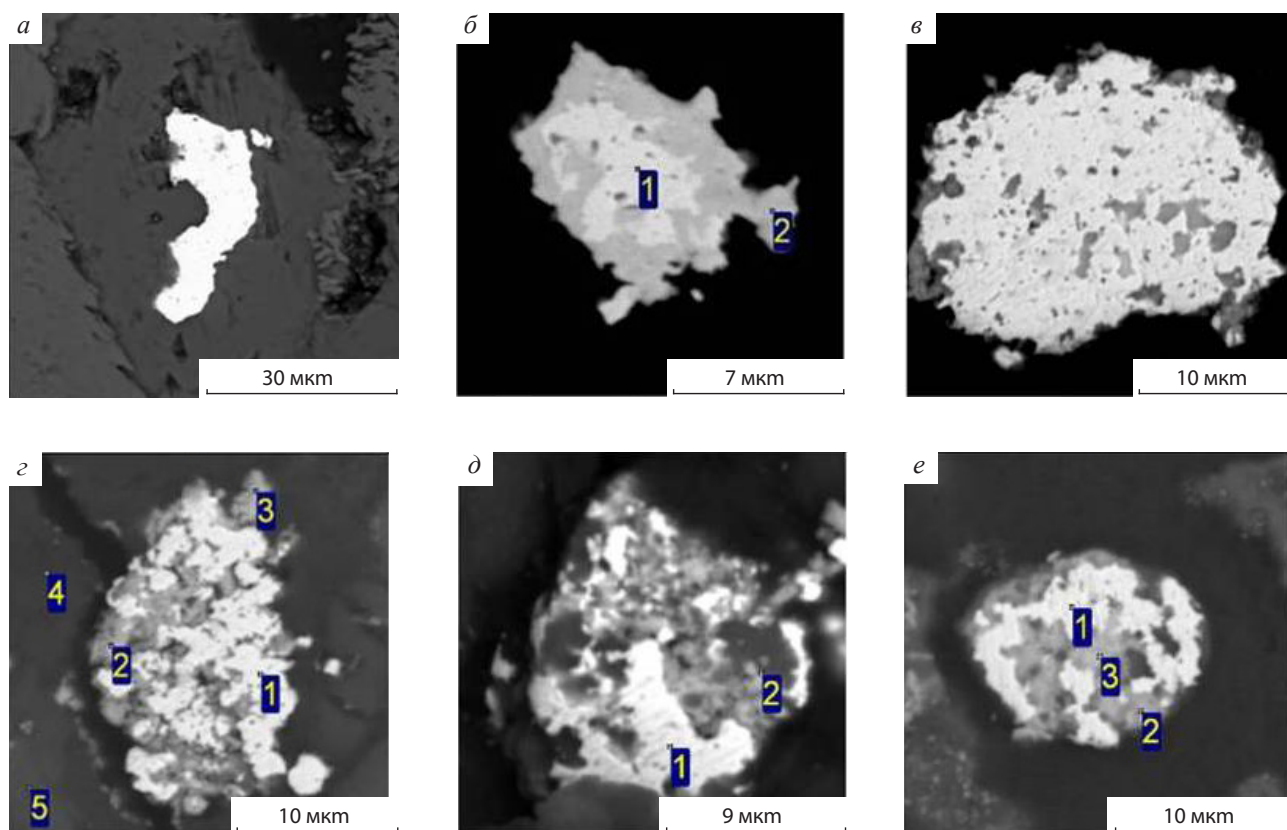


Рис. 5. ЗОЛОТО И МИНЕРАЛЫ ПАЛЛАДИЯ РУДОПРОЯВЛЕНИЯ СВЕТЛОЕ:

а – самородное золото 1-й генерации в куприте по халькопириту; *б* – порпецит (1) обрастает палладиевым купроауридом (2); *в* – глобулярное срастание золота 2-й генерации (белое) и Pd-фаз (серое); *г* – глобулярное срастание золота (1) и палладсеида (2, 3) в хромселадоните (4, 5); *д* – золото (1) в срастании с палладсеидом (2); *е* – золото (1), палладсеид (2), мертиит (3)

6. МИНЕРАЛЫ ПАЛЛАДИЯ РУДОПРОЯВЛЕНИЯ СВЕТЛОЕ (масс. %)

	Порпецит	Купроаурид палладия	Палладсеит Cu-Au-содержащий			Палладсеит Pd ₁₇ Se ₁₅			Арсенопалладинит с Au	Au-содержащий мертиит		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Образец	PCB-9I-1	PCB-9I-2	Lav19 17-2	PCB-9-3	PCB-9-9	Lav19 17-3	PCB-9-15	PCB-9-16	PCB-9-3	PCB-9-5	PCB-9-4	RSV9a-8
Se			28,91	27,61	28,64	37,11	39,42	35,78				
As									14,68	4,57	3,24	4,76
Sb										18,0	16,77	20,72
Pd	10,02	10,24	57,60	62,07	62,61	60,97	58,32	64,22	80,68	63,88	55,96	63,07
Au	88,17	67,46	13,49	7,12		1,92	2,26		5,13	11,63	24,04	11,45
Cu	1,82	22,29		3,2	8,75					1,91		
Σ	100,01	99,99	99,99	100	100	100	100	100	99,99	99,99	100	100

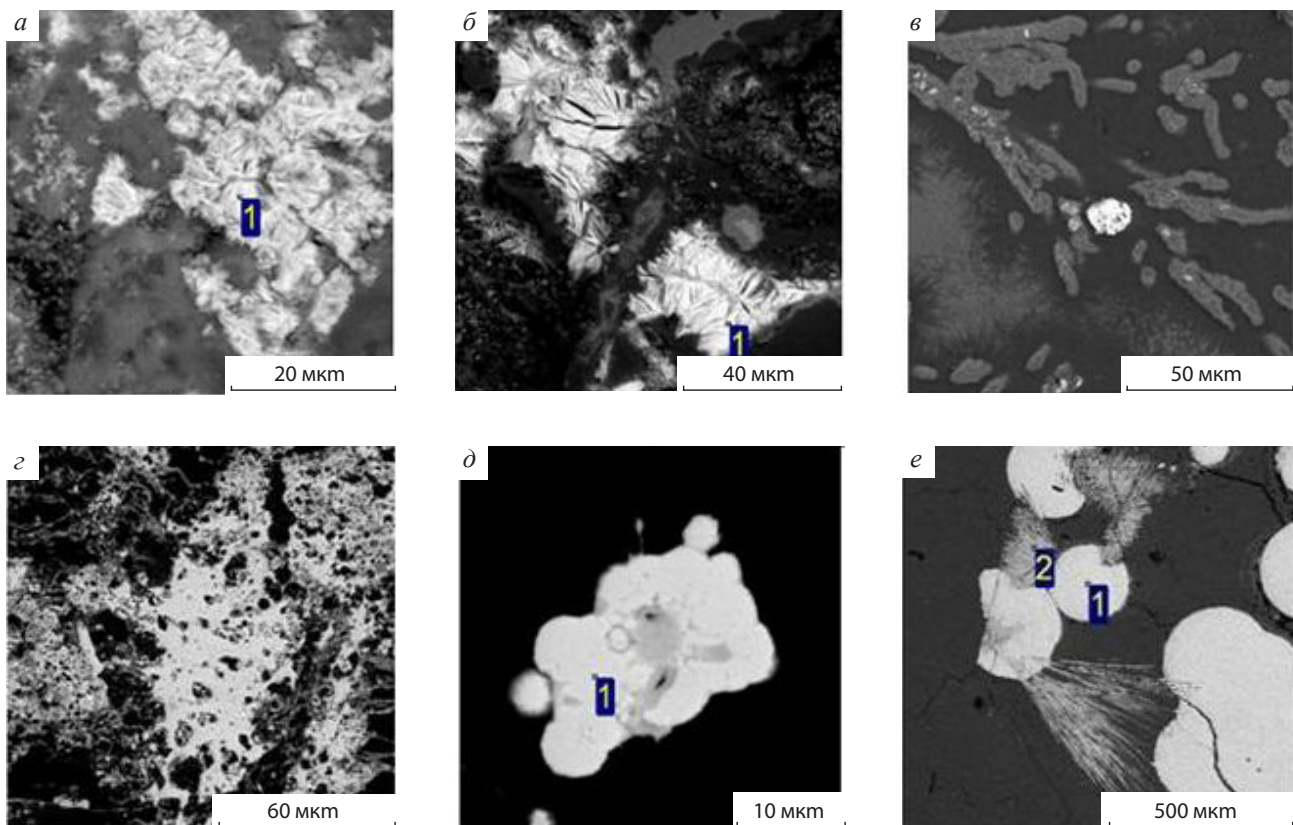


Рис. 6. ФОРМЫ ВЫДЕЛЕНИЯ УРАНОВЫХ МИНЕРАЛОВ, Cr-V-СЛЮД И МИНЕРАЛОВ ЖЕЛЕЗА ЗОНЫ ОКИСЛЕНИЯ РУДОПРОЯВЛЕНИЯ СВЕТЛОЕ:

a, б – карнотит (1); *в* – веточки гематита с карнотитом (белые точки) в сростании с Au-Pd-глобулой в хромовой слюде; *г* – уранинит; *д* – глобулы настурана (1); *е* – гематит (зональные почки) и гётит (игольчатые кристаллы) в кальците

5–6 до 25–30 мкм, размер мельчайших частичек, входящих в них, бывает менее 6–1 мкм. Глобулы находятся в сростании с карнотитом, V-Cr-слюдами и кальцитом. В глобулах золото ассоциирует с селенидами и арсеноантимонидами палладия. Золото обеих генераций высокопробное, содержит 2,6–13 % Ag (см. табл. 5).

Из минералов группы платины в шариках преобладают тонкодисперсные селениды, реже встречаются арсениды и антимониды палладия. Они представлены преимущественно палладсеитом Pd₁₇Se₁₅ и менее распространёнными арсенопалладинитом Pd₅As₂ и мертиитом (Pd,Au)₅(Sb,As) (см. рис. 5, см. табл. 6). В составе этих минералов, особенно палладсеита и мертиита, установлено повышенное содержание Au и Cu, возможно из-за тонкого прораствания палладиевых минералов с золотом. Все минеральные фазы повышают концентрации благородных металлов в рудах и дают возможность

отнести рудный объект к Au-Pd-содержащему проявлению.

Fe-Cr-V-U-минералы. В геохимическом составе метасоматитов из центральной рудной зоны 4 фиксируется повышенное содержание V (до 878 г/т) и Cr (до 1796 г/т), что выше в 3 и 60 раз соответственно, чем в габбродолеритах силла, содержащих титаномагнетит (см. табл. 2, 3). Хром входит в хлорит и пластинчатые Cr-V-слюды, которые ассоциируют с кальцитом и сростаются с Au-Pd глобулами (см. ниже) (рис. 6). Ванадий накапливается в разных минералах: в гематите и гидроксидах железа (до 1,5 %), в ванадатах. В сростании с хромовой слюдой (хромсладонитом) установлен карнотит K₂(UO₂)₂[V₂O₈]·3H₂O зеленовато-жёлтого цвета. Он образует чешуйчатые кристаллы (см. рис. 6, *a, б*) в сростании с гематитом и Au-Pd-глобулами (см. рис. 6, *в*). Не всегда чётко определяемый однородный состав и примесь Ca (до 5,98–5,19 %) позволя-

ют предполагать возможность образования минеральной смеси с тюямунитом $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2[\text{V}_2\text{O}_8] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$.

Уранинит встречается в неправильных обособлениях, реже кристаллах, настуран – в форме почечек, шариков и неправильных стяжений в центре рудной зоны (см. рис. 6). Иногда выделяется в концентрически-зональных сростаниях совместно с клаусталитом и гематитом. Настуран содержит до 7,56–13,77 % Pb, иногда незначительное количество Ca, по составу близок к $(\text{U,Pb})_3\text{O}_8$. Кроме того, как было отмечено выше, уран входит в ванадаты – карнотит и тюямунит. В промежуточной зоне 3 установлены мелкие и редкие зёрна аксессуарного торита, коффинита $(\text{U,Th,Fe})[\text{SiO}_4]$ и браннерита $(\text{U,Pb,Ca,Ce})(\text{Ti,Fe})_2\text{O}_6$. Торит $(\text{Th,U,Pb,Ca})[\text{SiO}_4]$ встречен в окисленной кайме пирита. Он содержит до 7,0 % U и примеси Pb, Ca. Единичные зёрна коффинита и браннерита обнаружены в кальците.

Содержание Y в рудах проявления Светлое достигает 204–392 г/т, ΣREE 422–628 г/т. Повышенные концентрации связаны с присутствием Ca-Y-REE-карбонатов, Y-содержащего уранинита (2,49–3,19 %), а также тонкодисперсных и сложно диагностируемых минеральных смесей, возможно, таких фаз, как Y-паризит, Y-камафугит.

Железо, высвобождённое при изменении основных пород и доломитов в зоне окисления, входит в гематит и гётит. Гидроксиды железа оседают в рыхлой пористой приповерхностной зоне, выпадают по спайности в кальците, окрашивая его в бордовый цвет. Гематит и гидроксиды железа образуют своеобразные сростания: гематит – пористые замещения, кружевные зональные почки, шарики, веточки, гётит – игольчатые кристаллы и их радиально-лучистые сростания (см. рис. 6, e). Гематит содержит до 1,64 % V. В зоне окисления сульфиды замещаются халькозином, ковеллином, купритом; селениды замещаются селенатами. По клаусталиту при окислении образуется молибдомениит. В сростании с ним встречаются сложные соединения типа моттрамита селенсодержащего $\text{PbCu}(\text{V,SeO})_4(\text{OH})$, реже – церуссит, барит, гипс. Пористые отверстия в минералах заполняются Y-содержащими фазами или настураном.

Состав всех минералов определяет аномальный геохимический спектр руд проявления Светлое.

Изучение рудопроявления Светлое показало, что Au-Pd-Cu-S-Se-U-оруденение приурочено к зоне метасоматитов, сформировавшихся вблизи контакта изменённых основных и карбонатных пород

ятулийского надгоризонта, и контролируется северо-западной тектонической зоной и осевой плоскостью антиклинальной складки, осложнённой дополнительными смещениями. По локализации и геохимической специализации оруденения в зоне СРД и щёлочно-железомагнезиального метасоматоза рудопроявление подобно известным комплексным месторождениям падминского типа Онежской структуры, рудопроявлениям Салла-Пана-Куоляярвинской структуры и месторождениям Лапландского зеленокаменного пояса. Для рудопроявления Светлое установлено, что метасоматические изменения происходили в условиях повышенной щёлочности растворов, сопровождались альбитизацией и эпидотизацией основных пород, формированием жильных альбититов, сопряжённым сбросом Fe-Mg-компонентов и привнесом рудогенных элементов. Изменения в зонах рассланцевания на контакте разнородных пород проявились в формировании амфибол-карбонатных и хлоритовых зон на ранней стадии, затем в отложении Сг-слюд и кальцитовых жил во внутренней зоне метасоматической колонки. Как и на месторождениях Лапландского зеленокаменного пояса, изменения пород происходили в условиях повышенной NaCl-солёности [16, 21] из-за участия высокосолёных растворов палеопротерозойских бассейнов.

Метасоматиты рудопроявления Светлое зональные, развиваются они преимущественно по карбонатным толщам. В выделяемых метасоматических зонах наблюдается изменение набора петрогенных компонентов и микроэлементов. К центральной зоне колонки приурочено сопряжённое Au-Pd-Pb-Cu-S-Se-U-оруденение. Рудная минерализация представлена в основном сульфидами Cu и селенидами Cu и Pb (клаусталитом и более редкими). Ранние сульфиды (халькопирит и борнит) замещаются селенидами, затем минералами зоны окисления. благороднометалльная минерализация представлена Au-Pd-минералами двух генераций (гидротермальной и гипергенной). Гидротермальное золото встречается как самородное, так и в сростаниях с порпечитом и купроауридом палладия. Гипергенное золото образует мелкие глобулярные сростания совместно с палладсеитом, реже – арсенопалладинитом и мертиитом. При увеличении окислительного потенциала в рудах формируются Сг-V-слюды, минералы урана (уранинит, карнотит, тюямунит, Y-фазы, реже встречаются коффинит, браннерит). Широко развиты

гематит, образующий сетчатые и ажурные выделения, и игольчатый гётит. По первичным сульфидам и селенидам в зоне окисления развиваются селенаты, халькозин, куприт. Оруденение и характер метасоматических преобразований рудопрооявления Светлое и месторождений падминского типа похожи, но для первого являются более близкповерхностными и преобразованными в зоне окисления. Большинство из этих редких селенидов, самородных элементов и интерметаллидов были обнаружены при изучении руд авторами впервые и лишь некоторые отмечались ранее. Геохимический профиль оруденения определяется ведущими элементами: Cu, Pb, S, Se, U, Au, Pd, V, Cr, Fe, Bi, Y, REE.

Радиологическое датирование метаморфического преобразования интрузивных пород и образования более поздних щелочных и железомagneзиальных околорудных метасоматитов, проведённое для участков Светлое, Медные Горы Кумсинской и Воронов Бор Пергубской структур, позволило установить время их формирования от 1,76 до 1,45 млрд лет. Наиболее интенсивные метаморфические преобразования происходили около 1,76 млрд лет назад (определены по сфену, породе и полевым шпатам), а образование эйситов и ассоциаций рудных жил происходило ~1,5–1,46 млрд лет назад. Временная оценка свекофенских процессов и щелочного метасоматоза в сравнении с данными финских геологов для Лапландского зеленокаменного пояса [20, 22, 27] отчётливо показывает, что свекофенские метаморфогенно-метасоматические изменения, происходившие ~1,78–1,76 млрд лет назад в Кумсинской структуре центральной Карелии, близки по времени формирования орогеническим процессам в палеопротерозойских толщах северной Финляндии (~1,78 млрд лет). К этому же времени финские геологи относят процесс отложения Au-Cu-S- и Au-U-оруденения. По существующим данным [3], щелочной метасоматоз и отложение нетипичных рудных ассоциаций на рудопрооявлениях Кумсинской структуры ближе по времени формирования к раннерифейским процессам северного Приладожья. Это подтверждается и для Онежской струк-

туры, для которой по цирконам из габбро и молибдениту из метасоматитов с вкрапленной минерализацией установлен близкий возраст [10, 17].

Таким образом, по минералого-геохимическим особенностям низкотемпературных щелочных и сопутствующих им железомagneзиальных метасоматитов и связанного с ними оруденения, а также преобладающим датировкам околорудных процессов, формирование этого оруденения и околорудных изменений относится к раннерифейскому времени (1,5–1,45 млрд лет), что сопоставимо с подобным типом оруденения и преобразованиями Au-Cu-TR-U-Fe месторождений в протерозойских отложениях Австралии [23, 29, 30].

Минерализацию рудопрооявления Светлое можно отнести к типу руд 5–7-элементных формаций. Ведущие элементы – Cu, Pb, Au, Pd, Se, U; наблюдаются повышенные концентрации Y, V, Cr, Σ REE, Bi, Co. Аналогичные повышенные концентрации благородных металлов (Au и Pd) известны на месторождениях падминской группы (в северо-западных шир-зонах Онежской структуры) и связываются с интенсивными преобразованиями габбродолеритов (PR₁/d). Установленная благороднометалльная минерализация уникальна. Она представлена ранней гидротермальной ассоциацией золота, порпечита и купроаурида палладия и поздней гипергенной – тонкодисперсными глобулярными сростаниями золота, палладсеида, арсенопалладинита и мертиита. Интенсивный щелочной метасоматоз и высокий окислительный потенциал, наиболее интенсивно проявившийся в конце процесса в связи с малой глубиной формирования и близостью к поверхности, сопровождались отложением уранинита, минералов урана, образующихся в зоне окисления, REE и гематит-гётитовыми сростаниями, определившими основные перспективы рудопрооявления как уранового. По систематике, принятой для месторождений северной Финляндии, рудопрооявление Светлое относится к орогенической группе месторождений с атипичной металлогенией.

Работа выполнена по госбюджетной теме НИР Института геологии КарНЦ РАН, № ГР № АААА-А18-118020290084-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьева Е. Н., Миронов Ю. Б. Комплексное золото-урановое оруденение восточной части Балтийского щита // Золото Фенноскандинавского щита. Материалы Международной конференции. – Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2013. – С. 9–12.
2. Билибина Т. В., Мельников Е. К., Савицкий А. В. О новом типе месторождений комплексных руд в Южной Карелии // Геология рудных месторождений. – 1991. – № 6. – С. 3–14.
3. Глебовицкий В. А., Бушмин С. А., Беляцкий Б. В., Богомолов Е. С., Бороздин А. П., Савва Е. В., Лебедева Ю. М.

- Rb-Sr возраст метасоматоза и рудообразования в низкотемпературных зонах сдвиговых деформаций Фенно-Карельского кратона, Балтийский щит // Петрология. – 2014. – Т. 22, № 2. – С. 208–232.
4. Калинин А. А. Золото в метаморфических комплексах северо-восточной части Фенноскандинавского щита. – Апатиты : Кольский научный центр РАН, 2018. – 250 с.
 5. Калинин А. А., Савченко Е. А., Селиванова Е. А. Минерализация Se и Te в альбититах и перспективы золотоносности метасоматитов Салла-Куолаярвинской зоны, Северная Карелия // Доклады академии наук. – 2012. – Т. 455. – С. 58–61.
 6. Калинин А. А. Золотоносная молибден-урановая минерализация Салла-Пана-Куолаярвинской зоны // Геология и стратегические полезные ископаемые Кольского региона. Труды IX Всероссийской (с международным участием) Ферсмановской научной сессии, посвящённой 60-летию Геологического института КНЦ РАН (Апатиты, 2–3 апреля, 2012 г.). – Апатиты. – 2012. – С. 142–147.
 7. Колядина Н. И. Урановая минерализация в эйситах рудопроявлений Лагерное и Озёрное (Северная Карелия) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. – 2017. – Т. 40, № 1. – С. 83–96.
 8. Кулешевич Л. В., Голубев А. И. Благородные металлы в щелочных метасоматитах Средней Падмы, Карелия // Руды и металлы. – 2012. – № 1. – С. 17–25.
 9. Кулешевич Л. В., Лавров О. Б., Дмитриева А. В. Геологическое строение и Cu-Pb-Au-Pd-Se-U минерализация Кумсинской структуры // Геология и полезные ископаемые Карелии. – Петрозаводск. – 2011. – № 14. – С. 127–145.
 10. Кулешевич Л. В., Филиппов М. М., Гольцин Н. А., Крымский Р. Ш., Лохов К. И. Метасоматиты по шунгитоносным породам Максовского месторождения (Онежская структура, Карелия) // Литология и полезные ископаемые. – 2019. – С. 149–164. – DOI 10.31857/S0024-497X20192149-164.
 11. Леденева Н. В., Пакульнис Г. В. Минералогия и условия образования уран-ванадиевых месторождений Онежской впадины (Россия) // Геология рудных месторождений. – 1997. – Т. 39, № 3. – С. 258–268.
 12. Мельников Е. К., Шумилин М. В. О возможной модели образования уран-ванадиевых месторождений с благородными металлами в Онежском районе (Карелия) // Известия вузов. Геология и разведка. – 1995. – № 6. – С. 31–37.
 13. Металлогения Карелии / Под ред. Рыбакова С. И. – Петрозаводск : КарНЦ РАН, 1999. – 340 с.
 14. Полеховский Ю. С., Петров С. В., Калинин А. А., Коваль А. В. Новые данные о минералогии золото-уранового рудопроявления Ромпас, Финляндия // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2019. – № 16. – С. 482–486.
 15. Соловьёв С. Г. Железоокисдно-золото-медные и родственные месторождения. – М. : Научный мир, 2011. – 469 с.
 16. Barton M. D., Johnson D. A. Evaporitic-source model for igneous-related Fe oxide-(REE-Cu-Au-U) mineralization // Geology. – 1996. – № 24. – pp. 259–262. – URL: https://www.geo.arizona.edu/~mdbarton/MDB_papers_pdf/Barton96_IOCG_GEOL.pdf
 17. Goltsin N. A., Saltykova A. K., Polekhovskiy Yu. S., Presnyakov S. L., Prasolov E. M., Prilepsky E. B., Lokhov K. I. Zirconium from high carbon paleoproterozoic sediments (shungites) of the Onega structure (Central Karelia, NW Russia) // 4-th International Shrimp Workshop. Abstract Volume. – Saint-Petersburg : VSEGEI Press, 2008. – pp. 50–53.
 18. Eilu P. FINGOLD – a public database on gold deposits in Finland // Geological Survey of Finland Report of Investigation. – 1999. – № 146. – 224 p.
 19. Eilu P., Niiranen T. Iron oxide-copper-gold deposits in Finland // Global Sourcing Finland (Espoo, Finland, 20.12.2002). – URL: http://en.gtk.fi/export/sites/en/informationsservices/commodities/images/iocg_in_finland.pdf
 20. Eilu P., Pankka H., Keinänen V., Kortelainen V., Niiranen T., Pulkkinen E. Characteristics of gold mineralization in the greenstone belts of northern Finland // Geological Survey of Finland. – 2007. – Spec. Paper 44. – pp. 57–106.
 21. Frietsch R., Frietsch R., Tuisku P., Martinsson O. Early Proterozoic Cu-(Au) and Fe ore deposits associated with regional Na-Cl metasomatism in northern Fennoscandia // Ore Geology Reviews. – 1997. – V. 12. – pp. 1–34.
 22. Hitzman M. W., Oreskes N., Einaudi M. T. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron-oxide (Cu-U-Au-REE) deposits // Precambrian Research. – 1992. – V. 58. – pp. 241–287.
 23. Johnson J. P., Cross K. C. U-Pb geochronological constraints on genesis of the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit, South Australia // Economic Geology. – 1995. – V. 90. – pp. 1046–1063.
 24. Niiranen T., Eilu P. (ed.) Iron oxide-copper-gold excursion and workshop to Northern Finland and Sweden (Excursion locality 2 Hannukainen, Finland, 31.5.–4.6, 2004) // Geological Survey of Finland. Report M10.3/2004/1/10. – pp. 42–57.
 25. Niiranen T. Iron Oxide-Copper-Gold Deposits in Finland: case studies from the Peräpohja schist belt and the Central Lapland greenstone belt. Academic dissertation //

- University of Helsinki. – Helsinki : Department of Geology. – 2005. – 27 p.
26. Ojala V. Juhani (ed.) Gold in the Central Lapland Greenstone Belt // Geological Survey of Finland. – Espoo, 2007. – Spec. Paper 44. – 267 p.
 27. Patison N. L. Structural Controls on Gold Mineralisation in the Central Lapland Greenstone Belt // Geological Survey of Finland. – 2007. – Spec. Paper 44. – pp. 107–124.
 28. Patison N. L., Salmis G., Kortelainen V. J., V. Juhani Ojala (ed.) The Suurikuusikko gold deposit: project development summary of northern Europe's largest gold resource gold in the Central Lapland Greenstone Belt, Finland // Geological Survey of Finland. – 2007. – Spec. Paper 44. – pp. 125–134.
 29. Reynolds L. J., In Porter T.M. (ed.) Geology of the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag-REE Deposit // Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective. – Adelaide : PGC Publishing, 2000. – pp. 93–104.
 30. Roberts D. E., Hudson G. R. T. The Olympic Dam copper-uranium-gold deposit, Roxby Downs, South Australia // Economic Geology. – 1983. – V. 78, № 5. – pp. 799–822.
 31. Vanhanen E. Geology, mineralogy and geochemistry of the Fe-Co-Au-(U) deposits in the Paleoproterozoic Kuusamo Schist Belt, northeastern Finland // Geological Survey of Finland. Bulletin 399. – 2001. – 229 p.
 32. Vanhanen E., Cook N. D. J., Hudson M. R., Dahlenborg L., Ranta J. P., Havela T., Kinnunen J., Molnár F., Prave A. R., Oliver N. H. S. The Rompas Prospect, Peräpohja Schist Belt, Northern Finland // Mineral Deposits of Finland. – 2015. – Chapter 5. 4. – pp. 467–484.
 33. Wyche N. L., Eilu P., Koppström K., Kortelainen V. J., Niiranen T., Välimaa J. The Suurikuusikko Gold Deposit (Kittilä Mine), Northern Finland // Mineral Deposits of Finland. – 2015. – Chapter 5. – pp. 411–433. – DOI: 10.1016/B978-0-12-410438-9.00016-9.

REFERENCES

1. Afanas'eva E. N., Mironov Yu. B. Kompleksnoe zoloto-uranovoe orudnenie vostochnoi chasti Baltiiskogo shchita [Complex gold-uranium mineralization of the eastern part of the Baltic Shield], *Zoloto Fennoskandinavskogo shchita. Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii [Gold of the Fennoscandinavian shield. Materials of the International Conference]*, Petrozavodsk, Karelskii nauchnyi tsentr RAN Publ., 2013, pp. 9–12.
2. Bilibina T. V., Mel'nikov E. K., Savitskii A. V. O novom tipe mestorozhdenii kompleksnykh rud v Yuzhnoi Karelii [About a new type of complex ore deposits in South Karelia], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii [Geology of Ore Deposits]*, 1991, No 6, pp. 3–14. (In Russ.).
3. Glebovitskii V. A., Bushmin S. A., Belyatskii B. V., Bogomolov E. S., Borozdin A. P., Savva E. V., Lebedeva Yu. M. Rb-Sr vozrast metasomatoza i rudoobrazovaniya v nizkotemperaturnykh zonakh sdvigovykh deformatsii Fenno-Karel'skogo kratona, Baltiiskii shchit [Rb-Sr age of metasomatism and ore formation in low-temperature zones of shear deformations of the Fenno-Karelian craton, Baltic Shield], *Petrologiya [Petrology]*, 2014, V. 22, No 2, pp. 208–232. (In Russ.).
4. Kalinin A. A. Zoloto v metamorficheskikh kompleksakh severo-vostochnoi chasti Fennoskandinavskogo shchita [Gold in metamorphic complexes of the northeastern part of the Fennoscandinavian shield], Apatity, Kol'skii nauchnyi tsentr RAN Publ., 2018, 250 p.
5. Kalinin A. A., Savchenko E. A., Selivanova E. A. Mineralizatsiya Se i Te v al'bitakh i perspektivy zolotonosnosti metasomatitov Salla-Kuolayarvinskoi zony, Severnaya Kareliya [Mineralization of Se and Te in Albitites and Prospects for Gold Metasomatites in the Salla-Kuolajarvinsky Zone, North Karelia], *Doklady akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*, 2012, V. 455, pp. 58–61. (In Russ.).
6. Kalinin A. A. Zolotonosnaya molibden-uranovaya mineralizatsiya Salla-Pana-Kuolayarvinskoi zony [Gold-bearing molybdenum-uranium mineralization of the Salla-Pan-Kuolajarvinsky zone], *Geologiya i strategicheskie poleznye iskopaemye Kol'skogo regiona. Trudy IX Vserossiiskoi (s mezhdunarodnym uchastiem) Fersmanovskoi nauchnoi sessii, posvyashchennoi 60-letiyu Geologicheskogo instituta KNTs RAN (Apatity, 2–3 aprelya, 2012 g.) [Geology and strategic minerals of the Kola region. Proceedings of the IX All-Russian (with international participation) Fersman scientific session dedicated to the 60th anniversary of the Geological Institute of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences (Apatity, April 2–3, 2012)]*, Apatity, 2012, pp. 142–147.
7. Kolyadina N. I. Uranovaya mineralizatsiya v eisitakh rudoproyavlenii Lagernoe i Ozernoe (Severnaya Kareliya) [Uranium mineralization in sites of ore occurrences Lagernoye and Ozernoye (North Karelia)], *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle RAEN. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh [Bulletin of the Siberian Branch of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, exploration and development of mineral deposits]*, 2017, V. 40, No 1, pp. 83–96. (In Russ.).
8. Kuleshevich L. V., Golubev A. I. Blagorodnye metally v shchelochnykh metasomatitakh Srednei Padmy, Kareliya [Noble metals in alkaline metasomatites of Mid-

- dle Padma, Karelia), *Rudy i metally [Ores and Metals]*, 2012, No 1, pp. 17–25. (In Russ.).
9. Kuleshevich L. V., Lavrov O. B., Dmitrieva A. V. Geologicheskoe stroenie i Su-Pb-Au-Pd-Se-U mineralizatsiya Kumsinskoi struktury [Geological structure and Cu-Pb-Au-Pd-Se-U mineralization of the Kumsinsky structure], *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii [Geology and Useful Minerals of Karelia]*, Petrozavodsk, 2011, No 14, pp. 127–145. (In Russ.).
 10. Kuleshevich L. V., Filippov M. M., Gol'tsin N. A., Krymskii R. Sh., Lokhov K. I. Metasomatity po shungitonosnym porodam Maksovskogo mestorozhdeniya (Onezhskaya struktura, Kareliya) [Metasomatites from schungite-bearing rocks of the Makovsky deposit (Onega structure, Karelia)], *Litologiya i poleznye iskopaemye [Lithology and Mineral Resources]*, 2019, pp. 149–164, DOI 10.31857/S0024-497X20192149-164.
 11. Ledeneva N. V., Pakul'nis G. V. Mineralogiya i usloviya obrazovaniya uran-vanadievyykh mestorozhdenii Onezhskoi vpadiny (Rossiya) [Mineralogy and conditions for the formation of uranium-vanadium deposits of the Onega Depression (Russia)], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii [Geology of Ore Deposits]*, 1997, V. 39, No 3, pp. 258–268. (In Russ.).
 12. Mel'nikov E. K., Shumilin M. V. O vozmozhnoi modeli obrazovaniya uran-vanadievyykh mestorozhdenii s blagorodnymi metallami v Onezhskom raione (Kareliya) [On a possible model for the formation of uranium-vanadium deposits with precious metals in the Onega region (Karelia)], *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration]*, 1995, No 6, pp. 31–37. (In Russ.).
 13. Metallogeniya Karelii [Geology of Karelia], Pod red. Rybakova S. I., Petrozavodsk, KarNTs RAN Publ., 1999, 340 p.
 14. Polekhovskii Yu. S., Petrov S. V., Kalinin A. A., Koval' A. V. Novye dannye o mineralogii zoloto-uranovogo rudoproyavleniya Rompas, Finlyandiya [New data on the mineralogy of gold-uranium ore occurrence Rompas, Finland], *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTs RAN [Proceedings of the Fersman Scientific Session of the Kola Scientific Center]*, 2019, No 16, pp. 482–486. (In Russ.).
 15. Solov'ev S. G. Zhelezooksidno-zoloto-mednye i rodstvennye mestorozhdeniya [Iron oxide-gold-copper and related deposits], Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2011, 469 p.
 16. Barton M. D., Johnson D. A. Evaporitic-source model for igneous-related Fe oxide-(REE-Cu-Au-U) mineralization, *Geology*, 1996, No 24, pp. 259–262, URL: https://www.geo.arizona.edu/~mdbarton/MDB_papers_pdf/Barton96_IOCG_GEOL.pdf
 17. Gol'tsin N. A., Saltykova A. K., Polekhovskiy Yu. S., Prasolov S. L., Prasolov E. M., Prilepsky E. B., Lokhov K. I. Zircons from high carbon paleoproterozoic sediments (shungites) of the Onega structure (Central Karelia, NW Russia), 4-th International Shrimp Workshop. Abstract Volume, Saint-Petersburg, VSEGEI Press, 2008, pp. 50–53.
 18. Eilu P. FINGOLD – a public database on gold deposits in Finland, Geological Survey of Finland Report of Investigation, 1999, No 146, 224 p.
 19. Eilu P., Niiranen T. Iron oxide-copper-gold deposits in Finland, Global Sourcing Finland (Espoo, Finland, 2012. 2002), URL: http://en.gtk.fi/export/sites/en/information-services/commodities/images/iocg_in_finland.pdf
 20. Eilu P., Pankka H., Keinänen V., Kortelainen V., Niiranen T., Pulkkinen E. Characteristics of gold mineralization in the greenstone belts of northern Finland, Geological Survey of Finland, 2007, Spec. Paper 44, pp. 57–106.
 21. Frietsch R., Frietsch R., Tuisku P., Martinsson O. Early Proterozoic Cu-(Au) and Fe ore deposits associated with regional Na-Cl metasomatism in northern Fennoscandia, *Ore Geology Reviews*, 1997, V. 12, pp. 1–34.
 22. Hitzman M. W., Oreskes N., Einaudi M. T. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron-oxide (Cu-U-Au-REE) deposits, *Precambrian Research*, 1992, V. 58, pp. 241–287.
 23. Johnson J. P., Cross K. C. U-Pb geochronological constraints on genesis of the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit, South Australia, *Economic Geology*, 1995, V. 90, PP. 1046–1063.
 24. Niiranen T., Eilu, P. (ed.) Iron oxide-copper-gold excursion and workshop to Northern Finland and Sweden (Excursion locality 2 Hannukainen, Finland, 31.5.–4.6, 2004), Geological Survey of Finland. Report M10.3/2004/1/10, PP. 42–57.
 25. Niiranen T. Iron Oxide-Copper-Gold Deposits in Finland: case studies from the Peräpohja schist belt and the Central Lapland greenstone belt. Academic dissertation, University of Helsinki, Helsinki, Department of Geology, 2005, 27 p.
 26. Ojala V. Juhani (ed.) Gold in the Central Lapland Greenstone Belt, Geological Survey of Finland, Espoo, 2007, Spec. Paper 44, 267 p.
 27. Patison N. L. Structural Controls on Gold Mineralisation in the Central Lapland Greenstone Belt, Geological Survey of Finland, 2007, Spec. Paper 44, pp. 107–124.
 28. Patison N. L., Salamis G., Kortelainen V. J., V. Juhani Ojala (ed.) The Suurikuusikko gold deposit: project development summary of northern Europe's largest gold resource gold in the Central Lapland Greenstone Belt, Finland, Geological Survey of Finland, 2007, Spec. Paper 44, pp. 125–134.
 29. Reynolds L. J., In Porter T.M. (Ed.) Geology of the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag-REE Deposit, Hydrothermal Iron

- Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective, 2000, V. 1. PGC Publishing, Adelaide. pp. 93–104.
30. Roberts D. E., Hudson G. R. T. The Olympic Dam copper-uranium-gold deposit, Roxby Downs, South Australia, *Economic Geology*, 1983, V. 78, № 5, pp. 799–822.
 31. Vanhanen E. Geology, mineralogy and geochemistry of the Fe-Co-Au-(U) deposits in the Paleoproterozoic Kuusamo Schist Belt, northeastern Finland, *Geological Survey of Finland. Bulletin 399*, 2001, 229 p.
 32. Vanhanen E., Cook N. D. J., Hudson M. R., Dahlenborg L., Ranta J. P., Havela T., Kinnunen J., Molnár F., Prave A. R., Oliver N. H. S. The Rompas Prospect, Peräpohja Schist Belt, Northern Finland, *Mineral Deposits of Finland*, 2015, Chapter 5. 4, pp. 467–484.
 33. Wyche N. L., Eilu P., Koppström K., Kortelainen V. J., Niiranen T., Välimaa J. The Suurikuusikko Gold Deposit (Kittilä Mine), Northern Finland, *Mineral Deposits of Finland*, 2015, Chapter 5, pp. 411–433, DOI: 10.1016/B978-0-12-410438-9.00016-9.

Au-Pd-Cu-Se-U MINERALIZATION OF SVETLOYE ORE OCCURRENCE IN CENTRAL KARELIA

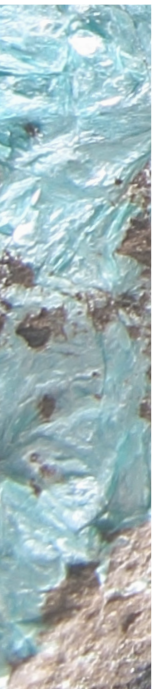
Kuleshevich L. V. (PhD in geology and mineralogy, leading researcher)

Lavrov O. B. (researcher, head of the precambrian museum of geology)

Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk

Au-Pd-Cu-Se-U mineralization of Svetloye ore occurrence in Central Karelia, was deposited near the earth surface and affected by the supply of selenium, copper, lead, noble metals, uranium and intense oxidation (~1500 Ma). The mineralization contains chalcopyrite, bornite, clausthalite and rarer selenides, finely dispersed native gold (Ag 1-13 %), Au-Cu-phases (porpezite and cuproauride), globular Au-Pd-Se and Pd-As-Sb intergrowths, the minerals of uranium and rare-earth elements, as well as hematite, goethite, chalcosine and more complex oxidation-zone compounds. The ore mineralization is confined to a zone of low-temperature alkaline metasomatism and fault of Mg-Fe-components which formed near the gabbro-dolerite-carbonate rock contact. The alteration pattern and ore mineralization of Svetloye occurrence are similar to those of Padma-type Au-Cu-U deposits in the Onega Structure and some localities of the Lapland Greenstone Belt, Finland.

Keywords: Au-Pd-Cu-Se-U mineralization, gold, palladseite, porpezite, palladium cuproauride, metasomatic alteration, Paleoproterozoic, Karelia.



ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ СГУЩЕНИЯ И ФЛОТАЦИИ ШЛАМОВЫХ КЛАССОВ ЛЕЖАЛЫХ ХВОСТОВ

Проведёнными исследованиями обоснован выбор реагентов – флокулянтов и диспергаторов – для сгущения и дефлокуляции шламовых классов лежалых хвостов при их флотационном обогащении. Использование флокулянта «Праестол-2540» при расходе 12 г/т обеспечивает выделение сгущённого продукта с необходимой плотностью. Недостатком режима является неселективное сгущение шламов с захватом тонких классов породных минералов, что не способствует эффективности последующего процесса флотации. Для повышения показателей флотации лежалых хвостов разработан режим дефлокуляции сгущённого продукта, включающий подачу кальцинированной соды, реагента «Неонол АФ 9-8» и сульфит-спиртовой барды с последующим их объединением с песковыми классами лежалых хвостов, кондиционирование с собирателем и флотацию. Подача реагентов-диспергаторов в сгущённый шламовый продукт позволяет разрушить неселективно сфлукулированные минеральные комплексы и обеспечить эффективную флотацию зёрен фосфатных минералов, благодаря чему растут содержание и извлечение пентаоксида фосфора в концентрат апатитовой флотации при переработке сильношламованных лежалых хвостов соответственно на 1,35 и 1,7 %.

Ключевые слова: лежалые хвосты, апатит, шламовые классы, сгущение, флокуляция, реагенты-диспергаторы, дефлокуляция, флотация.

Как показывает анализ, основные потери пентаоксида фосфора (P_2O_5) при обогащении лежалых хвостов связаны с тонкими классами фосфатных минералов, извлечение которых на 25–40 % меньше, чем у классов средней крупности [3, 9]. Повышение показателей обогащения апатитсодержащих техногенных продуктов требует оптимизации режимов подготовки и флотации в первую очередь тонких классов апатита. Это особенно актуально для тонкозернистых хвостов, составляющих на сегодня основную массу техногенного месторождения Ковдорского ГОКа [2].

Причина потерь тонких классов фосфатных минералов – их неселективная флокуляция, протекающая как при операции сгущения, так и непосредственно в объёме флотационных машин [5, 10]. Для повышения извлечения мелких классов фосфатных минералов необходимо создать условия для разрушения флокул с пороодообразующими минералами [7]. Наиболее эффективный подход для повышения скорости флотации шламовых классов апатита – дефлокуляция сгущённого продукта при помощи реагентов-диспергаторов и последующая селективная флотация [1, 6]. При определении реагентных режимов важными являются выбор флокулянта с требуемой силой и учёт возврата в технологический процесс части реагентов-флокулянтов с циркулирующими оборотными водами, обуславливающими неселективную флокуляцию во всех технологических операциях [4].



Бармин Игорь Семёнович

кандидат технических наук
главный обогатитель¹
igor.barmin@eurochem.ru

Морозов Валерий Валентинович

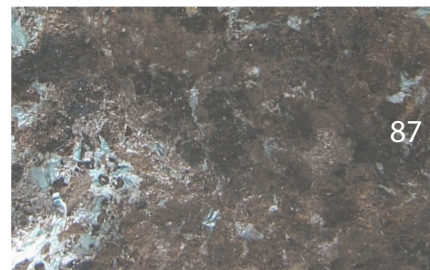
доктор технических наук,
профессор кафедры
«Общая и неорганическая химия»²
dchmggu@mail.ru

Поливанская Валерия Владимировна

кандидат технических наук
доцент кафедры
«Общая и неорганическая химия»²
valeriapolyvanska@mail.ru

¹ ОАО «Минерально-химическая компания «Еврохим», г. Москва

² ФГАУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва



Минеральный состав технологических проб изучался с применением химического, микрорентгеноспектрального анализов и микроскопии в проходящем и отражённом свете. Твёрдая фаза техногенного месторождения представляет собой сложный минеральный комплекс, сформированный в процессе первоначального складирования и гипергенных воздействий, включая стадию сегрегации основных минералов. Анализ проведённых минералогических исследований показал, что основным фосфатным минералом является апатит (28,2 %), представленный фтороксигидроксилapatитом (табл. 1).

Микроскопическим анализом классов крупности твёрдой фазы установлена значительная массовая доля сростков апатита с породными минералами в классах +0,16 мм (от 6 до 21 %) и поверхностно изменённых зёрен апатита (от 5 до 18 %). Микрорентгеноспектральным анализом выявлено, что плёнки покрывают до половины поверхности зёрен, содержат оксиды и гидроксиды Fe (III), образовавшиеся в процессе гипергенных преобразований вследствие окисления и растворения неустойчивых железосодержащих минералов. На зёрнах апатита и форстерита фиксируются адгезионно закрепившиеся тонкие фракции (шламы) апатита породных минералов.

Ситовой анализ проб показал, что количество шламовых классов увеличивается по мере удаления от участка слива в глубину залежи, т. е. от северо-восточного фланга залежи к юго-восточному. По результатам гранулометрического анализа, содержание класса -0,071 мм в пробах колеблется от 25,5 до 51,0 %. Ожелезнение зёрен фосфатных минералов и значительная доля сростков обуславливают необходимость операции доизмельчения, что в присутствии большого количества исходных тонких классов повышает эффективность извлечения апатита из шламов.

В целях определения оптимальных условий обогащения ошламованных лежалых хвостов Ковдорского ГОКа прежде всего выбирался реагент-флокулянт для операции сгущения шламовых классов. Были испытаны два режима сгущения с использованием флокулянтов различной силы – «Праестол-2530» и «Праестол-2540».

На сгущение направлялся слив операций доизмельчения и классификации с плотностью 15 % твёрдого осадка, массовой долей P_2O_5 11,0 % и массовой долей класса 10 мкм 28 %. В проведённых сериях опытов варьировался расход флокулянта (табл. 2). Полученные результаты показали,

1. МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ПРОБ СКЛАДИРОВАННЫХ ХВОСТОВ

Минерал	Массовая доля, %			
	минимальное	максимальное	среднее	КВ
Апатит	25,2	30,5	28,2	13,5
Форстерит	26,4	31,4	29,4	12,3
Кальцит	14,3	20,2	17,6	14,3
Доломит	7,7	8,6	8,1	8,9
Флогопит	10,8	15,2	12,5	15,3
Диопсид	1,1	1,6	1,34	14,5
Магнетит	1,0	1,9	1,5	16,9

что наиболее эффективно сгущение отмечается при использовании флокулянта «Праестол-2540». При расходе последнего 12 г/т выделяется сгущённый продукт с плотностью более 56 %. Однако при применении этого флокулянта происходит неселективное сгущение с полным захватом тонких классов породных минералов, что не способствует эффективности последующего процесса флотации.

Как видно из рис. 1, сфлокулированный осадок флотуруется неудовлетворительно: извлечение P_2O_5 не превышает 55 %, а качество концентрата фиксируется на уровне 25–27 %. Для повышения показателей флотации целесообразно достичь разрушения неселективных флокул фосфатных и породообразующих минералов, что не происходит даже в условиях флотации. Поэтому была изучена возможность применения операции предварительного кондиционирования шламового продукта с реагентами-диспергаторами, используемыми в технологическом процессе. Для выбора оптимального режима ставились эксперименты по определению влияния расхода реагентов-диспергаторов – сульфит-спиртовой барды (ССБ) и кальцинированной соды (КС) – в операции диспергирования сгущённых шламов на показатели операции флотации. Увеличение расхода реагентов-диспергаторов повышает извлечение P_2O_5 при флотации (рис. 2).

Для достижения максимального дефлокулирующего эффекта также было изучено влияние на устойчивость дисперсной фазы подачи реагента «Неонол АФ 9-8» в операцию диспергирования сгущённых шламов вместе с ССБ и КС. Исследо-

2. РЕЗУЛЬТАТЫ СГУЩЕНИЯ СЛИВА ОПЕРАЦИИ ДОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ТОНКОЗЕРНИСТЫХ ЛЕЖАЛЫХ ХВОСТОВ

Расходы флокулянта, г/т	Выход осадка, %	Плотность осадка, %	Массовая доля P_2O_5 , %	Массовая доля класса 10 мкм, %
«Праестол-2530»				
5	78	55,6	12,1	25,2
10	81,9	56,8	11,1	24,8
15	88,5	59,2	11,6	24,5
20	92,2	58,4	11,2	25,3
25	94,9	58,3	11,3	26,5
«Праестол-2540»				
5	83,7	56,5	11,8	25,6
10	87,3	56,7	11,6	23,4
15	91,4	58,5	11,4	24,7
20	94,5	58,2	11,6	25,0
25	96,8	58,0	11,3	26,3

вания проводились при фиксированном времени осаждения (15 с) при переменных расходах реагентов. Данные экспериментов показывают, что добавление реагента «Неонол АФ 9-8» при расходе от 60 до 80 мг/л при концентрации ССБ 500 мг/л ведёт к максимальной степени стабилизации и росту выхода в слив шламовых фракций породных минералов (см. рис. 3, а). При этом наблюдаются признаки селективной флокуляции: происходит диспергирование преимущественно шламовых классов породобразующих минералов, о чём свидетельствует снижение массовой доли пентаоксида фосфора в удаляемой со сливом диспергированной фракции (см. рис. 3, б).

Максимальная степень диспергирования шламовых фракций достигается при концентрации реагента «Неонол АФ 9-8» от 70 до 85 мг/л, а минимальная массовая доля пентаоксида фосфора – от 60 до 80 мг/л.

При сравнении результатов опытов выясняется, что при использовании реагента «Неонол АФ 9-10» максимальная степень диспергирования шламовых фракций достигается при больших концентрациях, чем при использовании реагента «Неонол АФ 9-8».

Разработанная технология предполагает сгущение шламовых классов лежалых хвостов с использованием флокулянта «Праестол-2540», обработку сгущённого шламового продукта смесью реагентов-диспергаторов и его дополнительное сгущение с последующим объединением полученного осадка с песковой частью хвостов, их кондиционирование с собирателем и подачу на флотацию.

С учётом результатов лабораторных исследований для стабилизации и удаления шламовых классов породобразующих минералов рекомендовано дозирование в сгущённый шламовый продукт реагента «Неонол АФ 9-8» в интервале от 60 до 85 мг/л.

Дальнейшие эксперименты проводились в лабораторных условиях в режиме непрерывного цикла доизмельчение – классификация – сгущение – дефлокуляция – кондиционирование – флотация. Результаты замкнутых опытов показали, что добавки реагента «Неонол АФ 9-8» непосредственно в направляемый в апатитовую флотацию сгущённый шламовый продукт повышают показатели флотации. Как видно из рис. 4, использование предлагаемой смеси реагентов-диспергаторов (КС, ССБ, «Неонол АФ 9-8») повышает извлечение P_2O_5 в концентрат и улучшает качество апатитового концентрата как при обогащении тонкозернистых, так и сильношламованных хвостов.

Недостатком данной технологии является увеличенный расход реагентов «Неонол АФ 9-8» и ССБ, обусловленный отделением слива в операции классификации. Использование этой схемы наиболее эффективно при применении технологии сухого складирования, предполагающей поцикловый водооборот с возвратом отфильтрованной жидкой фазы, содержащей водорастворимые флотационные реагенты, в операции классификации и флотации [8]. Такая технология позволяет снизить расход реагентов.

На основании проведённых технологических исследований для повышения эффективности обогащения сильношламованных хвостов рекомендовано применение операции предварительного кондиционирования сгущённого продукта перед операцией флотации для стабилизации шламовых фракций тонкозернистых хвостов с использованием смеси кальцинированной соды, сульфит-спиртовой барды и реагента «Неонол АФ 9-8».

Испытания схемы обогащения лежалых хвостов проводились на укрупнённой флотационной установке ОАО «Ковдорский ГОК» (рис. 5). Для силь-

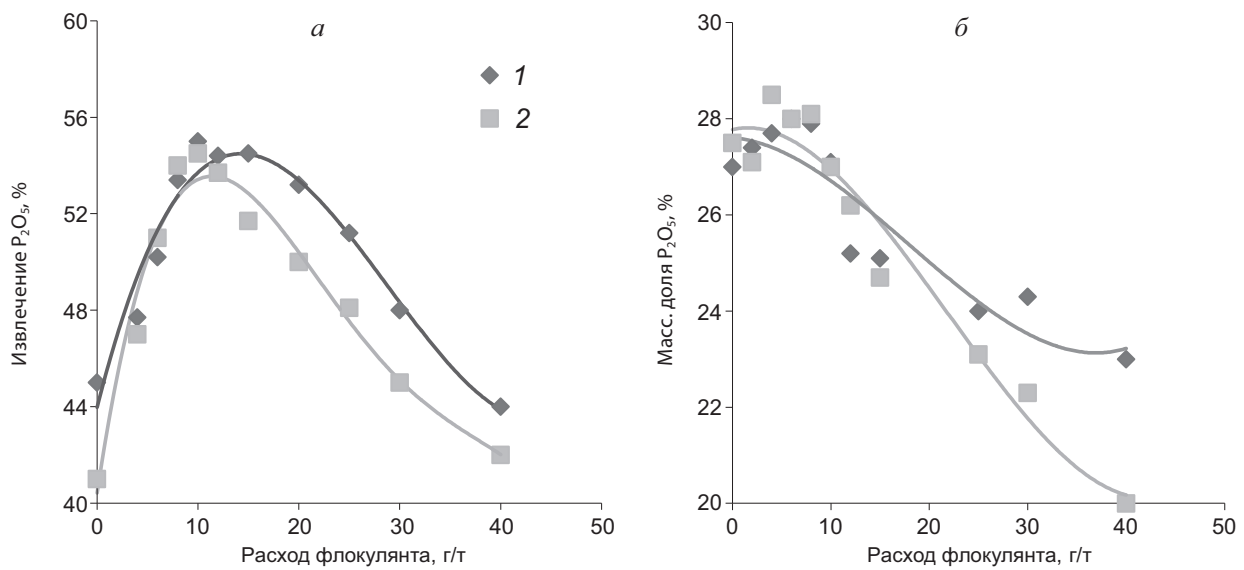


Рис. 1. ЗАВИСИМОСТЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ P₂O₅ В КОНЦЕНТРАТ (а) И МАССОВОЙ ДОЛИ P₂O₅ В КОНЦЕНТРАТЕ ФЛОТАЦИИ (б) ОТ РАСХОДА ФЛОКУЛЯНТА В ОПЕРАЦИИ СГУЩЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ФЛОКУЛЯНТОВ «ПРАЕСТОЛ-2530» (1) И «ПРАЕСТОЛ-2540» (2)

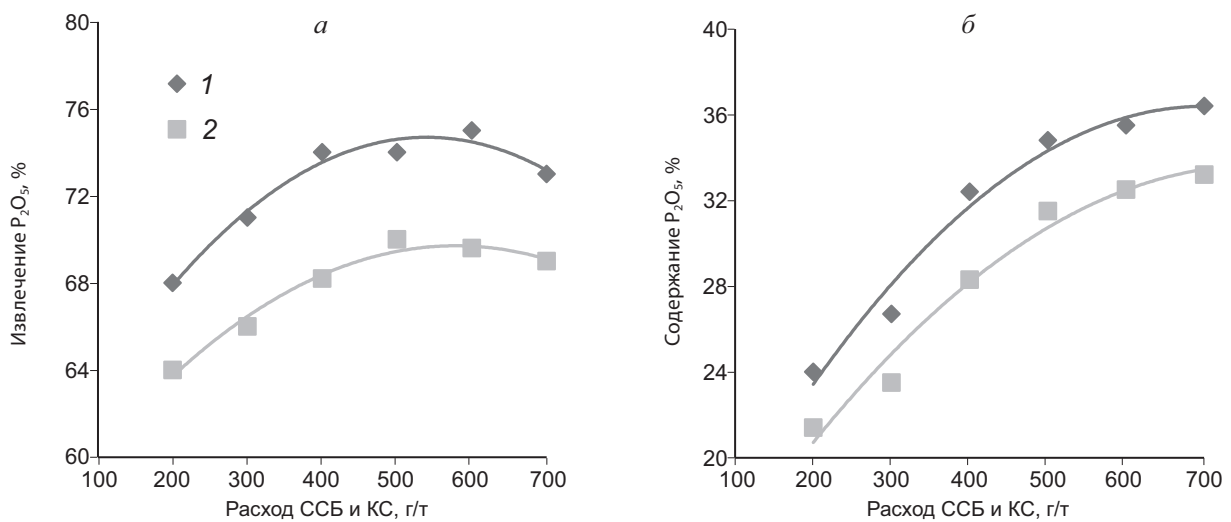


Рис. 2. ЗАВИСИМОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ (а) И СОДЕРЖАНИЯ (б) P₂O₅ В АПАТИТОВОМ КОНЦЕНТРАТЕ ОТ РАСХОДА ССБ, КС:

1 – для тонкозернистых хвостов; 2 – для сильношламованных хвостов

ношламованных песков была использована схема с последовательными операциями классификации и сгущения – обесшламливания с применением добавок флокулянтов в процесс сгущения. Согласно выбранной схеме, слив операции измельчения поступал на классификацию в гидроциклон, где отделялась песковая фракция. Слив из гидроциклона направлялся в радиальный сгуститель, где с использованием флокулянта получали сгущён-

ный продукт высокой плотности. Из сгущённого продукта после добавок реагентов-диспергаторов отделялся обеднённый пентаоксидом фосфора слив, в котором концентрировались шламы породных минералов. Плотный продукт направлялся на объединённую флотацию. Данная схема характеризуется снижением потерь пентаоксида фосфора на 1,5 % и одновременным снижением качества флотационного концентрата на 0,33 %.

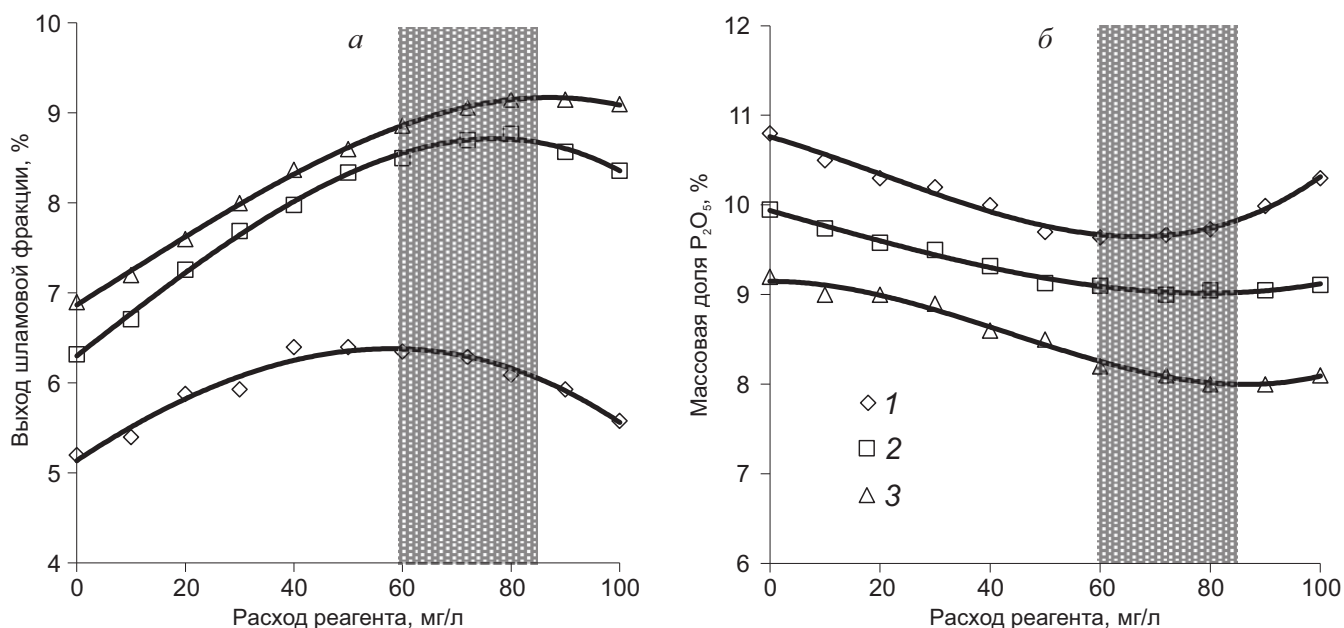


Рис. 3. ВЛИЯНИЕ РАСХОДА РЕАГЕНТА «НЕОНОЛ АФ 9-8» НА ВЫХОД (а) И МАССОВУЮ ДОЛЮ P_2O_5 В УДАЛЯЕМЫХ В СЛИВ ДИСПЕРГИРОВАННЫХ ШЛАМОВЫХ ФРАКЦИЯХ (б):

1 – без подачи ССБ; 2 – при расходе ССБ 300 мг/л; 3 – при расходе ССБ 500 мг/л; штриховкой обозначена область эффективных расходов реагентов

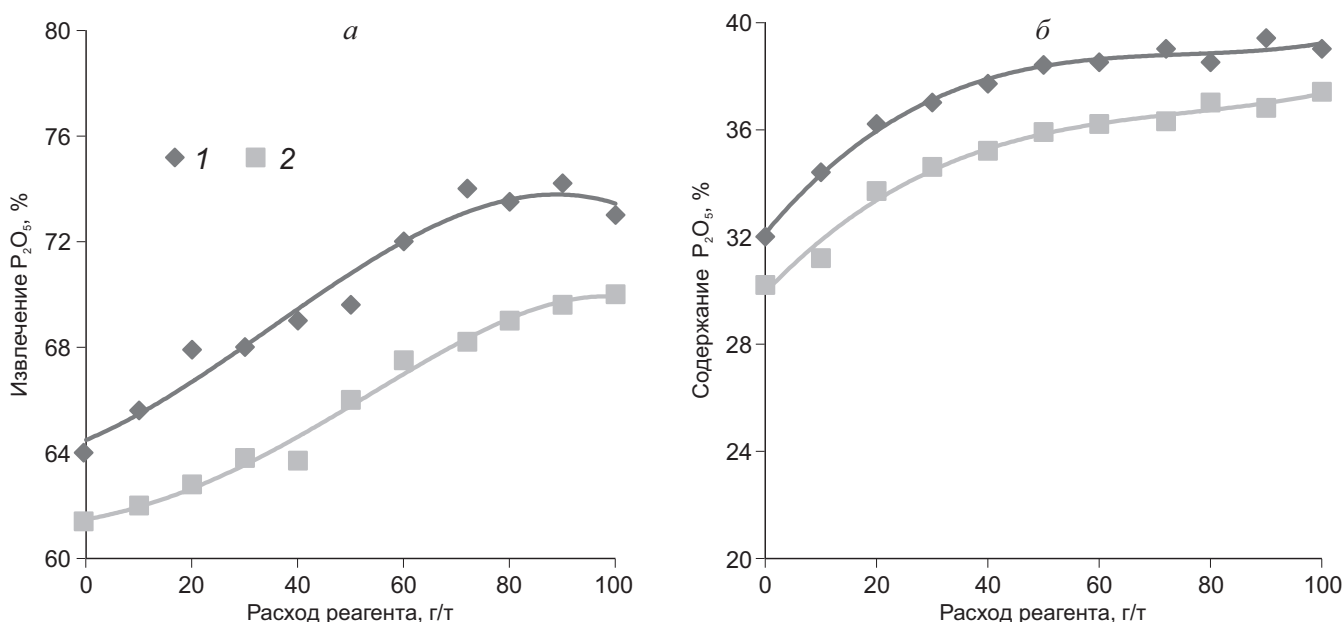


Рис. 4. ЗАВИСИМОСТЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ P_2O_5 В КОНЦЕНТРАТ (а) И КАЧЕСТВА АПАТИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА (б) ОТ РАСХОДА РЕАГЕНТА «НЕОНОЛ АФ 9-8»:

1 – для тонкозернистых хвостов; 2 – для сильношламованных хвостов

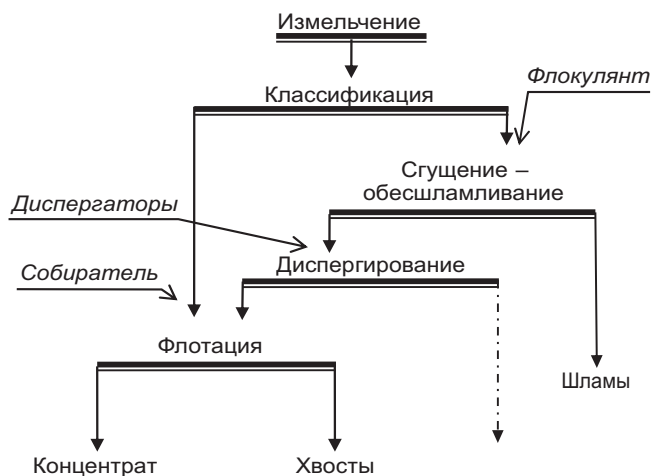


Рис. 5. СХЕМА ПОДГОТОВКИ ДОИЗМЕЛЬЧЕННЫХ ХВОСТОВ К ФЛОТАЦИИ СО СГУЩЕНИЕМ ШЛАМОВЫХ КЛАССОВ

Промышленная апробация технологии сгущения и флотации проводилась на фабрике по переработке лежалых хвостов, входящей в состав Ковдорского ГОКа. В результате применения разработанной технологии было достигнуто существенное повышение показателей обогащения складированных песков техногенного месторождения и особенно его сильноошламованных участков. Содержания и извлечение пентаоксида фосфора в концентрат при переработке таких хвостов увеличились соответственно на 1,35 и 1,7 %.

Итак, как показали исследования, наиболее эффективное сгущение шламовых классов лежалых хвостов достигается при использовании флокулянта «Праестол-2540». При его расходе 12 г/т выделяется сгущенный продукт с плотностью до 55 %. Однако при этом происходит неселективное сгущение с полным захватом тонких классов породообразующих минералов, что снижает эффективность последующего процесса флотации. Для повышения показателей апатитовой флотации предлагается разрушить неселективно сфлуккулированные комплексы фосфатных и породных минералов при добавках в сгущенный продукт кальцинированной соды, реагента «Неонол АФ 9-8» и сульфит-спиртовой барды. Использование частичной загрузки реагентов-диспергаторов в добавляемый во флотацию песков шламовый продукт позволяет стабилизировать процесс апатитовой флотации и повысить содержание и извлечение пентаоксида фосфора в концентрат при переработке сильноошламованных лежалых хвостов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бармин И. С., Белобородов В. И., Поливанская В. В. Повышение эффективности обогащения тонкозернистых складированных хвостов Ковдорского ГОКа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 10. – С. 146–155.
2. 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.
3. Брыляков Ю. Е., Гершенков А. Ш., Лыгач В. Н. Современное состояние и основные направления развития технологии глубокой и комплексной переработки фосфорсодержащих руд // Горный журнал. – 2007. – № 2. – С. 30–38.
4. Брыляков Ю. Е., Шишкин С. П., Кострова М. А. Влияние диспергирующих свойств реагентов на флотацию апатита в условиях оборотного водоснабжения // V Конгресс обогатителей стран СНГ: Сборник материалов. Т. 3. – М.: МИСиС, 2005. – С. 34–38.
5. Небера В. П. Флокуляция минеральных суспензий. – М.: Недра, 1983. – 288 с.
6. He H., Wang W., Li R., Yu L. Study on flotation of scrubbed tailings from phosphate ore // Ind. Miner. Process. – 2015. – V. 11. – pp. 4–10.
7. Kawatra S. Komar, Carlson J. T. Beneficiation of Phosphate Ore. – Englewood (Colorado, USA): Society of Mining, Metallurgy and Exploration, 2014. – 154 p.
8. Ruan Y., He D., Chi R. Review on Beneficiation Techniques and Reagents Used for Phosphate Ores // Minerals. – 2019. – V. 9. – pp. 1–18.
9. Santana R. C., Farnese A. C. C., Fortes M. C. B., Ataid C. H., Barrozo M. A. S. Effect of particle size and reagent dosage on Apatite flotation performance // Separation and purification technology. – 2008. – V. 64, № 1. – pp. 8–15.
10. Somasundaran P., Das K. K., Yu X. Selective Flocculation // Current Opinion in Colloid & Interface Science. – 1996. – V. 1 (4). – pp. 530–534

REFERENCES

1. Barmin I. S., Beloborodov V. I., Polivanskaya V. V. Povyshenie effektivnosti obogashcheniya tonkozernistykh skladirovannykh khvostov Kovdorskogo GOKa [Improving the efficiency of enrichment of fine-grained folded tailings of the Kovdorsky GOK], *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) [Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)]*, 2015, No 10, pp. 146–155. (In Russ.).

2. 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 a phosphorus-containing mineral resource base of Kovdor GOK OJSC], *Gornyi zhurnal*, 2010, No 9, pp. 73–77. (In Russ.).
3. Brylyakov Yu. E., Gershenkop A. Sh., Lygach V. N. Sovremennoe sostoyanie i osnovnye napravleniya razvitiya tekhnologii glubokoi i kompleksnoi pererabotki fosforsoderzhashchikh rud [Current state and main directions of development of technology for deep and complex processing of phosphorus ores], *Gornyi zhurnal [Gornyi Zhurnal]*, 2007, No 2, pp. 30–38. (In Russ.).
4. Brylyakov Yu. E., Shishkin S. P., Kostrova M. A. Vliyanie dispersiruyushchikh svoystv reagentov na flotatsiyu apatita v usloviyakh oborotnogo vodosnabzheniya [The effect of the dispersing properties of reagents on the flotation of apatite in the conditions of reverse water supply], *V Kongress obogatitelei stran SNG: Sbornik materialov. T. 3 [V Congress of Enrichers of the CIS Countries: Collection of materials. V. 3]*, Moscow, MISiS Publ., 2005, pp. 34–38.
5. Nebera V. P. Flokulyatsiya mineral'nykh suspenzii [Flocculation of mineral suspensions], Moscow, Nedra Publ., 1983, 288 p.
6. He H., Wang W., Li R., Yu L. Study on flotation of scrubbed tailings from phosphate ore, *Ind. Miner. Process*, 2015, V. 11, pp. 4–10.
7. Kawatra S. Komar, Carlson J. T. Beneficiation of Phosphate Ore, Englewood (Colorado, USA), Society of Mining, Metallurgy and Exploration, 2014, 154 p.
8. Ruan Y., He D., Chi R. Review on Beneficiation Techniques and Reagents Used for Phosphate Ores, *Minerals*, 2019, V. 9, pp. 1–18.
9. Santana R. C., Farnese A. C. C., Fortes M. C. B., Ataid C. H., Barrozo M. A. S. Effect of particle size and reagent dosage on Apatite flotation performance, *Separation and purification technology*, 2008, V. 64, No 1, pp. 8–15.
10. Somasundaran P., Das K. K., Yu X. Selective Flocculation, Current Opinion in Colloid & Interface Science, 1996, V. 1 (4), pp. 530–534.

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF REGIMES OF THICKENING AND FLOTATION OF SLUDGE CLASSES OF STALE TAILS

Barmin I. S. (PhD in technical sciences, main enrichment ¹)

Morozov V. V. (Doctor of technical sciences, professor of the department of general and inorganic chemistry ²)

Polivanskaya V. V. (PhD in technical sciences, associate professor of the department of general and inorganic chemistry ²)

¹ JSC «Mineral and chemical company «EuroChem»,

² NUST «MISIS»

The choice of flocculant and dispersant reagents for thickening and deflocculation of sludge classes of stale tails at their flotation enrichment is proved by the conducted researches. Use of flocculant «Praestol-2540» at a flow rate of 12 g/t provides the release of condensed product with the required density of 56,5 %. The disadvantage of the regime is the non-selective thickening of sludge with the capture of fine classes of rock minerals, which does not contribute to the effectiveness of the subsequent flotation process. To improve the flotation performance of stale tails, a mode of deflocculation of the condensed product was developed, including the supply of soda ash, the reagent «Neonol AF 9-8» and sulfite-alcohol Barda, followed by their Association with sand classes of stale tails, conditioning with a collector and flotation. Feed of reagents-dispersants in the thickened slurry product allows to destroy nonselectively flocculated mineral complexes and to provide effective flotation of grains of phosphate minerals. There provides growth of the content and recovery of phosphorus pentoxide in the concentrate of Apatite flotation at processing of slimmed stale tails respectively on 1,35 and 1,7 %.

Keywords: stale tails, apatite, sludge classes, thickening, flocculation, dispersant reagents, deflocculation, flotation.



КОНЦЕПЦИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОТВАЛЬНЫХ НИКЕЛЕВЫХ ШЛАКОВ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ДОИЗВЛЕЧЕНИЕМ МЕТАЛЛОВ

Рассматриваются различные технологические подходы к процессам комплексной утилизации никелевых шлаковых техногенных образований с предварительным доизвлечением цветных металлов и железа и пути утилизации пустой породы.

Ключевые слова: Режский шлак, отходы, отвалы, никель, кобальт, молибден, тигель, шлак, отвальный никелевый шлак.

Введение. Основу промышленной переработки никелевых техногенных отходов составляют методы пирометаллургии [2, 3, 6, 7] и гидрометаллургии [1, 4, 5, 8–10]. При этом каждому из методов обычно предшествует стадия механической подготовки сырья, для чего техногенные отходы подвергаются дроблению, измельчению и классификации.

Отвальные никелевые шлаки в твёрдом состоянии перерабатываются чисто механическими методами в целях извлечения металлической фазы – корольков ферроникелевого сплава и магнитной фазы, обогащённой железом. Это приводит к постоянному перемещению отвальных масс, в результате которого усредняется химический состав шлаков, и росту содержаний мелкой фракции после процессов дробления и магнитной сепарации. Использование мелкой немагнитной части шлаков становится ещё более затруднённым, с одной стороны, из-за большого пылевыведения, а с другой – из-за технико-экономической эффективности, которая и так не достигает порога рентабельности. Кроме того, мелкая фракция отвальных шлаков распространяется под действием ветра на прилегающие к отвалу территории, нанося ещё больший экономический ущерб.

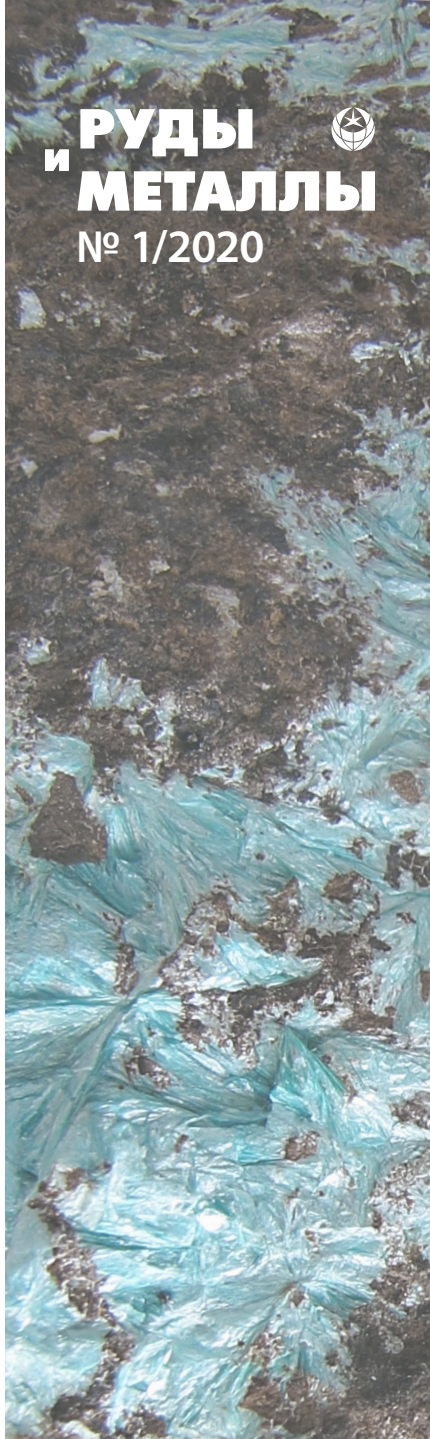
Радикальное решение вопроса безотходной утилизации побочных продуктов производства никеля возможно лишь при использовании целого комплекса процессов (пирометаллургических, гидрометаллургических, химико-термических и т. д.), которые позволят ориентировать шлакопереработку на выпуск определённой номенклатуры продукции, востребованной внутренним рынком. При этом становится возможным дополнительное достаточно высокое извлечение из шлаков железа и других металлов путём разложения сульфидов, восстановления оксидов, осаждения из шлакового расплава восстановленного металла и получения шлаковых расплавов, пригодных для производства высококачественных строительных материалов.

Материалы, оборудование и методика проведения экспериментов. Для исследований использовались отвальные никелевые шлаки Режского (РМК), Уфалейского (УНК) и Южно-Уральского (ЮУНК) металлургических комбинатов. Состав шлаков приведён в табл. 1.

УДК 622.7:622.34

© А. А. Веселовский, С. А. Лайхан, 2020

DOI: 10.24411/0869-5997-2020-10008



Веселовский Александр Александрович

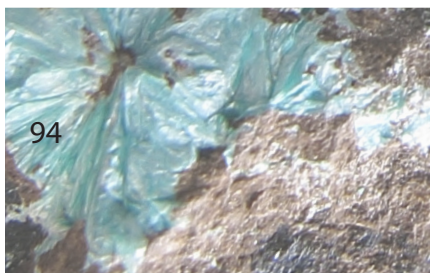
кандидат технических наук, доцент
директор по качеству¹
a_a_ves@mail.ru

Лайхан Саламат Аргынулы

инженер-исследователь, аспирант²
sala_laihan_93@mail.ru

¹ Еманжелинский
литейно-механический завод,
г. Челябинск

² ФГАОУ Южно-Уральский
государственный университет (НИУ),
г. Челябинск



1. ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ОТВАЛЬНЫХ НИКЕЛЕВЫХ ШЛАКОВ

Предприятие	Химический состав, % масс.								
	Ni	Co	Cu	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
РМК	0,10–0,19	0,02–0,04	0,01–0,32	38–42	-	16–19	6–12	10–16	2–7
ЮУНК	0,15–0,48	0,02–0,21	0,08–0,20	33–48	18–49	-	3–8	8–17	6–12
УНК	0,10–0,17	-	0,05–0,20	30–45	-	15–30	3–11	4–17	6–12

Эксперименты проводились в печи Таммана, снабжённой углеродными нагревателями, при температуре 1400–1550 °С. Первоначально были проведены эксперименты по гравитационному разделению штейна от шлака простым выстаиванием при температуре 1400 °С в алундовых тиглях. При этом штейн собирался в донной части, а железо, преимущественно находящееся в окислах, оставалось в шлаковой массе. Выдержка при данной температуре занимала 15 минут. Более высокую температуру в данных тиглях достичь не удалось из-за агрессивности никелевых шлаков (они растворяют глинозём).

Вторая серия экспериментов предусматривала предварительное дробление и магнитную сепарацию, а полученные магнитный и немагнитный концентраты переплавлялись отдельно, но уже в графитовых тиглях, способных восстановить железо из окислов.

В результате выстаивания идёт гравитационное расслоение – частички штейна железосодержащих фаз, имеющих плотность > 5 г/см³, отделяются от основной жидкостекольной массы плотностью < 3 г/см³ при данной температуре. Для анализа получаемых продуктов тигли после гравитационного разделения фаз извлекались из печи, охлаждались вместе со шлаком, а затем разбирались – из донной части извлекали металлосодержащий слиток, который далее подвергался исследованиям.

Результаты проведённых исследований. Полученные слитки имеют жёлтый цвет, хрупкое разрушение и магнитно восприимчивы. Учитывая средний состав исследуемых шлаков, мы заметили, что на дно стекают легкоплавкие сульфиды никеля и железа, которые в процессе оседания на дно, соединяясь друг с другом, укрупняются. Чем выше температура расплава и длительность выстаивания, тем полнее отделяется шлак от сульфидных соединений железа и никеля. Часть окси-

дов железа, имеющих более высокую плотность, оседает на дно вместе с расплавом, другая часть оксидов железа, связанная в фаялит, входит в состав основной жидкой массы, состоящей преимущественно из стекла. Недовосстановленность части железа даёт основание для прогноза повышенного содержания никеля в донном слитке. Результаты выхода металлической фазы при гравитационном выстаивании представлены в табл. 2.

В целях исследования полноты восстановления железа и цветных металлов с последующим восстановлением были проведены эксперименты предварительного разделения фаз шлаков магнитной сепарацией с переплавом всех продуктов магнитного разделения с использованием углеродсодержащих восстановителей.

Химическими анализами установлено, что в магнитном концентрате сосредотачивается большая часть железа (> 20 %) и кобальта, который преимущественно находится в оксидной форме, а в немагнитном концентрате (< 16 % Fe) накапливается сульфидная часть никеля в виде мелких, разоблённых включений. Сами сульфиды никеля являются слабомагнитными, но из-за небольшого размера они сосредоточены в немагнитных фазах отвальных шлаков (образуют механические потери). В результате никель примерно одинаково распределяется в магнитном и немагнитном продуктах.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫХОДА МЕТАЛЛА

Происхождение отвального шлака	Навеска, г	Температура, °С	Выдержка, мин.	Выход металла	
				г	% масс.
ЮУНК	80	1400	15	16,3	20,3
УНК	80	1400	15	5,8	7,1
РМК	80	1400	15	1,8	2,3

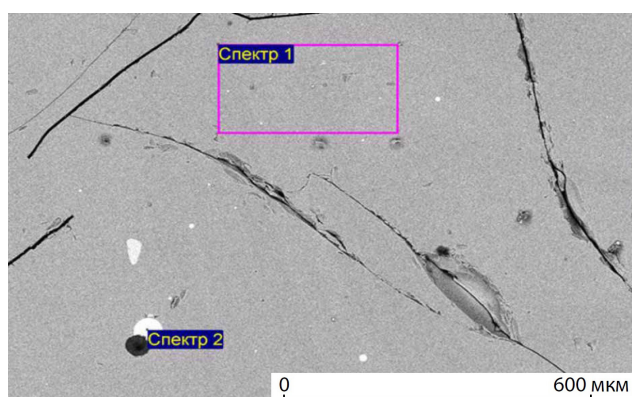


Рис. 1. МИКРОСТРУКТУРА ИСХОДНОГО ОТВАЛЬНОГО ШЛАКА РЕЖСКОГО НИКЕЛЕВОГО ЗАВОДА

На основе такого распределения можно заранее прогнозировать продукты переплава и дальнейшее направление их использования: магнитный – для получения бедного по никелю малосернистого сплава штейна, а немагнитный – богатого по никелю высокосернистого сплава.

Режский шлак полностью немагнитен, представлен фракцией до 10 мм, в отвалах он является хвостом магнитной сепарации после дробления. Микроструктура отвального Режского шлака с указанием мест микрорентгеноспектрального анализа показана на рис. 1, а состав в табл. 3.

Использование для экспериментов графитовых тиглей вместо алундовых позволило повысить температуру выстаивания до 1550–1600 °С (алундовые тигли разъедаются шлаком, начиная с 1400 °С). С другой стороны, материал тигля является восстановителем оксидной части металла.

Навеска шлака массой 100 г разогревалась до заданной температуры и выстаивалась в течение 10 минут. После металл вместе со шлаком зали-

3. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВЫДЕЛЕННЫХ ФРАГМЕНТОВ ШЛАКА

Место анализа	Химический состав, % масс.							
	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Ni
Спектр 1	47,41	2,50	4,19	20,18	-	9,18	16,55	-
Спектр 2	3,58	-	-	-	33,54	-	32,78	30,20

вался в воду. При таком способе охлаждения сохранялся средний состав металла и шлака. Шлак отделялся от металла, определялся выход годного, и после проводились металлографические исследования и определение химического состава продуктов плавки. Состав магнитных и немагнитных концентратов отвальных шлаков Уфалейского и Южно-Уральского комбинатов во многом идентичен, и поэтому в табл. 4 взят средний диапазон содержаний этих элементов, а исследованию подвергнута проба Южно-Уральского никелевого комбината.

Микроструктура металлических продуктов плавки и результаты микрорентгеноспектрального анализа полученного металла представлены на рис. 2 и в табл. 4.

Полученные в результате переплава шлаки содержали (% масс.): 3,40–8,31 Mg; 1,50–6,11 Al; 17,60–23,37 Si; 1,78–8,69 Ca; 0,60–1,81 Cr; 0,00–2,08 Fe; 0,00–0,10 Ni, остальное – кислород. На микроструктурах сплавов (см. рис. 2) видны поры различных форм и размеров, свидетельствующие о начале кипения металла. Переплав шлаков в графитовых тиглях приводит к процессам науглероживания, а насыщенность восстановленного металла кислородом – к процессам кипения. Применение

4. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОЛУЧЕННЫХ СПЛАВОВ

Место анализа		Химический состав, % масс.								Выход годного, % масс.
Рисунок 2	Спектр	P	S	Cr	Fe	Co	Ni	Cu	Mo	
а	4	0,35	2,78	-	91,68	1,06	3,06	0,13	0,94	22
	5	0,43	12,56	-	72,76	1,31	11,43	0,47	1,04	
б	1	-	10,48	0,19	75,60	1,28	10,37	0,40	1,67	10
	2	-	29,24	0,30	56,15	0,67	10,53	1,03	2,08	
в	3	0,42	0,58	0,63	96,01	0,41	1,20	0,52	0,23	18

других видов футеровок печей для такой температуры и составов отвальных шлаков является экономически нецелесообразным с точки зрения их стойкости. Насыщение металла углеродом в контролируемых значениях позволит проводить окислительный период в электрических печах для получения качественных сталей и заготовок под последующую механическую обработку. В случае чрезмерного насыщения углеродом до составов, соответствующих чугунам, область дальнейшего применения такого металла сильно ограничивается низкосортным чугуном литьём.

Анализ химического состава полученных сплавов и шлака позволил установить следующее. Никель, кобальт и молибден в результате высокотемпературной обработки целиком переходят в металл, а железо восстанавливается из шлака не всегда полностью. Увеличение длительности выдержки приведёт к полному его восстановлению из оксидных фаз углеродом футеровки, но расплав при этом сильно насытится углеродом и начнёт кипеть.

Переплав немагнитного концентрата позволяет получать продукты, состав и назначение которых определяется содержанием серы. Если в исходном концентрате оно не превышает 0,1–0,2 % масс., как в случае с отвалами немагнитных шлаков РМК, то продуктом переплава является низкоуглеродистый железоникелевый сплав с содержанием никеля 1–2 %, идентичный по составу сплаву, полученному переплавом магнитного концентрата. Но если содержание серы в немагнитном концентрате $> 0,4–0,5$ % масс., то продуктом переплава является никелевый штейн, содержащий 7–12 % никеля и столько же серы. В штейн практически полностью переходит молибден, образуя с серой сульфиды, и присоединяется к основной сульфидной массе расплава. Штейн такого состава целесообразно подвергнуть кислородной продувке и последующей переработке на ферроникель. Получению штейна будет способствовать добавка пирита к немагнитному концентрату в случае дефицита серы, но, учитывая сложность последующей его переработки и низкий выход годного, такой способ становится очень трудоёмким и затратным. Кроме этого, часть железа шлака остаётся невозстановленной и содержит в себе остатки серы, которая при восстановлении перейдёт в металл.

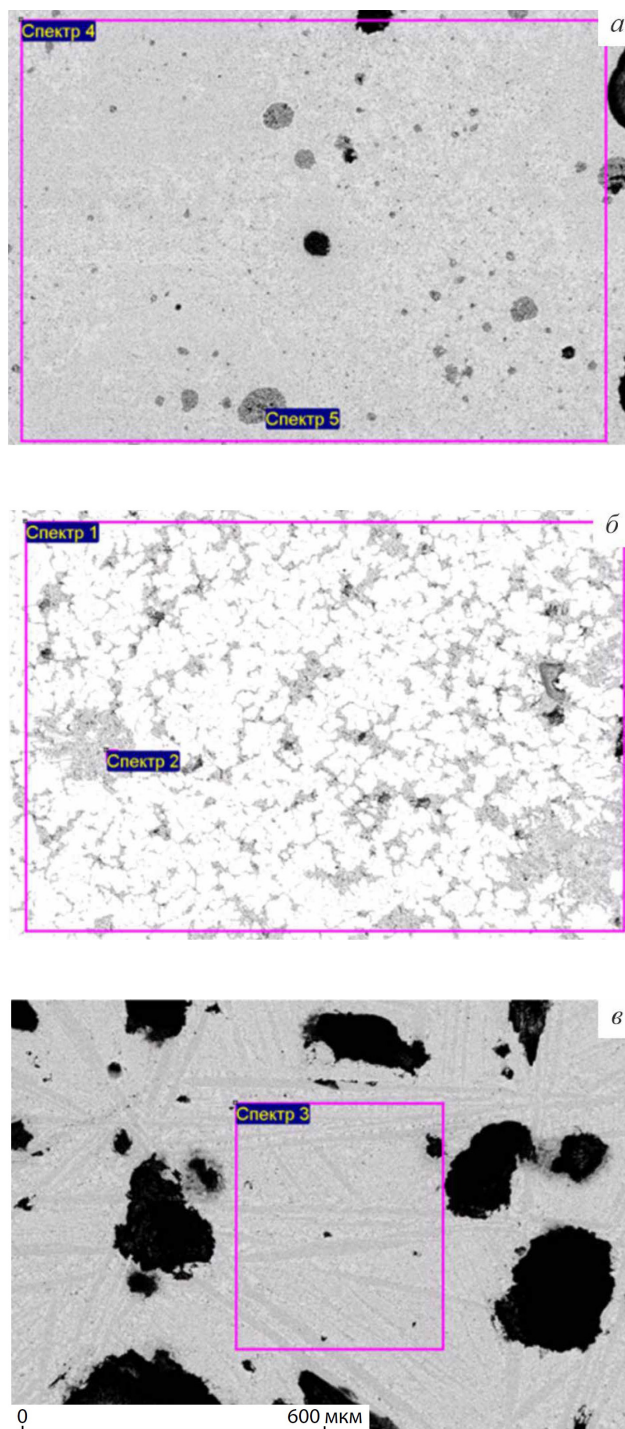


Рис. 2. МИКРОСТРУКТУРА МЕТАЛЛА С УКАЗАНИЕМ МЕСТ ПРОВЕДЕНИЯ МИКРОРЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА, ПОЛУЧЕННОГО ПЕРЕПЛАВОМ МАГНИТНОГО (а), НЕМАГНИТНОГО (б) КОНЦЕНТРАТОВ И НЕМАГНИТНОГО ШЛАКА (в) РЕЖСКОГО НИКЕЛЕВОГО ЗАВОДА ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 1550–1600 °С И ВЫДЕРЖКЕ 10 МИНУТ

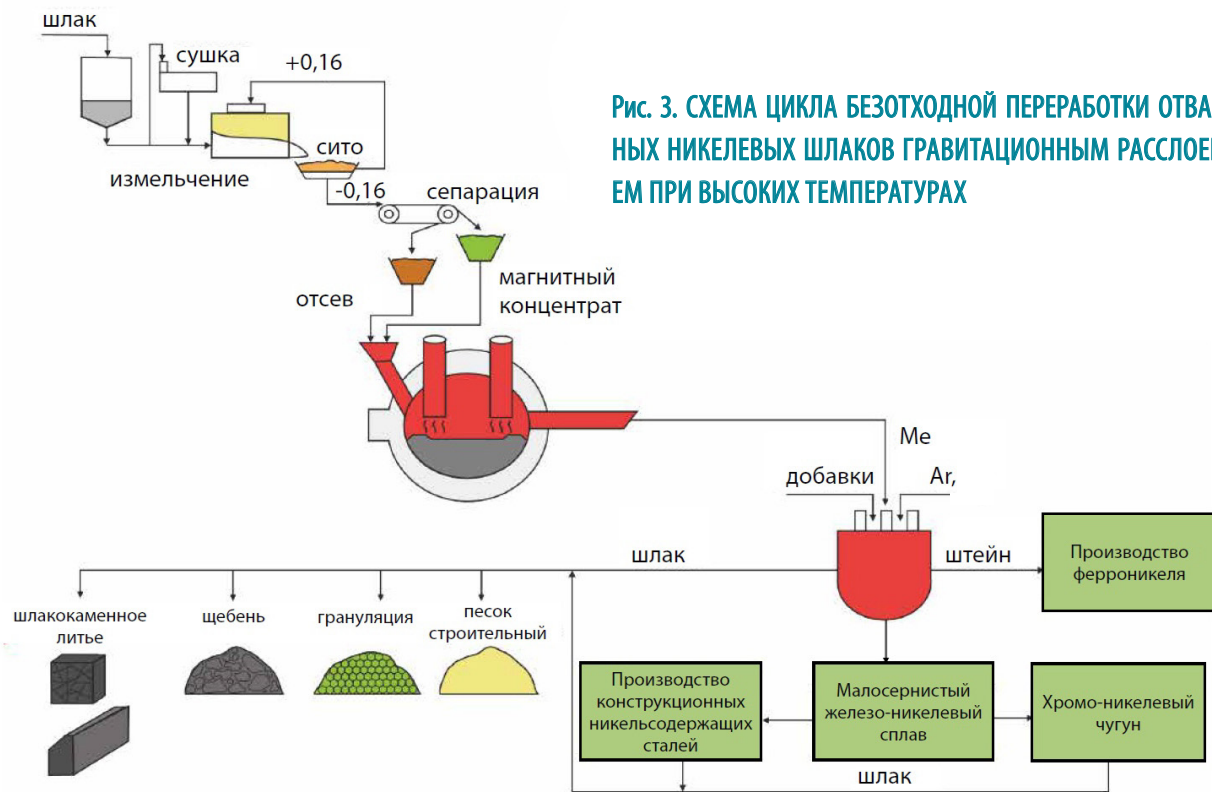


Рис. 3. СХЕМА ЦИКЛА БЕЗОТХОДНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТВАЛЬНЫХ НИКЕЛЕВЫХ ШЛАКОВ ГРАВИТАЦИОННЫМ РАССЛОЕНИЕМ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

На основании проведённых исследований была разработана схема применения данного метода переработки шлаковых отвалов в условиях действующих или вновь созданных мини-заводов и цехов с минимальными капитальными затратами и широким спектром номенклатуры товаров. Данная схема представлена на рис. 3.

Выводы.

1. Метод гравитационного расслоения расплава в нейтральной футеровке (типа корундовой) позволяет получать никелевый штейн и обогащённый железом (фаялит) жидкий шлак, который потом отдельно может быть переработан в железный продукт и пустую породу углетермическим восстановлением.

2. Применение метода углетермического восстановления без предварительной магнитной сепарации измельчённого шлака исключило бы образование разных по концентрации никеля и железа продуктов, а получился бы однородный железо-никелевый продукт с низким содержанием в нём никеля и достаточно большим содержанием серы, переработка которого в годную литейную продукцию весьма затруднительна в технологическом и экономическом аспектах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бродский Ю. А. Внедрение вибрационных конвейеров грохотов на обогатительных фабриках // Цветная металлургия. – 1992. – № 2. – С. 34–35.
2. Ванюков А. В. Теория пирометаллургических процессов. – М.: Металлургия, 1971. – 504 с.
3. Ванюков А. В., Зайцев В. Я. Шлаки и штейны цветной металлургии. – М.: Металлургия, 1969. – 406 с.
4. Герасимова И. С. Покровно-защитные флюсы для плавки и литья медных сплавов: Обзорная информация. Вып. 4. – М.: ЦНИИЭИЦМ, 1986. – 32 с.
5. Голованов Д. В., Савченко В. П. Перспективы использования вибрационной техники // Цветная металлургия. – 1993. – № 4. – С. 28–31.
6. Ежов Е. И., Мурашов В. Д., Филатов А. В. Состояние производства никеля и кобальта на ведущих предприятиях Канады. – М.: ЦНИИЭИЦМ, 1989. – 129 с.
7. Ермаков И. Г. Исследование, разработка и внедрение технологии электроплавки техногенного никельсодержащего сырья: специальность 05.16.02 «Металлургия чёрных металлов»: автореф. дис. на соискание степ. канд. техн. наук. – СПб., 2005. – 185 с.
8. Задиранов А. Н., Козин Д. А., Дровосеков А. Б. Катодное электроформирование никелевых шарообраз-

ных осадков, легированных серой // Цветная металлургия. – 2004. – № 3. – С. 24–28.

9. Хейфец В. А., Грань Т. В. Электролиз никеля. – М. : Металлургия, 1975. – 334 с.
10. Warner N. A. Advanced technology for smelting McArthur river one // Minerals Engineering, 1989. – V. 2, № 1. – pp. 3–32.

REFERENCES

1. Brodskii Yu. A. Vnedrenie vibratsionnykh konveierov-grokhотов na obogatitel'nykh fabrikakh [Introduction of vibrating screen conveyors at concentration plants], *Tsvetnaya metallurgiya [Nonferrous Metallurgy]*, 1992, No 2, pp. 34–35. (In Russ.).
2. Vanyukov A. V. Teoriya pirometallurgicheskikh protsessov [Theory of pyrometallurgical processes], Moscow, Metallurgiya Publ., 1971, 504 p.
3. Vanyukov A. V., Zaitsev V. Ya. Shlaki i shteyny tsvetnoi metallurgii [Slags and mattes of non-ferrous metallurgy], Moscow, Metallurgiya Publ., 1969, 406 p.
4. Gerasimova I. S. Pokrovno-zashchitnye flyusy dlya plavki i lit'ya mednykh splavov: Obzornaya informatsiya. [Coating Protective Fluxes for Smelting and Casting Copper Alloys: Overview]. – V. 4, Moscow, TsNIIETsM Publ., 1986, 32 p.
5. Golovanov D. V., Savchenko V. P. Perspektivy ispol'zovaniya vibratsionnoi tekhniki [Prospects for the use of vibration technology], *Tsvetnaya metallurgiya [Nonferrous Metallurgy]*, 1993, No 4, pp. 28–31. (In Russ.).
6. Ezhov E. I., Murashov V. D., Filatov A. V. Sostoyanie proizvodstva nikelya i kobal'ta na vedushchikh predpriyatiyakh Kanady [Nickel and cobalt production status at leading Canadian plants], Moscow, TsNIIETsM Publ., 1989, 129 p.
7. Ermakov I. G. Issledovanie, razrabotka i vnedrenie tekhnologii elektroplavki tekhnogenogo nikel'soderzhashchego syr'ya : spetsial'nost' 05.16.02 "Metallurgiya chernykh metallov" : avtoref. dis. na soiskanie step. kand. tekhn. nauk [Research, development and implementation of the technology of electric melting of technogenic nickel-containing raw materials. Extended abstract of candidate's tesis], Sankt-Peterburg, 2005, 185 p.
8. Zadiranov A. N., Kozin D. A., Drovosekov A. B. Katodnoe elektroformirovanie nikel'evykh sharoobraznykh osadkov, legirovannykh seroi [Cathodic Electroformation of Nickel Sulfur-Doped Nickel-Shaped Sediments], *Tsvetnaya metallurgiya [Nonferrous Metallurgy]*, 2004, No 3, pp. 24–28. (In Russ.).
9. Kheifets V. A., Gran' T. V. Elektroliz nikelya. [Nickel Electrolysis], Moscow, Metallurgiya Publ., 1975, 334 p.
10. Warner N. A. Advanced technology for smelting McArthur river one, Minerals Engineering, 1989, V. 2, No 1, pp. 3–32.

CONCEPT OF PROCESSING DUMPING NICKEL SLAGS WITH PRELIMINARY EXTRACTION OF METALS

Veselovsky A.A. (PhD in technical sciences, associate professor, director of quality ¹)

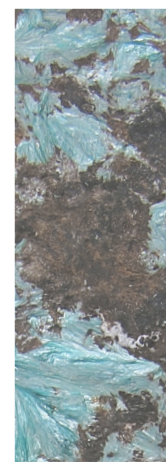
Layhan S.A. (research engineer, graduate student ²)

¹ Emanzhelinsky foundry and mechanical plant, Chelyabinsk

² South Ural State University NRU, Chelyabinsk

Various technological approaches to the processes of complex utilization of nickel slag technogenic formations with preliminary additional extraction of non-ferrous metals and iron, and ways of utilizing waste rock are considered.

Keywords: Rezhsky slag, waste, dumps, nickel, molybdenum, crucible, slag, dump nickel slag.



Фрагменты из книги А. А. Константиновского «Далёкие голоса»

ГРОЗНОЕ И ПРЕКРАСНОЕ

Моим сверстникам

Отрочество моё и детство брата пришлось на военную пору. 22 июня 1941 года, так уж совпало, я с двоюродной сестрой и сверстницей Галей уезжал в свой первый пионерский лагерь. Миша по малости лет оставался дома. Серым бесцветным утром автобусы привезли нас, весело гомонящих школьников, на Павелецкий вокзал. Однако радостное возбуждение от предстоящей дальней поездки, пронзительных сиплых звуков горна, перестуков барабанов, команд пионервожатых, приятной тяжести новенького рюкзака за плечами и алюминиевой фляги на боку, которую мама перед отъездом обшила сукном (требование ко всем отъезжающим), быстро угасло. Унылое длинное и приземистое здание заштатного вокзала было переполнено. Люди ждали посадки, но состав почему-то никак не подавали. Пришлось стоять в общей толпе довольно долго, родители недоумевали. Тоскливое ожидание связалось в памяти с невысоким сводчатым потолком, нелепо толстыми и короткими колоннами, духотой и смешанным запахом махорки, паровозного дыма и хлорки.

Наконец состав подали. Мы погрузились в жёсткие плацкартные вагоны дальнего следования с плотно закрытыми пыльными окнами, где, наскоро распахав вещи и поспорив из-за желанных мест на откидных вторых полках, стали наперебой кричать через стёкла родителям и выслушивать их напутствия – поезд всё не отправлялся.

Внезапно в вагоне стихло: появился строгий начальник лагеря с необычной, запомнившейся мне фамилией Аликарий. Он встал поперёк прохода на нижние полки, широко расставив короткие, колесом, ноги в хромовых командирских сапогах, и громко произнёс слова, которые врезались в память на всю жизнь:

– Ребята, фашистская Германия сегодня пала на нашу страну. Война! – и он что-то добавил про Красную Армию и скорую победу над врагом.

Всех поразило это известие. Кто-то из младшего отряда в наступившей тишине заплакал. Поезд неожиданно, без предупреждающего гудка тронулся, и вскоре колеса застучали по рельсовым стыкам.

* * *

Вообще-то о приближении неизбежной войны знали все. В переулках или на бульварах часто можно было видеть колонны марширующих в противогазах, а в школьных дворах – женщин с носилками и сумками с красными крестами. При домоуправлениях в подвалах появилось множество стрелковых тиров. В нашем, неподалеку от дома, где мы жили, я бывал часто. Малый возраст не препятствовал этому: плати и стреляй. Вместе с другими стрелками я залезал на дощатые нары и укладывался на старые телогрейки и одеяла. Справа от каждого места лежали заветные малокалиберные винтовки ТОЗ-8 с открытыми затворами. От них приятно пахло ружейным маслом, в полутьме тускло отливали синевой воронёные стволы. Я высыпал перед собой тяжёленькие маслянистые патроны и ждал команды инструктора. И она раздавалась привычной армейской скороговоркой с проглатыванием отдельных слогов: «Лёжа заряжай!» Вначале от волнения я не мог разобрать слов и воспринимал их как некий условный код: «Дежзарьжай!» Затем заталкивал патрон в патронник, смачно клацал затвором и поднимал увесистую, с массивным цевьём винтовку. Ярко освещённые мишени чётко виднелись вдали. Каждый стрелок целил в свою. Хорошо помню, как подводил чёрный срез прицела с мушкой в его прорези под «яблочко», оставляя чуть заметный, в ниточку, просвет. Важно было также «не завалить» винтовку вправо или влево. Отстрелявшись, все по команде спускались с нар и в сопровождении инструктора шли – а хотелось бежать! – к мишеням. Сильно мазал я только в первый раз. Но рубль – плату за пять патронов – давали мне дома нечасто. Почти столько же стоила пачка сливочного мороженого, так что приходилось стараться. Со второго раза дело быстро пошло на лад.

О надвигавшейся войне с немцами думалось с весёлым возбуждением. Никто не сомневался в скорой победе над хотя и опасной, но маленькой Германией, выделявшейся на политической карте

небольшим коричневым пятном неподалеку от нашей необъятной страны ярко-красного цвета. Всех моих школьных товарищей воодушевляли новые военные песни, сменившие прежние, о гражданской войне. «Матрос Железняк, партизан», «Орлёнок» и «Щорс» были забыты. Отовсюду звучали «Если завтра война», «Броня крепка, и танки наши быстры», походная артиллерийская. Моему патриотическому настрою способствовало и то, что осенью тридцать девятого Алика, мамино младшего брата, после школы забрали в армию. Это был знаменитый «ворошиловский призыв». Артиллерийский полк, где он начал службу, стоял в ближнем Подмосковье, в Кузьминках. Как-то в выходной день мы с мамой приехали туда, к палаточному лагерю в молодом сосняке, и увидели нового Алика, одетого в военную форму. Пока он разговаривал с мамой, я с жадным любопытством разглядывал его гимнастерку с петлицами, широкий солдатский ремень, пилотку со звездой. Воодушевившись, негромко запел, косясь на красноармейцев у КПП:

Артиллеристы, точней прицел!

Наводчик зорок, разведчик смел.

Врагу мы скажем: «Нашей Родины не тронь,
А то откроем сокрушительный огонь!»

Алик, к моей радости, прислушивался, продолжая разговор с мамой. Потом подозвал меня:

– Ты неправильно поёшь. Надо наоборот: разведчик зорок, наводчик смел. Когда ведут огонь по танку прямой наводкой и он катит прямо на батарею, для наводчика главное не зоркость, а смелость. – Лицо его вдруг осветилось неотразимой, только ему присущей улыбкой. – Согласен? – Он потрепал меня по голове и привычно подёргал щекой (семейная особенность!). Несмотря на неровный, порой капризный характер, Алика все любили: от него исходило необъяснимое, какое-то светлое обаяние.

Осознав смысл его слов, я почувствовал вместе с гордостью за молодого дядю лёгкий холодок в груди: дело-то в случае чего будет нешуточным. Но мгновенное прозрение быстро растаяло – бравые военные песни и марши вернули боевой пыл.

Мне нравилось рисовать бронетехнику, которая по праздникам с бодрым лязгом и грохотом катилась мимо нашего дома по улице Горького на парад. Особенно танки. Теперь на старых кинолентах они кажутся смешными, почти игрушечными. Но тогда к ним относились всерьёз, особенно к тяжёлой машине «КВ» с массивным корпусом, несоизмеримо маленькой, как куриная голова, башней и коротким орудийным стволом.

Алик прослужил в первый свой призыв недолго и меньше чем через год был комиссован с диаг-

нозом туберкулёз лёгких (впоследствии оказавшимся ошибочным). Весной предвоенного сорокового он после госпиталя снова оказался дома. Хорошо помню, как обрадовался я его возвращению. Вскоре, когда мы были с ним одни, он задумчиво, грызя по своему обыкновению спичку, заметил:

– Чапаев погиб, а был бы маршалом. Щорс погиб, а тоже был бы.

Признания такого рода не были характерны для нашей семьи. Чаще звучали критические замечания, и потому меня мучил разлад между тем, что я слышал дома и в школе. Другой мой дядя – старший брат Алика, высокий и стройный Михаил – особенно отличался в этом отношении. Когда он бывал в хорошем настроении, то любил, схватив меня или Мишку, весело закружиться посреди комнаты, потряхивая великолепным волнистым чубом и восклицая что-нибудь вроде: «Нам Германия нипочём, мы Германию кирпичом, шапками закидаем!»

<...>

С братом мы собирали подаренные тем же дядей Мишей, заядлым физкультурником, нагрудные значки, которых в то время было великое множество и которые принято было носить. В большинстве своём они подвешивались на короткие цепочки и высоко ценились при обмене в классе: ГТО, ГСО (санитарная оборона) и ПВХО (противовоздушная и химическая оборона) – самый крупный и красивый. Он так и сиял красной и голубой эмалью. Самым ценным считался «Ворошиловский стрелок» – его надо было заслужить по-настоящему.

В школе действовали военные кружки. В военно-морском, куда я записался, занятия вёл старшеклассник, сын красного командира. У него было длинное лицо с выступающей клином нижней челюстью. Я завидовал его внешности, сливавшейся каким-то образом в моём представлении с военно-морским флотом, и тайком перед зеркалом измерял линейкой свой подбородок. Парень был важен и немногословен. Лениво и снисходительно рассказывая о военных кораблях и судовождении, он постоянно употреблял специальные термины, не объясняя их значения. Но всё же именно от него я впервые услышал гордо звучащие для меня слова: норд, ост, зюйд, вест, шпангоут, румбы. Сколько градусов в румбе, он объяснить не удосужился. Поэтому никто не смеялся, когда на перемене кто-то из кружковцев, распираемый военно-морской удалью, исполнил куплеты: «Шестнадцать румбов влево, шестнадцать румбов вправо!» Дома я тотчас пропел их, как бы невзначай, перед Аликом, но он вместо одобрения расхохотался:

– Да что они, пьяные, что ли? Так ведь и с мостика слетишь!

С этим же парнем изучали противогаз. Однажды, когда мы практиковались в надевании этого тугого, крепко пахнущего и мокрого от чужого пота резинового изделия, он, к нашему удивлению, никак не мог натянуть его на своё длинное лицо: мешала «шведская» челюсть. Наверное, на том же занятии он написал мелом «иприт, люизит, фосген, дифосген». Страшные слова, которые, слава богу, канули в вечность: на войне газы не применили.

Вот я сижу на уроке и слышу, как уныло долдонит кто-то, заучивая стихотворение, в котором мальчик обращается к маршалу: «Слышал я, фашисты задумали войну, хотят они разграбить Советскую страну... Товарищ Ворошилов, ты, верно, будешь рад, когда к тебе на службу придёт мой старший брат... Мой брат стреляет метко, увидишь это сам, когда стрелять прикажешь на фронте по врагам».

А вот другое, похожее по духу и характерное для предвоенного времени. На затрёпанной странице учебника под ним картинка: наш красноармеец с винтовкой в классической стойке штыкового боя что-то кричит нападающему на него противнику. Он в будёновке и обмотках. Кто-то из старательных учеников обвёл его чернильным карандашом, а вражескому солдату замазал лицо фашистской свастикой: «В бою схватились двое – чужой солдат и наш. Чужой схватил винтовку, сразиться он готов... Посмотришь ты, как ловко встречаю я врагов! Постой, постой, товарищ, винтовку опусти, ты не врага встречаешь, а друга встретил ты. Такой же я рабочий, как твой отец и брат, кто нас поссорить хочет – для тех оставь заряд!..»

Начавшаяся война грубо опрокинула такие представления. О какой классовой солидарности и агитации могла идти речь во время наступления немцев летом сорок первого, когда они шли во весь рост с автоматами, стреляя от живота, на наши винтовки образца 1891/30 года?

* * *

На станции Лебедянь, куда поезд прибыл на рассвете следующего дня, горела одинокая лампочка. Платформа была пустынна. Вскоре приехали подводы, запряжённые дюжими лошадьми. Приятно пахло дёгтем, сеном и конским потом. Погрузили вещи и посадили девочек, в том числе мою сестру Галю. Остальные отправились пешком. После продолжительного марша мы пришли в Троекурово, где в бывшем барском особняке и флигелях вокруг него среди старого липового парка помещался лагерь.

Пребывание в нём не оставило особого следа. Общее мрачноватое настроение, конечно, было связано с начавшейся войной. Угнетала и непривычная дисциплина – во время работ на колхозных полях, где помогали пропалывать бесконечные гряды, и во время купанья в Красивой Мече. (Название сразу заставило вспомнить Касьяна с этой реки – мама перед поездкой в лагерь читала мне тургеневские «Записки охотника»). Зато с тёплым чувством вспоминаю военрука и физкультурника Анатолия. Этот русоволосый атлет учил с разбега бросать учебную гранату на дальность, в момент броски специально цепляя себя ногой за ногу, и падать наземь (чтобы не поразил осколками). Помню, как великолепно крутил он «солнышко» на турнике, как учил экономить воду во фляжке под палящим солнцем, когда работали на полях, и как по его свистку мгновенно прятаться в кустах на случай авианалёта. Спустя месяц после прибытия в лагерь в липовом парке по распоряжению Аликария для нас были отрыты глубокие траншеи. Они тянулись резкими зигзагами, и я спросил Анатолия, для чего это. Его ответ поразил жёсткой правдой:

– Ты чего, недогадливый? Для того чтобы осколки от бомбы или снаряда, если они, не дай бог, угадают в траншею, не секли бы вдоль неё и не калечили остальных. – Толя спохватился и смущённо взглянул на меня: не брякнул ли лишнего?

Гуляя с нами, он любил повторять, что к концу лета наши босые ступни так затвердеют, что можно будет бегать по битому стеклу. Добрый был мальчик! После пионерлагеря он наверняка попал на фронт. Дожил ли Толя до победы?

В конце июля, когда вторая смена должна была закончиться, Аликарий объявил на общей линейке, что ввиду начавшихся налётов на Москву все останутся здесь на неопределённое время. Поначалу я очень скучал по домашним, но через месяц свыкся с разлукой и успокоился. Поэтому, когда услышал, что останемся в Троекурове надолго, стал приглядывать длинные склоны, с которых зимой буду кататься на лыжах.

Грусть возвращалась, когда я открывал чемодан достать смену белья. Старенькая, но заботливо выглаженная одежда живо напоминала маму. А сам чемоданный дух! Когда я, сидя в каптёрке, распаивал крышку этого памятного ещё по курскому детству обшарпанного чемодана, он одурманивал меня: пахло одновременно и домом, и дальней дорогой. Настоявшийся, чуть приторный запах залежавшегося, хотя и чистого белья, яблок и печенья, которые я давно съел... Я доставал со дна мамы письма, перечитывал их и радовался дорогому, иногда не очень-то разборчивому по-

черку. О войне ни слова, только милые домашние радости.

<...>

В первых числах августа по лагерю разнёсся слух, что скоро всех вывезут в Москву. Причиной тому (в это невозможно было поверить!) было стремительное наступление немцев и риск оказаться отрезанными от родного города. Наверное, услышав об этом, я увидел вещий сон. Хорошо помню его: по чугунному корявому небу с надсадным гулом густо летят чёрные фашистские бомбовозы, и меня пронизывает ощущение, что всё погребло, что я остался один на белом свете... Страшное видение это, несколько видоизменяясь, как оборотень, возвращается ко мне во снах по сию пору. А ведь в то время никто из нас не испытал ещё ночного налёта и не видел немецких самолётов!

Смешно сказать, но меня после этого кошмара успокоила надпись на случайно подвернувшейся спичечной коробке. Краткие и убедительные слова Молотова: «Наше дело правое. Враг будет разбит. Победа будет за нами».

* * *

По дороге в Москву меня, как и многих, охватила шпиономания. Вражеские лазутчики мерещились повсюду. На станции Лебедев в ожидании поезда показался подозрительным какой-то пожилой деревенский мужик с деревянной ногой, развалившийся на своих узлах. Я тотчас сообщил о своих подозрениях физоргу Анатолию. Но тот только устало улыбнулся в ответ. Много лет спустя в военных лагерях я насмешил рассказом об этом своих университетских друзей. Мы смаковали тогда короткий стишок из армейской малотиражки «Тревога». Какой-то солдатик открыл свою душу: «Радость будет или грусть, детства ль вспыхнут впечатленья – я пойду и поделюсь с командиром отделения». Кто-то из острословов тотчас досочинил: «Это очень мрачный тип, видно, враг народа. Я пойду и поделюсь с командиром взвода».

Москва, когда мы вышли из поезда, оказалась не такой, какой оставили её полтора месяца назад. Окна домов были заклеены крест-накрест бумажными полосками, народу на улицах поубавилось.

Нас встречали автобусы. По дороге к Рождественке, где располагалась мамина работа, проезжали Театральную площадь. Кажется, именно там (или у Павелецкого вокзала?) мы увидели выставленный на обозрение сбитый немецкий бомбардировщик чёрного цвета – «Юнкерс-88», со свастикой на хвосте в жёлтом круге и белыми крестами

на крыльях и фюзеляже. Все жадно рассматривали его. Распластанный, с низкой посадкой, хищный – он вызывал опасливое уважение.

У входа в высокое здание наркомата, у стремительно уходящего вниз, к Неглинной, вымощенного булыжником переулка, нас встречали родители – пёстрая толпа одетых по-летнему людей. И мы с Галкой попали в родные крепкие объятия. Мама была ещё совсем молода и хороша собой, с необыкновенно милой короткой стрижкой по моде тех лет, в своём выходном ситцевом с жёлтыми цветами платье.

Вечером она и остальные взрослые нашей большой семьи наперебой рассказывали о первой бомбёжке Москвы 22 июля. Несмотря на то что в город сквозь огневое ограждение прорвалось лишь несколько самолётов, зрелище было фееричное. После разноголосого воя сирен забухали зенитки и басовито застучали счетверённые зенитные пулеметы с крыш соседних высоких домов. Тёмное небо расцвели очереди трассирующих пуль и двигающиеся лучи прожекторов. Но вопреки всей этой суматохе сверху слышался гул уверенно проплывающих чужих самолётов. Неожиданно прожектористам удалось поймать один из них, и они повели его в скрещенных лучах – первый вражеский бомбардировщик, который наши увидели воочию. Ярко освещённый, он казался белым, со вспыхивающей отражённым светом кабиной. Летел он, не меняя курса и не делая противозенитных манёвров, словно был уверен в полной безнаказанности. Скорострельная 37-миллиметровая пушка с крыши высоченного дома артистов в Глинищевском переулке задыхалась от бессильной ярости: её трассирующие снаряды всё время опаздывали.

В отдалении раздалось несколько тяжёлых, раскатистых взрывов. Они резко отличались от выстрелов зенитных орудий, и все со страхом догадались, что это сброшенные бомбы... Но ни один прорвавшийся в ту ночь самолёт сбить не удалось.

* * *

Вскоре мама с Андреем сумели снова отправить нас из Москвы – подальше от бомбёжек. Андрей Сергеевич (Андрейка, как мы ласково называли его) перед войной заменил нам папу, арестованного в тридцать седьмом и исчезнувшего навсегда. Около станции Заветы Ильича по Ярославской железной дороге в высокоствольном хвойном лесу находился дачный посёлок, построенный незадолго до войны для городской элиты. Одинаковые маленькие домики были вольно разбросаны под сенью огромных сосен и елей.



Никаких изгородей, садов и огородов. К нашему приезду посёлок практически опустел: фронт приближался, люди думали о спасении семей и имущества. Только этим можно было объяснить, что дачу удалось снять за гроши.

Галка, Мишук и я стали жить под присмотром старой женщины, явившейся из счастливого до-революционного детства Андрея. Знакомя нас с ней, он шутливо произнёс: «Фройляйн Вебер – Эличка».

Эличка была бонной в семье крупного инженера, одного из строителей Сибирской железнодорожной магистрали. На протяжении многих лет она воспитывала сначала старших братьев и сестёр Андрея, потом и его самого. В восемнадцатом году большую и дружную семью разметало революцией, след Элички потерялся. Андрей разыскал свою состарившуюся одинокую «фройляйн» только перед началом войны.

Эличка кормила нас, заботилась, учила обиходному немецкому и некоторым непреложным истинам из своего детства в мирной кайзеровской Германии. Например, чтобы организм получал дополнительную порцию полезного ему железа, надо в яблоки, перед тем как съесть, на время воткнуть гвозди, выделяющие ценную ржавчину. Или – «один укус хлеба на шесть ложек супу». О яблоках в Заветах Ильича мы, понятное дело, уже забыли,

а совет насчёт расходования хлеба пригодился поздней осенью, когда начался голод. Правда, как я ни старался, драгоценный хлеб растворялся во рту уже на четвёртой ложке.

По выходным, а часто и в будни, после работы приезжали мама с Андреем, Алик и Мушка – мамина сестра и мать Галки, маленькая, худенькая (отсюда и ласковое прозвище), но чрезвычайно энергичная женщина с «очень крепким» характером, растившая дочь в одиночку.

Это была короткая, но прекрасная пора – вольная воля, которую я остро ощущал после несвободы пионерского лагеря. Вокруг лес, в вершинах старых сосен и елей гуляет ветер. Глядя, как качаются их кроны, мама вспоминала пушкинские «шум и шорох их вершин»... Неподалёку затаилась под склонившимися ольхами и черемухами Серебрянка, по песчаному дну которой гуляли стаи пескарей, а в тихих глубоких заводях застыли жёлтые кувшинки. С Аликом мы разведали потаённую лесную тропу, которая привела нас на обширное моховое болото с клюквой. Вблизи одного из «окон» – небольшого озерка – мы с Мишухой раскачали по совету Алика вязкий моховой покров и испытали весёлый ужас, когда увидели, что от нас во все стороны расходятся зелёные волны вместе с кочками и чахлыми сосенками.

Ноги постепенно засасывало, и стало понятно, что подо мхом прячется глубокая вода, а мы стоим на трясине. Она источала особенный, ни на что не похожий запах потревоженного сфагнового мха. Здесь я узнал вкус перезимовавшей и новой, недозрелой клюквы, нити которой, как красные бусы, оплетали подушки кочек.

Однажды на берегу Серебрянки Мишук нашёл мёртвую черепаху. Её выпустили, вероятно, уезжавшие дачники, и она погибла, не выдержав непривычно свежих утренников. Алик решил положить её в муравейник, чтобы муравьи очистили скелет и панцирь. Мы перешли реку по поваленной берёзе и углубились в лес. Муравейников попадалось много, но дядюшка хотел найти подходящий в самой чаще, подальше от зарастающей тележной дороги. Такой муравейник нашёлся, и мы зарыли в него наш трофей.

На обратном пути Алик пошёл крутыми зигзагами, изредка делая топориком боковые и лобовые затёски на деревьях: намечал тайный путь к заветному муравейнику. Найти его можно было лишь при условии, если плотно прижиматься щекой к каждой очередной затёске. Только в этом строго определённом положении можно было увидеть в отдалении сквозь сплетение ветвей белое пятно следующей метки.

Черепашу решено было выкопать через пару недель, чтобы муравьи успели сделать свою ра-

боту. А до этого в тёплые солнечные дни Алик закалял себя и меня: в одних трусах бегали сквозь чащу молодого ельника, продираясь сквозь хлещущие зелёные лапы.

Он любил проказить и однажды, когда Эличка куда-то ушла, предложил нам сварить суп из топора – как в сказке про находчивого солдата. Сказано – сделано. Мы тщательно вымыли его походный топорик с отполированным от долгого употребления красиво выгнутым деревянным топорищем и опустили в закипающий бульон. Всё было бы прекрасно, но к моменту, когда суп был готов и мы приготовились разливать его по тарелкам, появилась Эличка. Таких шуток она не понимала. А шестилетний Мишук расстроился, что не отведал настоящего сказочного супа.

В один прекрасный день в лесу на той стороне Серебрянки стало шумно: пришли люди с пилами и топорами и сделали широкую засеку.

Тёмные ели и начинающие желтеть берёзы лежали вповалку крест-накрест, образовав серьёзное препятствие для немецких танков. Но рубщики скоро ушли, танков не было (да и не верилось, что они вообще могут появиться!), и снова воцарилась тишина с голубым осенним небом и летящей серебристой паутиной. С братишкой и Галкой до наступления холодов мы любили по пути в лес пробираться через эти завалы и качаться на упругих толстых сучьях берёз в потоках золотой листвы.

Ближе к середине сентября приехал из Москвы Волик – племянник Андрея, на редкость обаятельный и вдумчивый мальчик. В сельской школе как раз начались занятия, и мы с ним и Галкой стали ходить в четвёртый класс. Тропинка в школу вела через пустовавший дачный посёлок, и мы – чего греха таить? – заходили в недавно опустевшие дачи поискать что-нибудь стоящее среди брошенного хлама. Возле одной из них к нам вдруг выбежал молодой и весёлый кобель немецкой овчарки, брошенный или забытый спешно уезжавшими хозяевами. Он страшно радовался встрече, прыгал, пытаясь лизнуть в лицо, всячески ласкался и широко улыбался белозубой пастью. Пёс проводил нас до школы, дождался, пока мы не пошли обратно, и вместе с нами прибежал к дому. Радости моего братца не было конца, но Эличка призадумалась: осиротевшего породистого пса надо кормить, а мы жили на всём привозном, и ей приходилось экономить. Нового друга наугад назвали Джеком, он участвовал во всех играх и охотно отправлялся с нами в лес. Мы подумывали о том, чтобы взять его в Москву. Но вскоре Джек исчез. Может быть, за ним вернулся хозяин, а может быть, сманил кто-нибудь из местных.

В начале октября за горизонтом стало погромыживать. С каждым днём пушечный гром звучал всё сильнее. Мама, приезжая вечерами, рассказывала, что немцы быстро наступают, что в Москве собирается ополчение, что многих, особенно студентов, посылают на трудовой фронт – рыть противотанковые рвы и строить укрепления. <...>

Немецкие бомбардировщики (довоенное слово «бомбовозы» было забыто), как говорили на станции и в очереди у хлебного ларька, стали появляться даже днём. Алик давно не приезжал, и я понял, что время весёлых прогулок по лесу ушло безвозвратно. Какая уж тут черепаха? Фронт, о котором на время забыли, приближался. Бомбёжки в Москве участились, и мы нередко, особенно в тёмные безлунные вечера, когда звёзды над нашим домиком мерцали сквозь вершины высоких сосен, слышали характерный прерывистый гул тяжело нагруженных немецких бомбардировщиков, идущих на Москву. Когда они, уже налегке, возвращались, звук моторов не был прерывистым, а лишь плавно менял громкость. Различие это знали все и по звуку определяли, идут ли самолёты на бомбёжку или уже отбомбились.

Немцев, казалось, ничто не могло остановить. И эта трагическая действительность так не вязалась с победными предвоенными песнями вроде «А если к нам нагрянет враг матёрый, он будет бит повсюду и везде...» Почему же отступаем? Это не укладывалось в голову. Впрочем, мысли подобного рода меня в том возрасте не могли долго волновать. Отчётливо помню, что гнетущего страха не было вовсе. Наоборот, настроение у меня и моих одноклассников было приподнятым: калейдоскоп сногшибательных событий будоражил воображение. То по радио сообщали, что «под натиском превосходящих сил противника наши войска оставили город Киев», и я, прогоняя идиотскую улыбку от удовольствия, что сообщаю эту новость первым, ошарашил ею мальчишек и девочек в классе. То становилось известным, что совсем недавно в ночном бою вблизи Москвы наш истребитель геройски сбил тараном «юнкерса». То кто-то из ребят приносил в класс длинный, тяжёлый и корявый осколок зенитного снаряда – в Заветах Ильича это ещё была редкость.

Неожиданно выпал первый снег и не спешил таять. После занятий я на скорую руку вытесал себе из старых штатетин лыжи. Но покататься на них не пришлось.

На следующий день произошло из ряда вон выходящее событие. Во время урока над школой с оглушительным рёвом низко пронёсся самолет

и страшно задребезжали стёкла. Ребята, которые сидели у окон, возбуждённо заорали, что это немецкий – с крестами. Почти в ту же секунду тяжело грохнул взрыв у железнодорожного полотна метрах в двухстах от бревенчатого двухэтажного здания школы, и в классе чудом не вышибло окна. Урок прервался. Все оцепенели, кто-то испуганно или нарочно занял. В класс стремительно вошёл директор. Выдержав паузу и обведя нас глазами, он спокойно и твёрдо сказал, чтобы мы без паники, по одному, быстро отправлялись по домам, а если самолёт налетит снова – бросались бы на землю. Лучше в яму или придорожную канаву.

Ученики высыпали во двор и молча стали расходиться. Мне не терпелось взглянуть, куда попала бомба, и, когда Галка ушла, я уговорил Волика сбежать вместе через футбольное поле к железнодорожным путям. Воронку мы увидели тотчас же. Как ни странно, любопытных возле неё не оказалось. Бомба упала буквально в пяти метрах от рельсов, не повредив их. Яма была глубокой, и в ней, как в цветочном горшке, лежала изуродованная взрывом сосна. Её толстый ствол наискось срезало то ли самой бомбой, то ли осколками. В воронке ещё не рассеялся дым и стоял знакомый горьковатый запах взрывчатки.

Надо было спешить домой, чтобы не волновать Эличку. Обсудить случившееся не удалось: Волик реагировал вяло и вдруг, к моему удивлению, беззвучно заплакал. В молчании мы пошли домой, но ещё на подходе нас ждал новый сюрприз. На мокром снегу чётко отпечатались следы женских туфель и больших сапог – к нам пожаловали гости. Ими оказались Алик и сопровождавшие его две молодые симпатичные девушки – Машура и Ануся, племянницы Андрея. Они приехали забрать нас в Москву. Отсиживаться дольше в Заветах Ильича было нельзя: немцы подходили к столице.

К вечеру, собрав пожитки, мы распрощались с милой лесной дачкой и в ранних сумерках отправились на станцию. Там нас огорошило известие, что уехать можно только из Пушкино, расположенного ближе к Москве, так как через Заветы Ильича движение электричек временно прекращено. Пришлось идти пешком несколько километров. Синие сумерки сгущались. Белел и начинал хрустеть под ногами подмерзавший снег. Старая Эличка не могла двигаться быстро, поэтому до печально мигающих огней Пушкино шли долго. Мишку, когда он уставал, Алик сажал себе на плечи. Машура и Ануся пытались шутить, чтобы подбодрить всех.

На обледенелой платформе скопилась масса людей: поездов не было. Простоять пришлось не-

сколько часов, мы стали замерзать. Согревало лишь тепло толпы. От невесёлых мыслей отвлекал Волик, который стал пересказывать книгу о немецких антифашистах. Он недавно вернулся со старшим братом и матерью из Якутска, где прожил несколько лет, и делал вид, что холод ему нипочём.

Наконец состав подали. Что тут началось! Свалка, ругань, крики. Не помню уж, как очутились мы в тёмном неосвещённом вагоне, плотно набившись в проходе. Но только стали отогреваться, как объявили, что электричка никуда не пойдёт, – надо выгружаться. Алик одним из первых протолкался к выходу и вскоре появился на платформе перед нашим окном. С трудом приоткрыв его, Машура с Анусей просунули ему на руки спящего Мишутку. Нашему примеру последовали другие, и плачущие детишки избежали страшной давки.

Только поздним вечером вышли мы на перрон Ярославского вокзала. Ночная Москва в затемнении показалась ещё более суровой, чем была в начале августа, когда мы вернулись из пионерлагеря. В раскинувшемся над неосвещённым перроном и тёмной громадой вокзала звёздном небе вспыхивали и тотчас гасли необычно яркие звёзды, и оттуда доносились глухие и частые хлопки разрывов: зенитки вели беглый огонь по невидимым немецким самолётам. Трамваи не ходили, метро не работало, так что пришлось с Каланчёвской площади топтать пешком через тёмный, насуспенный, будто нежилой город, слабо освещаемый двигающимися по небу голубоватыми лучами прожекторов. Меня поразило, что витрины магазинов заложены высокими штабелями мешков с песком. Особенно дико было видеть их у недавно шикарного Елисеевского гастронома, расположенного на улице Горького рядом с нашим домом.

В большой передней нас встретили измученные ожиданием мама, Андрей, Мушка и дядя Миша. В глубине длинного коридора замерли, как мумии, прижавшись спинами к стене, пожилые, вечно недовольные нами «тётушки», точнее, двоюродные бабушки. Очередной налёт продолжался, зенитки бухали не переставая, и тётя Леля с тётей Аней переживали опасность в коридоре, подальше от окон. При нашем появлении они насупились и отвернулись.

Войдя в комнату, окунулись в домашнее тепло. Пошли объятия, поцелуи, расспросы. Низко висящий над обеденным столом большой, обтянутый жёлтым шёлком с бахромой абажур из маминого детства окрашивал всё вокруг неярким тёплым светом. Только высокий потолок с лепниной и старинная мебель вокруг тонули в прият-

ном сумраке. С продуктами было ещё терпимо: несмотря на введённые недавно карточки, пока торговали коммерческие магазины, и мы после всех мытарств наелись, наконец, до отвала и напились горячего крепкого чаю.

* * *

В тот насыщенный событиями памятный день 16 октября, когда мы возвращались из Заветов Ильича, в Москве была паника. (Слово это, учитывая его историческую значимость для москвичей, можно было бы писать с большой буквы как имя собственное.) Из города стремительно уезжало и уходило всё, что могло передвигаться. Контора «Росглавпаток», помещавшаяся в нашем подъезде двумя этажами выше, в которой работала мама, в тот день эвакуировалась. Начальство с семьями грузилось на машины, захватив всё, что можно было увезти. Но перед этим, ещё утром, в спешном порядке состоялось партийное собрание. Отбывающие на восток начальники всех мастей, включая председателя месткома и секретаря парткома, одетые по тогдашней моде во френчи и фуражки защитного цвета, клеймили позором нескольких беспартийных сотрудников-белобилетников, якобы уклоняющихся от фронта. Они гневно требовали, чтобы те немедленно записались в народное ополчение. Сами же к вечеру покинули столу – руководить переброской конторы в тыл. Мама видела своими глазами, как до слёз краснели полубольные люди и, загнанные в угол, обещали на следующий день пойти в военкомат. Почти все они, в том числе мамин руководитель, инженер средних лет с большим сердцем, которого я хорошо помню, вступив в ополчение, в скором времени полегли «в белоснежных полях под Москвой».

В последующие дни мы выходили слушать канонаду. Глухая и почти непрерывная, она доносилась вдоль улицы с северо-запада, со стороны Белорусского вокзала. В очередях шёпотом передавали самые невероятные слухи: что немецкие танки прорвались в Химки и через час появятся на улицах Москвы, что ночью во время налёта, стремясь уничтожить здание ЦК ВКП(б) на Старой площади, немцы вместо бомбы сбросили особую торпеду, которая, упав, проскакивает под землей несколько кварталов и над её подземным следом взрываются все здания.

На Тверском бульваре, куда мы обычно ходили гулять, в оцепленной зоне разместили аэростат воздушного заграждения, имеющий вид огромной серебристой бомбы со стабилизатором. Рядом с ним на газонах отрыли землянки и в них

поместили службу – девушек в военной форме. В ясные вечера аэростат в числе множества других подымался высоко в небо, туго натянув трос, за который он был прикреплен. Для налетающих самолётов опасность представляли не сами аэростаты, а именно тросы, неразличимые в темноте.

Аэростаты наполнялись газом из надутых цилиндрической ёмкости, которую в обиходе называли «колбасой». Её приносили и на наш бульвар: команда девушек в шинелях, пилотках и сапогах держала концы верёвочной оплётки, а тупорылая «колбаса» величественно плыла невысоко над их головами. Стоя в очереди, я как-то услышал, что однажды такая штукавина унесла за облака девушку, которая при аварии не успела выпутать руку из верёвочной петли.

В самом начале Тверского бульвара, возле памятника Пушкину, на случай уличных боёв за одну ночь был сооружен дзот – дерево-земляная огневая точка. Его амбразура хмуро смотрела на Пушкинскую площадь. (Памятник стоял тогда на своём законном месте. На противоположную сторону улицы Горького, где он находится сейчас, его передвинули непонятно зачем в конце сороковых, глубоко разрыв каменистый грунт. Тогда шутили, что копать начали в поисках корней космополитизма.)

Для застывшей в страшном ожидании опустевшей Москвы характерны были настенные красочные плакаты. Среди них выделялся «Родина-мать зовёт!» работы талантливого Тоидзе. Он занимал всю торцовую часть четырёхэтажного дома рядом с Центральным телеграфом и был хорошо виден с улицы Горького. В большинстве же эти плакаты – «Окна ТАСС» – представляли собой карикатурные изображения Гитлера и его воинства и сопровождалась снисходительно-насмешливыми четверостишиями: «Фюрер алчно пялит очи через надолбы и рвы, из бинокля ошень-ошень, ошень близко до Москвы!» Или: «Бьёмся мы здорово, рубим отчаянно – внуки Суворова, дети Чапаева» <...> Один из плакатов запомнился жуткой картиной: гитлеровский солдат проваливается под лёд. Внизу текст: «... И в полынье встречая фрица, гремя железом ржавых лат, встаёт со дна тевтонский рыцарь и говорит: "Постой, солдат. Скажи, потомок, неужели германцы, родичи мои, за семь веков не поумнели, что с русскими ведут бои? Меня на льду славяне били, теперь тебя славяне бьют... Вы что, историю забыли, теперь её не признают?" – Был глухо слышен голос фрица, уже идущего под лёд, – нам у истории учиться безумный фюрер не даёт!»

В те дни по радио часто звучала песня про ополченцев. Встретившись с Воликом, мы пошли



однажды смотреть на их ускоренное обучение во дворе бездействующей школы неподалёку от нашего дома. В большинстве своём это были пожилые люди либо совсем молоденькие студенты в очках. Ловкостью и сноровкой ни те, ни другие не отличались. С ними занимались строевой подготовкой, показывали, как надо окапываться, обучали приёмам штыкового боя. <...>

Тогда же в октябре у нас неожиданно появился племянник Андрея Миша Ястребов, недавно добровольцем ушедший на фронт, – восемнадцатилетний крепыш с сосредоточенным выражением волевого лица и неожиданно добрым, наивным взглядом. Он был в затянутой ремнём ши-

нели, смущённо держал в руках шапку-ушанку и винтовку со штыком, которую затем осторожно поставил у двери, легонько стукнув прикладом об пол. Миша попросил вечером позвонить домой на Малый Левшинский и сообщить, что у него всё в порядке. Андрею сказал, что спешит, чаю пить не будет: отлучился на минуту. Потом тихо добавил, что находится совсем рядом. Их секретное подразделение истребителей танков круглосуточно дежурит в засаде в полуподвале, который своими низкими окошками глядит на кинотеатр «Центральный» на другой стороне улицы Горького. Он ещё понизил голос и сообщил, что вооружены хорошо: у них противотанковые гранаты, бутылки с зажигательной смесью, пулемёт.

Рассеянно прислушиваясь, я разглядывал пахнущую смазкой боевую винтовку и старался понять, как крепится к стволу длинный четырёхгранный штык. Помню, что не утерпел и упросил уже в передней уходящего Мишу снять и снова прикнуть его к воронённому стволу.

– Ну, дядя Андрюша, – коротко выдохнул за моей спиной Миша. Они обнялись.

Закрывая входную дверь, я смотрел, как он резво побежал вниз по истёртым каменным ступеням. Последнее, что запомнилось, – колючий блеск кончика штыка над его ушанкой.

Продолжение читайте в следующем выпуске нашего журнала.



Об авторе

Александр Александрович Константиновский родился 30 ноября 1930 г. в Воронеже. После окончания географического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова работал в Таджикистане, Приамурье, в Алданской и Колымской экспедициях Всероссийского аэрогеологического треста, участвовал в среднемасштабной геологической съёмке (Южное Верхоянье, хребет Джугджур, Приколымье, хребты Момский и Черского). Внёс существенный вклад в изучение стратиграфии и тектоники названных районов. С 1972 г. работает в ЦНИГРИ.

В 1991 г. А. А. Константиновский защитил докторскую диссертацию, посвящённую геолого-генетическим основам поисков месторождений алмазов и золота на территории бывшего СССР. Опубликовал более 70 научных работ. Его имя хорошо известно специалистам в нашей стране и за рубежом.

Иллюстрации автора