

# ОТЕЧЕСТВЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ

№ 1 / 2022

Основан в марте 1933 года

Журнал выходит шесть раз в год

## УЧРЕДИТЕЛИ



Министерство природных ресурсов и экологии  
Российской Федерации



Российское геологическое общество



Центральный научно-исследовательский  
геологоразведочный институт  
цветных и благородных металлов

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор:  
А.И.Иванов

Н.В.Милетенко (зам. главного редактора),  
Т.М.Папеско (зам. главного редактора),  
А.И.Черных (зам. главного редактора)

Е.М.Аксенов, А.И.Варламов, С.С.Вартанян,  
А.И.Жамойда, А.А.Кременецкий, М.И.Логвинов,  
Г.А.Машковцев, Н.В.Межеловский, И.Ф.Мигачёв,  
А.Ю.Розанов, Г.В.Седельникова, И.Г.Спиридонов,  
В.И.Старостин, Е.Г.Фаррахов

## Содержание

### ОРГАНИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ, ЭКОНОМИКА, НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

*Иванов А. И., Алексеев Я. В., Черных А. И., Наумов Е. А.,  
Куликов Д. А., Тарасов А. С., Конкина О. М., Минькин К. М.,  
Попов И. В.*

Благородные металлы Российской Федерации – состояние минерально-сырьевой базы и перспективы её развития .....

### МЕСТОРОЖДЕНИЯ РУДНЫХ И НЕРУДНЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

*Мигачёв И. Ф., Звездов В. С., Минина О. В.*

Формационные типы медно-порфировых месторождений и их рудно-магматические системы .....

### ЛИТОЛОГИЯ, ПЕТРОЛОГИЯ, МИНЕРАЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ

*Зубова Т. П., Позднякова Н. Н.*

Минералого-геохимические поисковые признаки золото-полисульфидно-кварцевого оруденения в ряду «коренной источник – кора выветривания – россыпь» (на примере Урала) .....

*Зинчук Н. Н.*

Роль петролого-минералогических и геохимических исследований в оценке потенциальной алмазности кимберлитов .....

*Агашева Е. В., Агашев А. М., Гудимова А. И., Малыгина Е. В.,  
Червяковский В. С., Прусакова Н. А., Щукин В. С., Голубев Ю. К., Похиленко Н. П.*

3 Состав гранатов из кимберлитов Архангельской области как один из признаков алмазности .....

### ПОЗДРАВЛЕНИЯ

90-летие Светланы Васильевны Яблоковой .....

80-летие Алексея Гордеевича Волчкова .....

75-летие Сергея Сероповича Вартапяна .....

### ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ

Памяти Евгения Александровича Козловского .....

49 Памяти Дмитрия Васильевича Рундквиста .....

Редакция: *Т. М. Папеско, А. П. Фунтикова*  
Компьютерная верстка: *А. Д. Юргина*

Решением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования 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»

Свидетельство о регистрации в средствах массовой информации  
№ 01217 от 03 июня 1992 г.

Подписано в печать 11.03.2022

Адрес редакции: 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1  
Телефон: (495) 315-28-47. Факс: (495) 315-43-47. E-mail: ogeo@tsnigri.ru

Сайт: [http://tsnigri.ru/o\\_geology](http://tsnigri.ru/o_geology)

Сайт электронной библиотеки: <http://elibrary.ru>

Типография ФГБУ «ЦНИГРИ»

## Благородные металлы Российской Федерации – состояние минерально-сырьевой базы и перспективы её развития

Рассмотрено современное состояние минерально-сырьевой базы коренного и россыпного золота, металлов платиновой группы и серебра. Проведён анализ динамики запасов и состояния прогнозных ресурсов различных категорий. Обоснована необходимость усиления геологоразведочных работ ранних стадий за счёт средств федерального бюджета для подготовки прогнозных ресурсов и создания «поискового задела» для золота и серебра.

*Ключевые слова:* золото, металлы платиновой группы, серебро, минерально-сырьевая база, запасы, прогнозные ресурсы, добыча, геологоразведочные работы.

ИВАНОВ АНАТОЛИЙ ИННОКЕНТЬЕВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, научный руководитель, tsnigri@tsnigri.ru

АЛЕКСЕЕВ ЯРОСЛАВ ВЛАДИМИРОВИЧ, кандидат геолого-минералогических наук, зав. отделом, alekseev@tsnigri.ru

ЧЕРНЫХ АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ, кандидат геолого-минералогических наук, генеральный директор, tsnigri@tsnigri.ru

НАУМОВ ЕВГЕНИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель генерального директора, tsnigri@tsnigri.ru

КУЛИКОВ ДАНИЛА АЛЕКСЕЕВИЧ, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий отделением, kulikov@tsnigri.ru

ТАРАСОВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ, и. о. заведующего отделом, tarasov@tsnigri.ru

КОНКИНА ОЛЬГА МИХАЙЛОВНА, кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией, okonkina@tsnigri.ru

МИНЬКИН КОНСТАНТИН МАТВЕЕВИЧ, заведующий лабораторией, minkin@tsnigri.ru

ПОПОВ ИВАН ВЛАДИМИРОВИЧ, заведующий лабораторией, popov@tsnigri.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»)

## Precious metals of the Russian Federation – the state of the mineral resource base and the prospects for its development

A. I. IVANOV, Ya. V. ALEXEEV, A. I. CHERNYKH, E. A. NAUMOV, D. A. KULIKOV, A. S. TARASOV, O. M. KONKINA, K. M. MINKIN, I. V. POPOV

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

In this work, we studied the current state of the mineral resource base of primary and placer gold, platinum group metals and silver. We analyzed the dynamics of reserves and the state of the prospective resources of various categories. That allowed us to substantiate the necessity of enhancing early-stage exploration work at the expense of the federal budget for the preparation of prospective resources and the creation of an "exploration reserve" for gold and silver.

*Key words:* gold, platinum group metals, silver, mineral resource base, reserves, prospective resources, extraction, exploration.

**Введение.** Золото, металлы платиновой группы (МПГ) и серебро относятся к высоколиквидным видам твёрдых полезных ископаемых (ТПИ) и являются одними из наиболее востребованных видов металлических полезных ископаемых. Российская Федерация занимает одно из ведущих мест в мире по запасам, объёмам добычи и экспорта благородных металлов.

В «Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года» золото отнесено к группе ТПИ, недостаточно обеспеченных запасами, что определяет необходимость целевого изучения состояния и перспектив развития его минерально-сырьевой базы (МСБ). Среди всех видов ТПИ на золото выдано больше всего лицензий, по данным на 01.01.2022 г., 7493 штук, то есть около 77 %. Финансирование геологоразведочных работ на золото от всех видов ТПИ в последние 5 лет составляет около 52–63 % за счёт средств недропользователей и около 59 % (среднее за 2017–2021 гг.) за счёт федерального бюджета. Золото является одним из наиболее ценных видов экспортного сырья. В 2021 г., по данным ФТС России, объём экспорта золота из РФ в натуральном выражении составил 302,2 т, в денежном 17,4 млрд долл.

МПГ в соответствии со «Стратегией...» относятся к полезным ископаемым первой группы, минерально-сырьевая база которых достаточна для обеспечения потребностей экономики в долгосрочной перспективе и целевое воспроизводство запасов определено выше 50 % от погашения. Поэтому для МПГ геологоразведочные работы за средства федерального бюджета проводятся в ограниченном объёме и основной прирост запасов обеспечивается недропользователями. В 2021 г., по данным ФТС России, объём экспорта МПГ из РФ в натуральном выражении составил 145,5 т, в денежном 8,5 млрд долл.

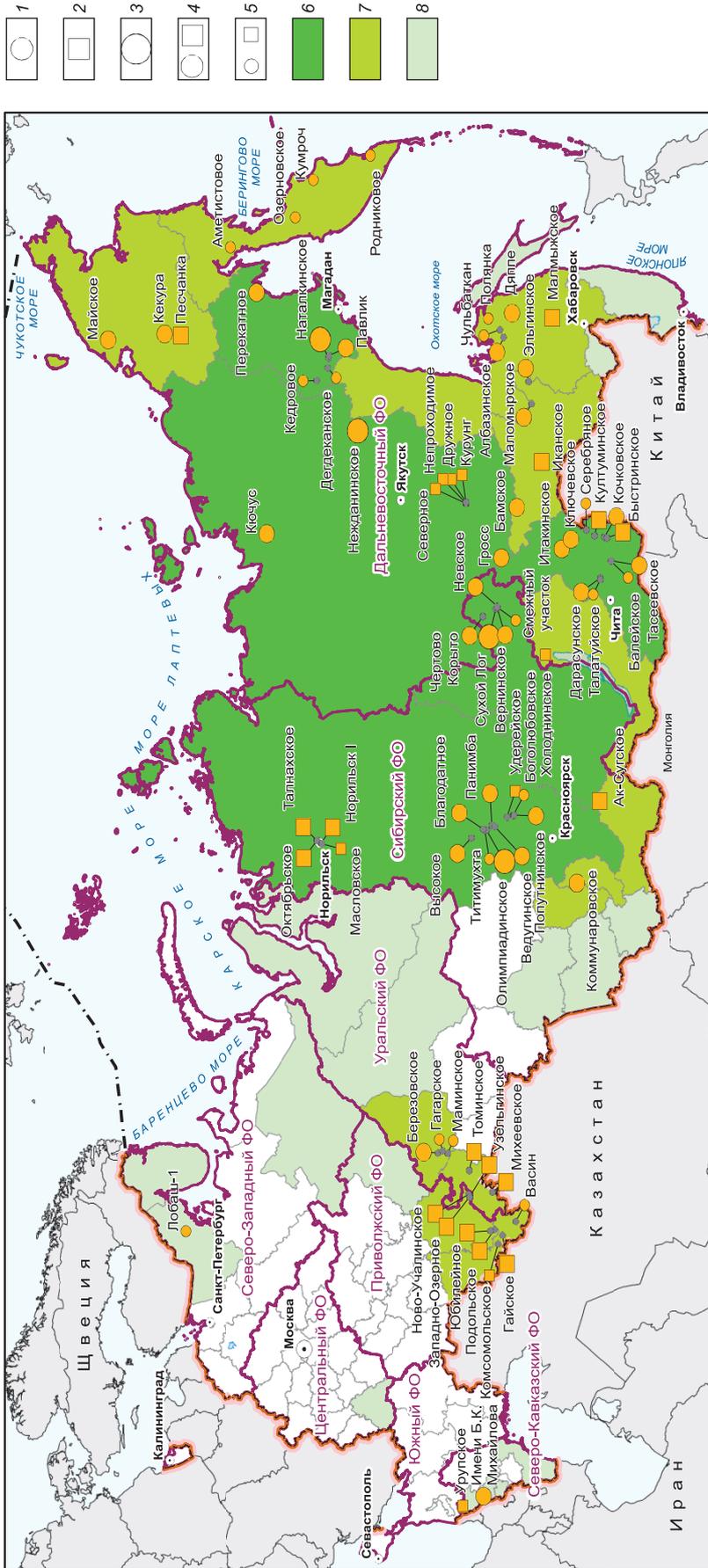
Серебро по «Стратегии...» относится к той же группе, что и золото – для них необходимо обеспечить стопроцентное воспроизводство запасов. Поэтому проведение геологоразведочных работ на поиски собственно серебряных и золото-серебряных месторождений является весьма актуальным, как и поиски серебросодержащих комплексных рудных месторождений. По данным ФТС России, в 2021 г. объём экспорта серебра из РФ в натуральном выражении составил 964,7 т, в денежном 0,7 млрд долл.

Высокая значимость благородных металлов для экономики Российской Федерации определяет интерес к их МСБ со стороны Государства и крупных горнодобывающих компаний. Стабильный спрос на золото, МПГ и серебро на рынке позволяет прогнозировать увеличение интереса недропользователей к проведению геологоразведочных работ для выяв-

ления, оценки и разведки новых месторождений и добыче этих металлов в ближайшие годы и в долгосрочной перспективе.

**Минерально-сырьевая база золота.** Основу минерально-сырьевой базы золота Российской Федерации (балансовые запасы категорий АВС<sub>1</sub> С<sub>2</sub> по состоянию на 01.01.2021 г.) составляют рудные месторождения – собственно золоторудные (68,6 %) и комплексные (24,1 %). Хотя, в отличие от большинства золотоносных районов мира, значительная доля балансовых запасов сосредоточена и в россыпных месторождениях – 7,3 % (таблица 1). На рис. 1 показано расположение на территории РФ наиболее крупных месторождений – собственно золоторудных и комплексных золотосодержащих с балансовыми запасами АВС<sub>1</sub> + С<sub>2</sub> более 30 т. Также приведено состояние в целом балансовых запасов золота по субъектам РФ – они в основном сосредоточены в Дальневосточном, Сибирском и Уральском федеральных округах. Большая их часть находится в распределённом фонде недр, лишь для запасов категорий АВС<sub>1</sub> + С<sub>2</sub> россыпных месторождений доля нераспределённого фонда ещё значительна – 40,4 % (см. табл. 1). Следует отметить, что за последние годы доля запасов в распределённом фонде для собственно золоторудных и россыпных месторождений непрерывно возрастает (с 01.01.2017 г. по 01.01.2021 г. соответственно с 70,1 до 91,2 % и с 53,8 до 59,6 % [3, 4]). Для комплексных месторождений существенных изменений не отмечено, некоторое снижение с 90,7 до 89,2 % вызвано аннулированием лицензии по медно-порфировому с попутным золотом и серебром месторождению Иканское.

Значительное возрастание доли балансовых запасов в распределённом фонде собственно золоторудных месторождений обусловлено, прежде всего, переводом в него месторождения Сухой Лог. Следует также отметить, что эта доля на 01.01.2022 г. ещё увеличится в связи с состоявшимся в конце 2021 г. аукционом на право пользования недрами на месторождении Кючус. А на 01.01.2023 г. ожидается увеличение доли распределённого фонда и для комплексных месторождений – в феврале 2022 г. Култуминское месторождение по результатам аукциона было передано в недропользование. Таким образом, в 2022 г. по существу завершена передача в распределённый фонд почти всех значимых месторождений рудного золота. Перспективы лицензирования двух оставшихся в нераспределённом фонде недр крупных месторождений пока неясны: у собственно золоторудного Балейского существуют экологические проблемы (осушение затопленного цианистыми растворами карьера) и необходимость переселения домохозяйств и переноса кладбища г. Балей; у медно-



Территориальное распределение балансовых запасов золота на 01.01.2021 г.

Месторождения	ДВФО		СФО		ПФО		УФО		СЗФО		СКФО*		ЦФО	
	ABC <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>												
Собственно золоторудные	3031	2295	2554	2161	34	98	143	135	1	50				
Комплексы золотосодержащие	677	769	523	343	829	145	107	159	14	22	9	86	4	6
Россыпные	672	107	136	73	12	2	65	11	44	1	0,03	0,02		

Примечание. \* В 2021 г. на Госбаланс поставлено значимое собственное золоторудное месторождение «Имени Б. К. Михайлова» с запасами кат. ABC<sub>1</sub> 8,2 т, C<sub>2</sub> 69,8 т.

Рис. 1. Схема территориального размещения запасов и основных месторождений МСБ золота РФ:

месторождения рудного золота: 1 – собственные, 2 – комплексные; крупность: 3 – уникальные, 4 – крупные, 5 – средние, 6 – от 1000, 7 – 100 – < 1000, 8 – < 100

1. Состояние МСБ золота России на 01.01.2021 г.

Запасы на 01.01.2021, тыс. т			
Категории (количество месторождений):	ABC <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	ABC <sub>1</sub> +C <sub>2</sub>
Золоторудные собственные (439)	5,763	4,744	10,507
Россыпные (5451)	0,928	0,194	1,122
Комплексные: медные, никелевые и др. (181)	2,163	1,529	3,692
Общие (6071)	8,854	6,467	15,321
Распределённый фонд запасов на 01.01.2021, %			
Золоторудные собственные	90,8	91,6	91,2
Россыпные	56,3	75,4	59,6
Комплексные	93,1	83,8	89,2
Всего	87,7	89,3	88,4
Прогнозные ресурсы, тыс. т (на 01.01.2021)			
Категории:	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>
Золоторудные (1357)	6,5	11,7	26,5
Россыпные (118)	0,2	0,2	0,5
Общие (1475)	6,8	11,9	27,0

Примечание. Источники: ГБЗ РФ, Сборник «Прогнозные ресурсы твёрдых и твёрдых горючих полезных ископаемых РФ».

порфиrowого Иканского – худшие экономические параметры относительно известных месторождений указанного типа, переданных в освоение. Кроме того, остаётся в нераспределённом фонде участок месторождения Наталкинское с балансовыми запасами 353,3 т, однако указанный объект нельзя рассматривать в качестве самостоятельного, и, вероятно, в перспективе он будет лицензирован компанией ПАО «Полюс», осуществляющей промышленное освоение основной части запасов месторождения.

Относительно пониженная востребованность россыпных месторождений с балансовыми запасами обусловлена преобладанием в нераспределённом фонде недр малорентабельных или нерентабельных объектов, характеризующихся низкими содержаниями золота и (или) сложными условиями отработки (большая мощность перекрывающих отложений, высокая обводнённость, неблагоприятные климатические условия и др.).

На рис. 2 наглядно видна динамика изменения балансовых запасов золота с 2004 (на 01.01.2005 г.) по 2020 г. (на 01.01.2021 г.) с выделением всех трёх групп месторождений – собственно золоторудных, комплексных золотосодержащих и россыпных. В последние годы в целом сохраняется тенденция к наращиванию суммарных запасов, хотя по каждой группе отмечаются свои «нюансы», которые мы более подробно рассмотрим ниже.

*Собственно золоторудные месторождения.* Запасы собственно золоторудных месторождений в России с 2004 г. значительно возросли (рис. 3, А), но с 2017 г. наметилась отчётливая стагнация этого процесса – на фоне возрастающей добычи золота её объём почти сравнялся с величиной прироста балансовых запасов. Сравнение двух диаграмм (динамики общих запасов и их приростов по годам) на рис. 3, А отчётливо показывает, что, кроме такого общего показателя «стагнации» прироста запасов, весьма настораживающим является факт, что в значительной степени прирост запасов обеспечивают (около 55 %) доразведка и переоценка известных с советских времён месторождений, прежде всего, уникальных – Сухого Лога, Наталки, Олимпиады, Нежданинского. Доразведка и переоценка именно этих месторождений обусловила скачкообразное возрастание балансовых запасов золота в РФ в 2006, 2007, 2009, 2016, 2020 годах. Эти объекты в последние годы настолько хорошо изучены, что ожидать от них дальнейшего существенного вклада в МСБ золота в РФ вряд ли целесообразно. Напротив, возможно и сокращение запасов – в 2021 г. на Нежданинском месторождении, по результатам переоценки, отмечена убыль запасов на 51,99 т. Соответственно, риск сокращения ежегодных приростов запасов становится очевидным, учитывая, что разведка большей части месторождений проведена после 2005 г. (нами отнесены к категории «новых», см. рис. 3, А, Б),

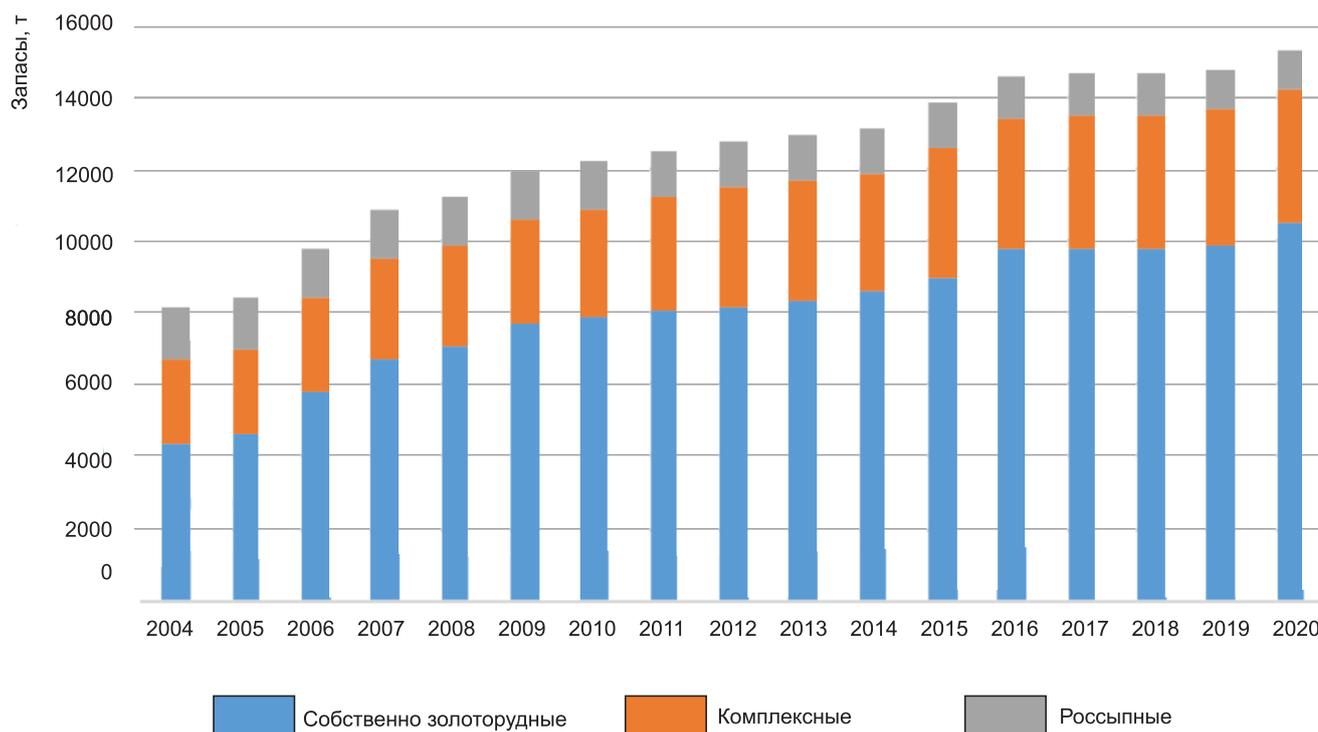


Рис. 2. Динамика запасов золота  $ABC_1 + C_2$  в 2004–2020 годах собственно золоторудных, комплексных и россыпных месторождений

и как перспективные рудопроявления они были выявлены ещё в советское время.

Важным представляется ещё один аспект: начиная с 2009 г. рост общих балансовых запасов золота собственно золоторудных месторождений обеспечивается увеличением запасов непромышленной категории  $C_2$ , тогда как запасы промышленных категорий  $ABC_1$  почти не возрастают (в 2015, 2016 и 2020 гг. они возросли в основном за счёт доразведки Вернинского и Олимпиадинского месторождений) (см. рис. 3, А).

*Комплексные месторождения.* В целом положительная динамика балансовых запасов комплексных золоторудных месторождений (рис. 4, А) также отличается «скачкообразностью» за счёт подготовки запасов на «новых» (постановка запасов на баланс после 2005 г.), но в основном давно известных комплексных рудных объектах – золото-урановых, формирующих Эльконскую группу (Элькон, Курунг и др.), золото-медно-порфировых – Песчанки, Томинского, Иканского, Малмыжского (см. рис. 4, Б). Что касается Малмыжского месторождения, поисковые и оценочные работы с подготовкой запасов на котором проводила компания «Amur minerals», определившая, по мнению некоторых авторов, перспективность этой площади на выявление порфирового месторо-

ждения, то следует отметить, что, согласно Государственному кадастру месторождений и проявлений, прогноз на выявление здесь молибден-медно-порфирового месторождения с первой оценкой прогнозных ресурсов меди (около 3,3 млн т) и молибдена (136 тыс. т) был выполнен В. А. Ловягиным в 1991 г. Позднее эта рекомендация была поддержана В. А. Кондратьевой (1992) и Ю. П. Змиевским (1999).

Однако в последние годы на фоне возрастающей добычи общие балансовые запасы почти не возрастают, в отдельные годы даже происходит их снижение (см. рис. 4, А).

Как и для собственно золоторудных месторождений настораживающим моментом в структуре балансовых запасов золота в комплексных золоторудных месторождениях является большая доля в их структуре запасов непромышленной категории  $C_2$  (см. рис. 4, А).

*Россыпные месторождения.* Общие запасы россыпного золота промышленных категорий непрерывно снижаются (рис. 5) за счёт сокращения запасов промышленных категорий  $ABC_1$ . Запасы категории  $C_2$  ежегодно незначительно возрастают. Объём списания балансовых запасов в последние годы сохраняется приблизительно на одном уровне (82,5–84 т). Это связано с тем, что Роснедра разрешило в ряде случаев осуществлять добычу из техногенных

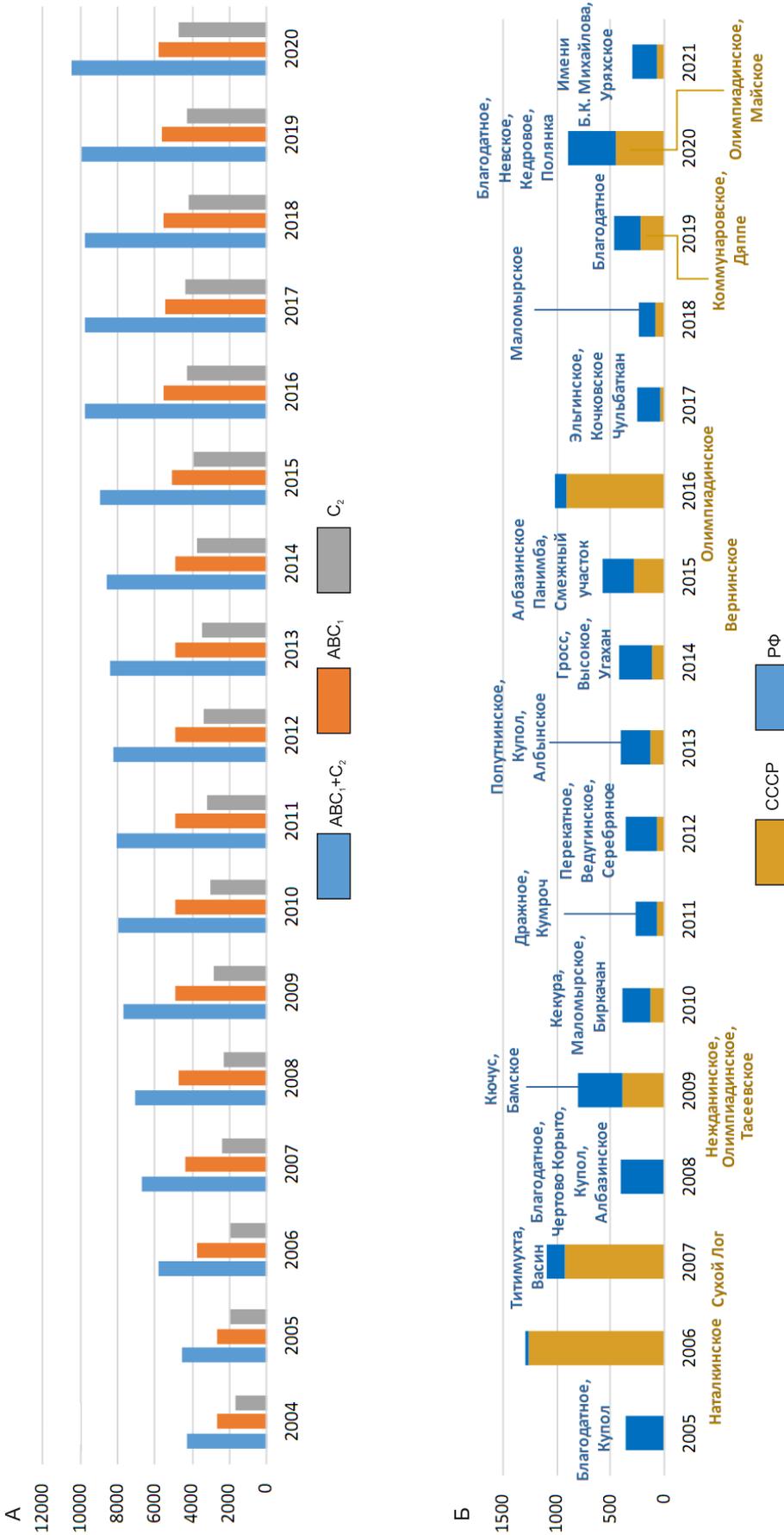


Рис. 3. Динамика суммарных запасов золота ABC<sub>1</sub> + C<sub>2</sub> собственно золоторудных месторождений (А), прирост суммарных запасов золота ABC<sub>1</sub> + C<sub>2</sub>, поставленных на баланс в СССР и РФ (Б). Данные на 2021 год на основе протоколов ФБУ «ГКЗ»; список месторождений, обеспечивших основной вклад в прирост

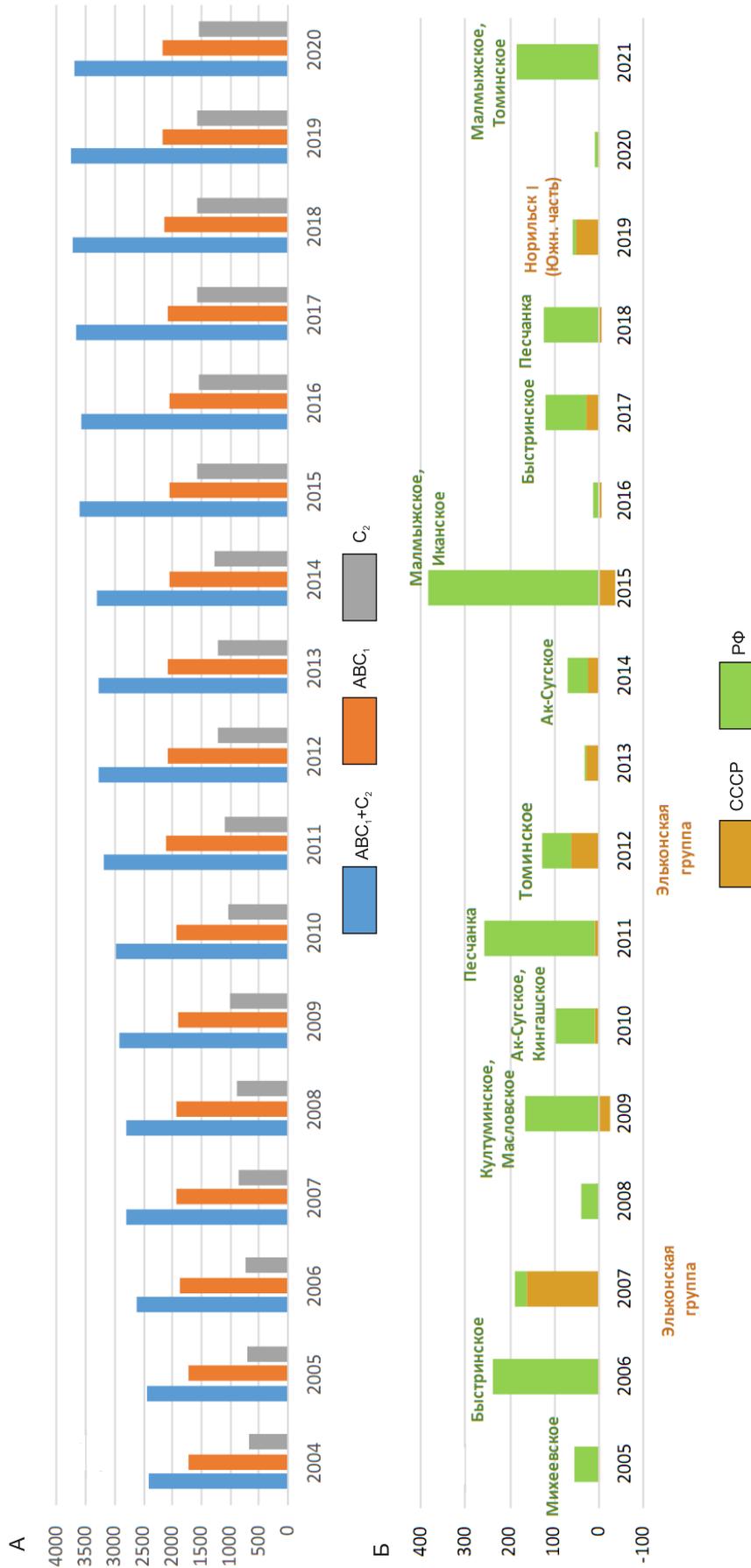


Рис. 4. Динамика суммарных запасов золота ABC<sub>1</sub> + C<sub>2</sub> комплексных золоторудных месторождений (А); прирост суммарных запасов золота ABC<sub>1</sub> + C<sub>2</sub> поставленных на баланс в СССР и РФ (Б). Данные на 2021 год на основе протоколов ФБУ «ГКЗ»; список месторождений, обеспечивших основной вклад в прирост

россыпных месторождений без предварительной постановки запасов на баланс: постановка запасов на баланс и одновременное их списание с баланса производится в конце каждого года по форме 5-ГР. Таким образом, эти запасы не учитываются Госбалансом.

*Прогнозные ресурсы.* Минерально-сырьевая база кроме запасов включает и апробированные прогнозные ресурсы золота, представленные в Сборнике прогнозных ресурсов, выпускаемом ФГБУ «Росгеолфонд». Состояние прогнозных ресурсов золота на 01.01.2021 г. в золоторудных и россыпных месторождениях приведено в таблице 1, динамика с 2010 г. по 2021 г. – на рис. 6. Апробированные прогнозные ресурсы россыпного золота (см. табл. 1) носят условный характер, так как в связи с отсутствием работ по их апробации и актуализации в последние годы в Сборнике прогнозных ресурсов они практически не изменяются и по совокупности объектов не превышают 0,22 тыс. т по каждой из наиболее достоверных категорий  $P_1$  и  $P_2$ , малодостоверная категория  $P_3$  содержит 0,53 тыс. т. Суммарно величина прогнозных ресурсов на 01.01.2021 г. составляет 45,7 тыс. т. Однако следует отметить, что около 60 % из них составляют малодостоверные прогнозные ресурсы категории  $P_3$  (см. табл. 1).

Как нами уже было показано ранее [2–4], хотя величина прогнозных ресурсов довольно значительна,

при их пересчёте в условные запасы (после проведения дальнейших поисковых и оценочных работ) с использованием статистически рассчитанных коэффициентов они не могут обеспечить воспроизводство запасов золота и последующую добычу на длительную перспективу.

*Перспективы МСБ золота в РФ.* Таким образом, несмотря на внешне благополучное состояние (рост балансовых запасов золота в РФ (см. рис. 2), существует ряд проблем, которые в скором времени могут привести к их сокращению:

1. Как уже нами отмечалось [3], весьма значительная доля запасов собственно золоторудных месторождений сосредоточена в четырёх уникальных по запасам месторождениях – Сухом Логе, Наталкинском, Олимпиадинском и Нежданинском. На 01.01.2021 г. она составляет: по запасам промышленных категорий  $ABC_1$  – 56,9 %, категории  $C_2$  – 38,2 %, суммарно от  $ABC_1 C_2$  – 48,4 %, забалансовых – 36,5 %. А от общих балансовых запасов золота по категориям  $ABC_1$  и  $C_2$  соответственно около 37 и 28 %.

В связи с этим МСБ России весьма чувствительна к возможной переоценке запасов этих месторождений. А компании, ведущие их промышленное освоение, в планировании своей деятельности, в том числе и для привлечения заёмного капитала, помимо отечественной системы учёта оценивают запасы

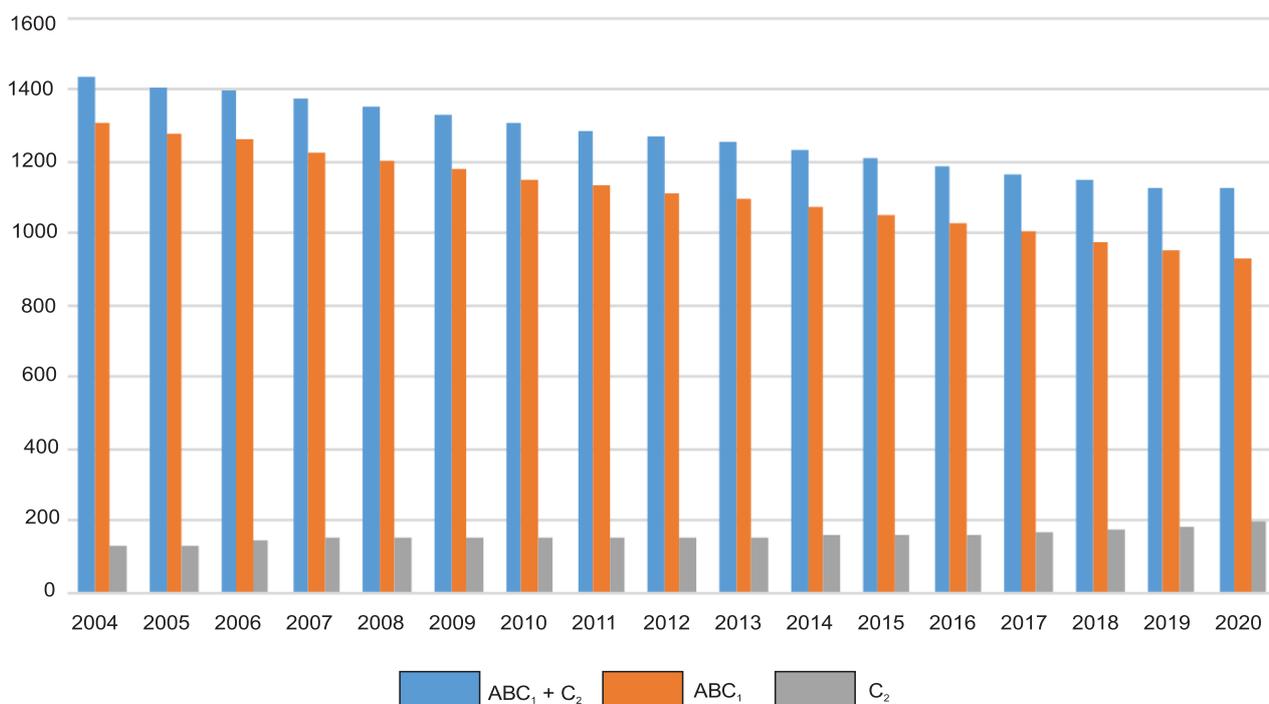


Рис. 5. Запасы золота россыпных месторождений РФ

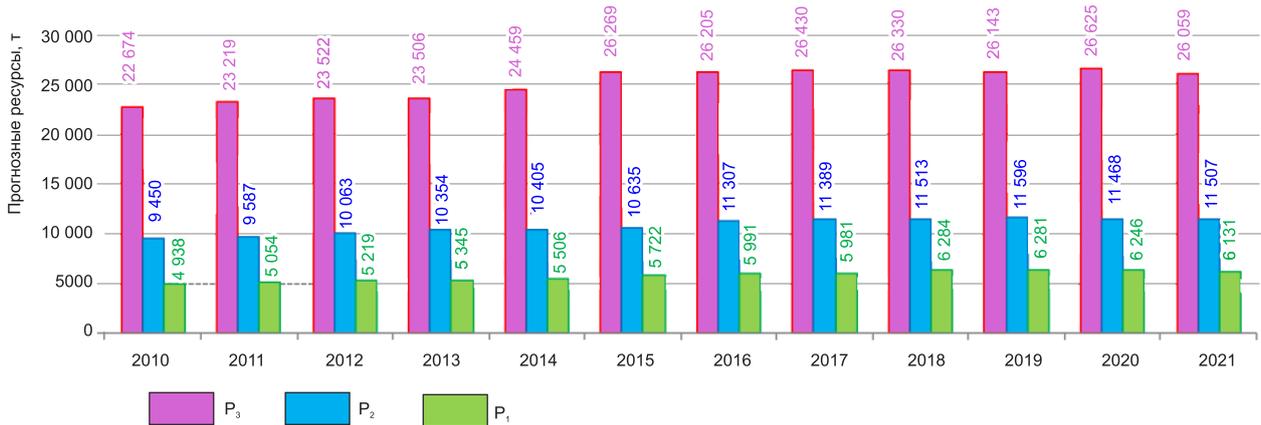


Рис. 6. Динамика прогнозных ресурсов золота в 2010–2021 гг. золота по категориям

и ресурсы активов с использованием зарубежных систем их классификации (JORC и др.), что отражается на изменении масштаба месторождений. Так, на Наталкинском месторождении, где запасы по категории  $ABC_1 + C_2$  составляют 1449 т, при переходе на оценку по JORC (2012) доказанные и вероятные запасы (proved and probable) оценены всего в 435 т. На Олимпиадинском соответственно 1054 и 715 т [5], Нежданинском 642 и 131 т [6].

На месторождении Сухой Лог в настоящее время готовится банковское ТЭО проекта (Bankable Feasibility Study), публикация ожидается во второй половине 2022 г. [7], по результатам которой запасы также могут измениться по сравнению с текущими: оценка вероятных запасов (пред ТЭО – PFS) ПАО «Полюс» в 2020 г. 40 млн унций – 1244 т [5], балансовые запасы кат.  $ABC_1 + C_2$  соответственно составляют 1943 т. Кроме того, как отмечалось выше, перспективы подготовки значительных балансовых запасов на этих месторождениях за счёт доразведки неочевидны из-за высокой степени их изученности. Также следует учитывать, что почти на всех этих месторождениях начнутся (Сухой Лог – на 2027 г. запланирован выпуск первого золота) или будут усилены (Олимпиада, Наталка, Нежданинское) добычные работы в значительных объёмах, в результате чего балансовые запасы будут погашаться и, соответственно, снижаться.

2. Балансовые запасы, которые могут быть подготовлены за счёт проведения геологоразведочных работ на объектах распределённого фонда недр (объектах из Сборника прогнозных ресурсов), согласно приведённым ранее расчётам [3, 4], составят 30–40 т в год.

3. Балансовые запасы категории  $C_2$ , прирост которых довольно значителен (см. табл. 1, рис. 3) и которые обычно ставятся на Госбаланс на стадиях оценки

или предварительной разведки, в результате более детальных разведочных работ зачастую сокращаются за счёт того, что в их контурах выделяются более локальные блоки с запасами промышленных категорий для проведения эксплуатационных работ.

4. Забалансовые запасы, очевидно, являются определённым резервом пополнения МСБ золота – при некоторых условиях (повышение цены золота, появление новых более экономичных технологий добычи и обогащения и др.) они могут быть переведены в балансовые. Однако их количество не столь велико – в целом по РФ на 01.01.2021 г. составляет 3427 т. Причём прогнозировать, какая их часть и в какой временной период может стать балансовой, в настоящее время сложно.

5. При оценке перспектив наращивания или стабилизации МСБ золота следует также учитывать, что подавляющее количество золоторудных месторождений, отнесённых нами к категории «новых» (см. рисунки 3, Б и 4, Б), на самом деле, как рудопроявления с прогнозными ресурсами (как апробированными, так и авторскими) выявлены во времена СССР. То есть до сих пор для подготовки балансовых запасов в РФ используется советский «поисковый задел», который практически иссяк.

6. В последние два десятилетия изучение перспективных площадей и подготовка прогнозных ресурсов рудного золота осуществлялась в основном при проведении поисковых работ за средства федерального бюджета. При этом выбор перспективных площадей для проведения таких работ осуществлялся и продолжает осуществляться на основе анализа геологических, геофизических и геохимических материалов, полученных в результате геологоразведочных работ в советский период. Но в условиях исчерпания поискового задела советского времени качество

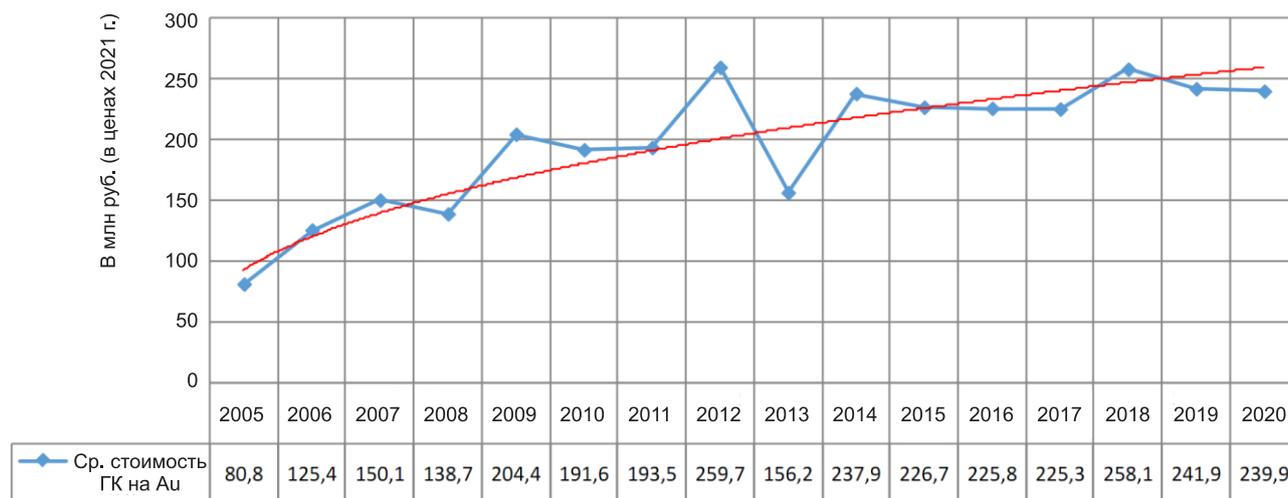


Рис. 7. Динамика средней стоимости завершённых Госконтрактов ГРР на золото в период 2005–2020 гг. (в ценах 2021 г.). Приняты коэффициенты инфляции по данным Росстата

(перспективность и изученность) площадей ежегодно снижается по мере отбора для проведения поисковых работ самых лучших из имеющегося банка участков. Это приводит к удорожанию ГРР и постоянному росту стоимости (с учётом инфляции) госконтрактов на поисковые работы (рис. 7). Одновременно происходит и снижение результативности завершённых ГРР на золото, оценённой при пересчёте апробированных прогнозных ресурсов ( $P_1 + 0,6 P_2$ ) в условные запасы золота с использованием статистически

рассчитанных коэффициентов (рис. 8) [3, 4]. Если в первые годы рассматриваемого периода 2005–2020 гг. в результате выполненного комплекса ГРР ежегодный прирост условных запасов золота был на уровне 400–700 т, то в последние годы этот уровень не достигает 200 т.

Это происходит на фоне снижающегося бюджетного финансирования геологоразведочных работ как на твёрдые полезные ископаемые (ТПИ) в целом, так и на золото (рис. 9), для которого это снижение

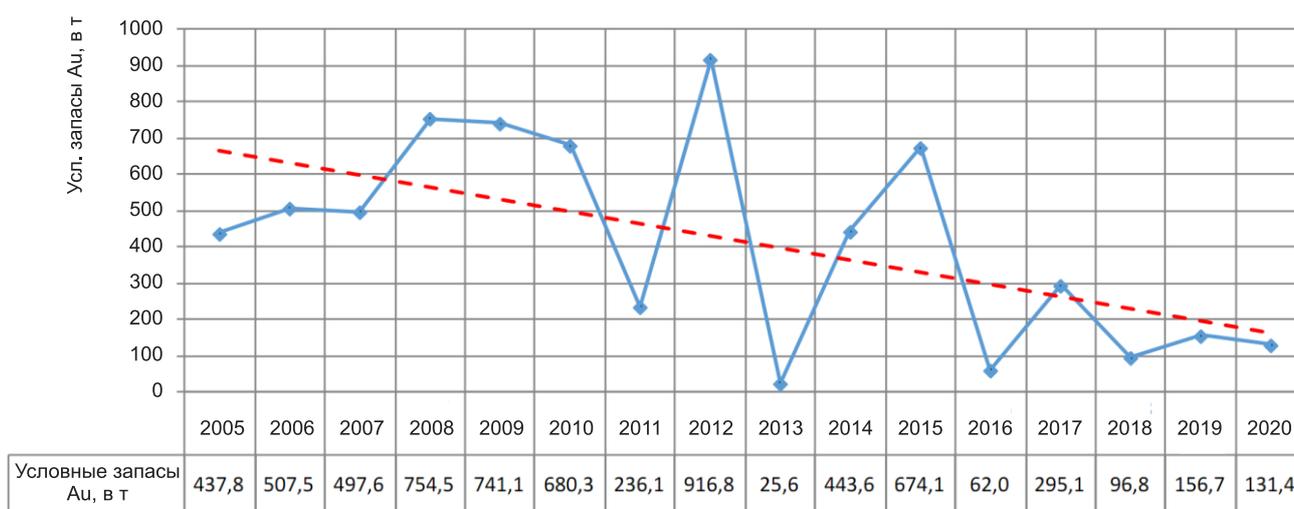


Рис. 8. Динамика полученных условных запасов золота ( $P_1 + 0,6P_2$ ) в период 2005–2020 гг. по завершённым Госконтрактам на золото

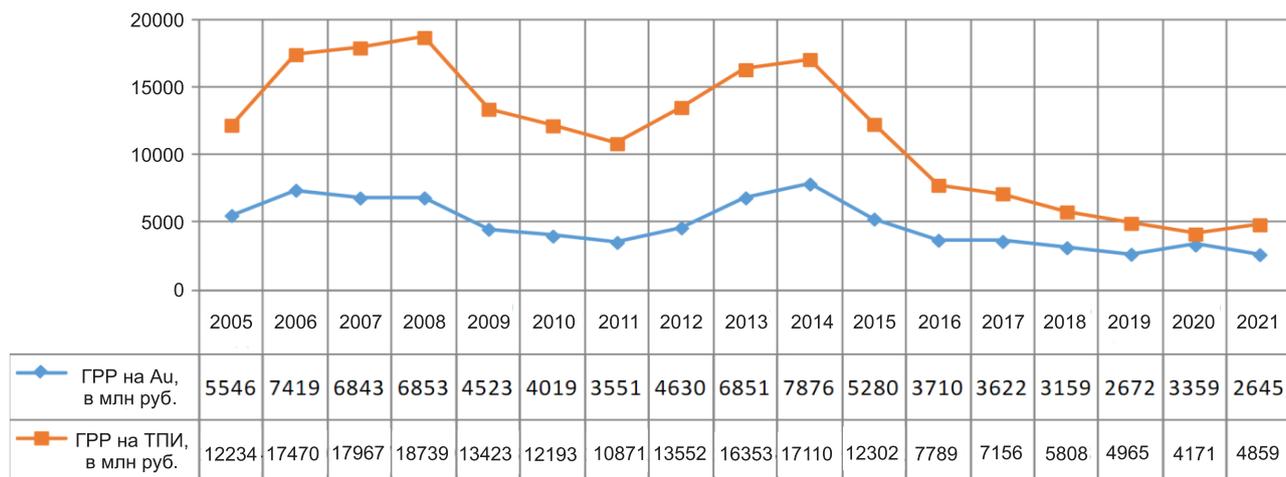


Рис. 9. Динамика бюджетного финансирования ГРР на ТПИ и золото в период 2005–2020 гг. (в ценах 2021 г.). Приняты коэффициенты инфляции по данным Росстата

не компенсируется возрастанием его относительной доли по сравнению с другими видами ТПИ в среднем с 33 % в 2009–2011 гг. до 59 % в прошедшие пять лет (рис. 10). Скачкообразные изменения доли финансирования золота за последние 4 года связаны с изменчивостью величины «неисполненных обязательств» исполнителей работ с соответствующим переносом финансирования на следующий год.

7. Обозначенные проблемы воспроизводства МСБ золота неоднократно озвучивались на протяжении последних лет [2–4 и др.]. И в связи с тем, что воз-

можности федерального бюджета по наращиванию финансирования ГРР на твёрдые полезные ископаемые, в том числе на золото, ограничены, с 2014 г. введён в действие «заявительный принцип» лицензирования на геологическое изучение недр с целью поисков и оценки месторождений с последующим оформлением «факта их открытия» и лицензии на разведку и добычу. За прошедшие 8 лет на золото по «заявительному принципу» выдано 5215 лицензий (4151 на россыпное золото и 1064 на коренное), и этот процесс в целом происходит с положительной динамикой

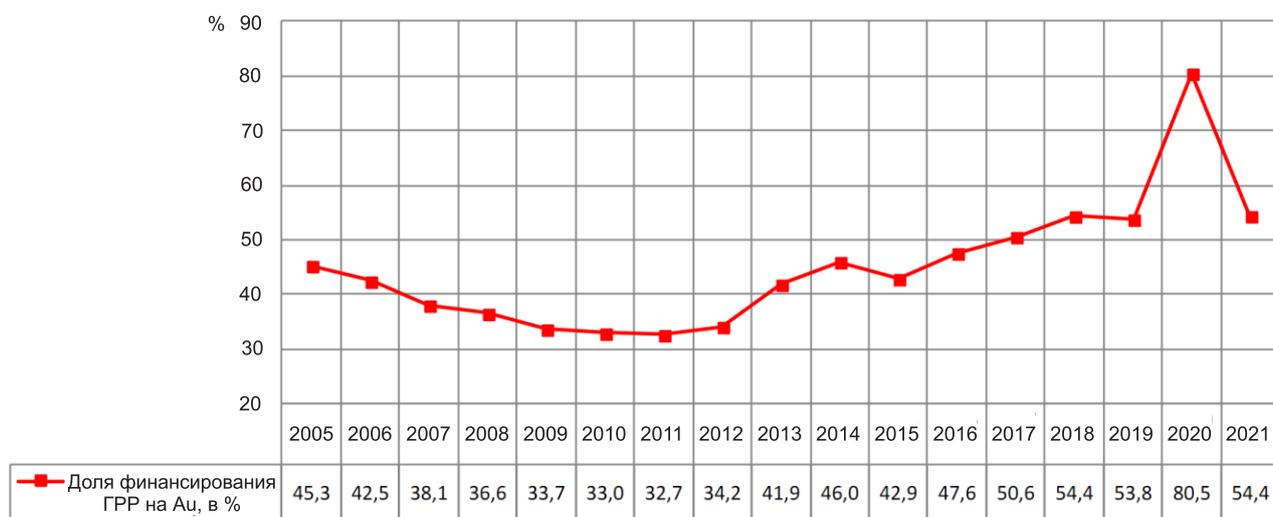


Рис. 10. Доля бюджетного финансирования ГРР на Au относительно общей стоимости ГРР на ТПИ

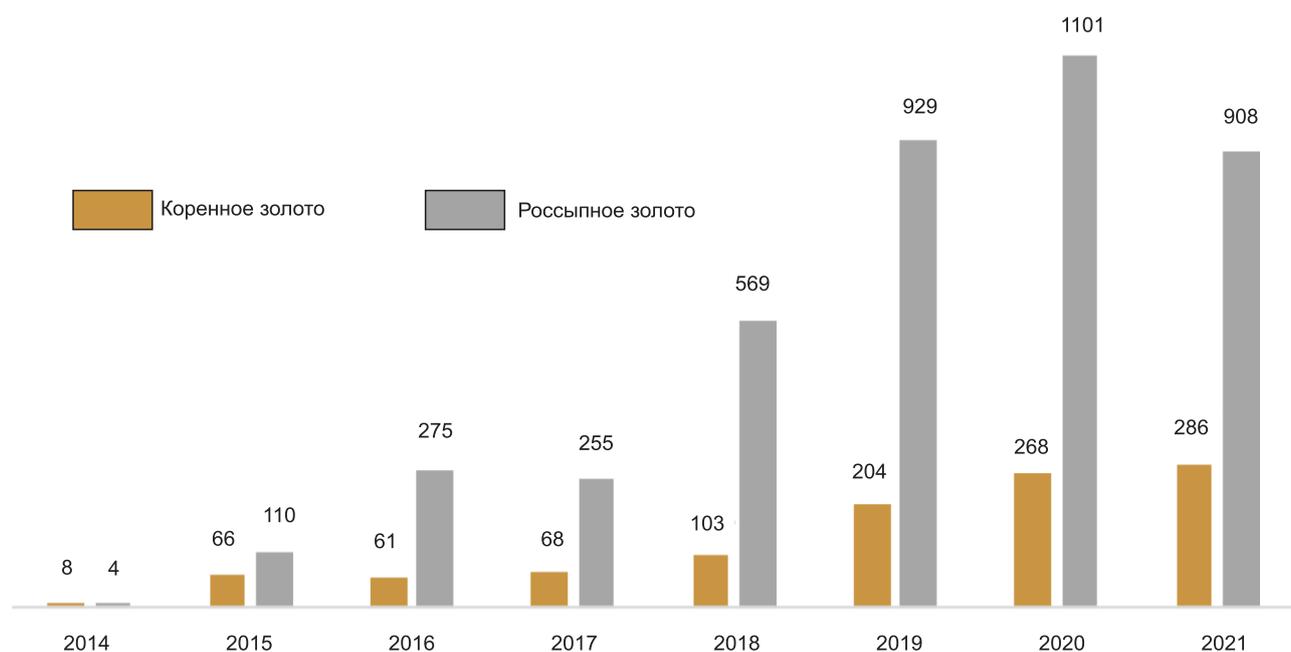


Рис. 11. Динамика заявок и выданных лицензий по «заявительному принципу» в 2014–2021 гг.

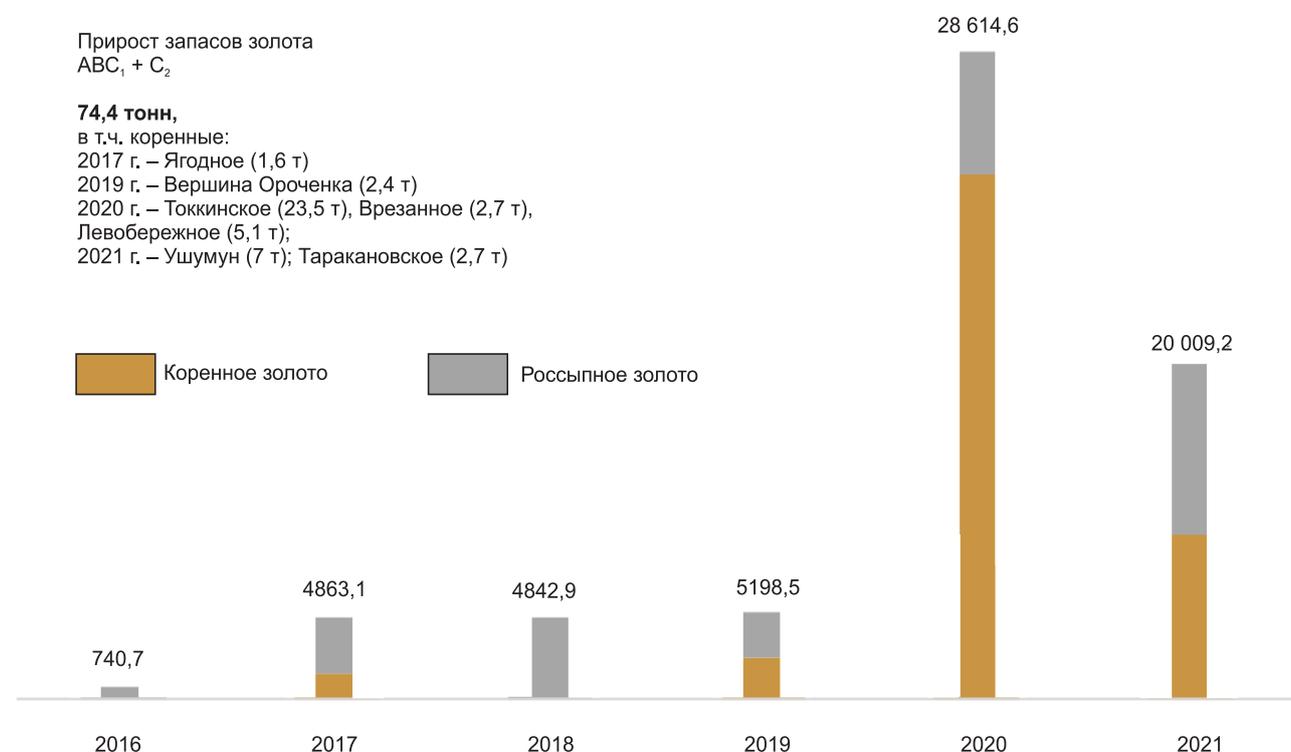


Рис. 12. Динамика постановки на баланс запасов золота по результатам ГРП

(рис. 11). Однако на 01.01.2022 г. в результате работ по «заявительному принципу» подготовлены лишь 74,4 т балансовых запасов, в том числе 45 т по семи коренным объектам (рис. 12). Самым крупным из коренных месторождений является Токкинское, запасы которого (23,5 т) составляют более половины суммарных запасов коренных месторождений, и которое, по существу, является западным флангом золоторудного кластера Гросс (удалённость от месторождений Высокое, Тёмное, Таборное около 6 км, согласно ФГИС «АСЛН»). А остальные коренные объекты мелкие, и, таким образом, на настоящий момент можно констатировать невысокую эффективность «заявительного принципа» лицензирования по выявлению новых месторождений и подготовке балансовых запасов золота [1]. Я. В. Алексеевым и И. В. Поповым причины этого рассматривались подробно [1], главные из них – отсутствие эффективного механизма финансирования ГРП и их слабая геологическая обеспеченность. Хотя также необходимо иметь в виду, что в мировом опыте, по разным оценкам, количество успешных проектов на «зелёных» площадях при поисках золоторудных месторождений составляет 2–4 %, а по

нашим расчётам [4], статистическая вероятность выявления месторождений (в основном мелких) за 2002–2015 гг. на наиболее перспективных площадях с прогнозными ресурсами категории  $P_3$  при поисковых работах за средства федерального бюджета составила 16 %. Поэтому при оптимистичном расчёте, даже если на 10 % лицензий, выданных по «заявительному принципу» (на 106 из 1064), будут выявлены промышленные рудные объекты со средними запасами 6,5 т (см. рис. 12 – поставлено на баланс 45 т запасов на семи месторождениях), их суммарные запасы могут составить около 700 т – менее чем на два года добычи при её современном объёме. А учитывая, что большая часть площадей с какими-либо (установленными в советский период) поисковыми признаками на коренное оруденение уже залицензированы, объёмы лицензирования на рудное золото по «заявительному принципу», вероятно, в ближайшие годы будут сокращаться.

9. В последние годы, в том числе из-за высокой стоимости золота на мировом рынке, непрерывно возрастает добыча золота в РФ из всех типов месторождений (рис. 13), и, как отмечалось выше, она имеет

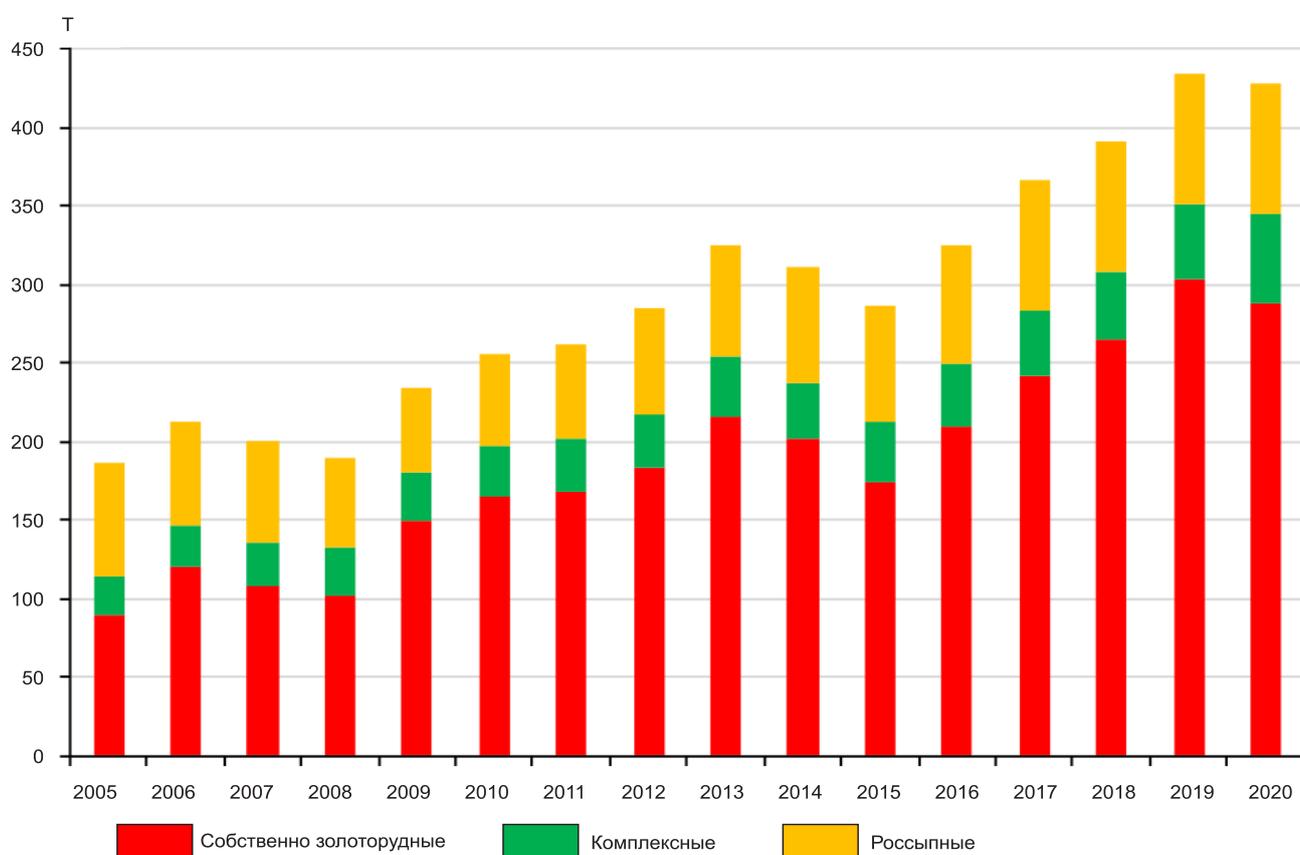
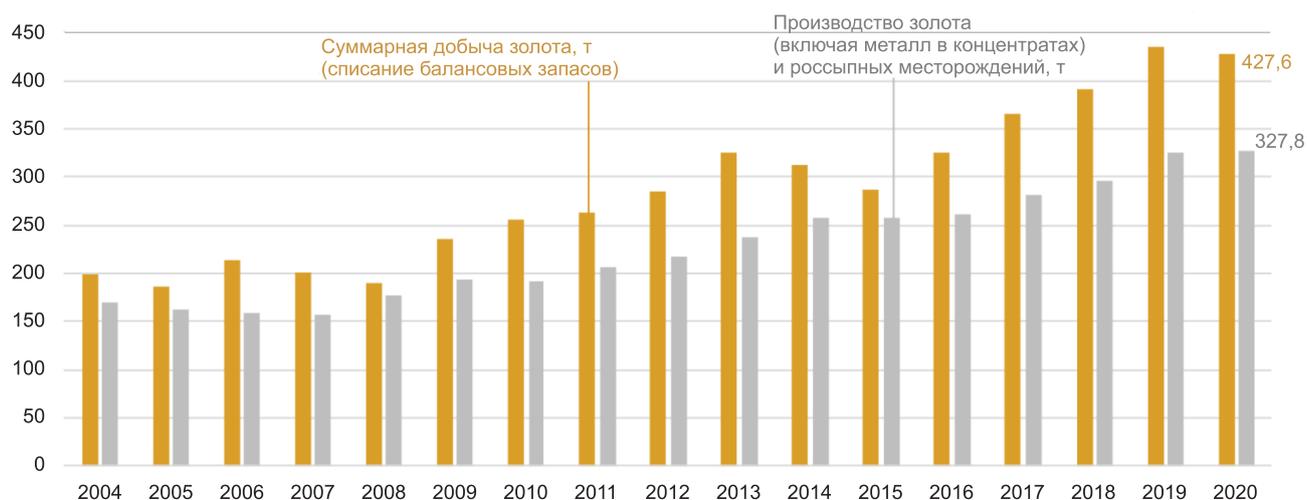


Рис. 13. Динамика добычи золота (списания балансовых запасов) в России по типам месторождений



**Рис. 14. Суммарные добыча и производство золота из золоторудных и россыпных месторождений в РФ.** Среднее извлечение золота за период 2004–2020 гг. составило (в %) чуть менее 80, в 2004 г. – 84,9, а в 2021 г. – 76,7; в 2020 г. в России было произведено 308,6 т золота (аффинаж из минерального сырья (добычное и попутное), кроме того выпуск золота в концентратах составил 19,2 т; из вторичного металла (скрапа) на аффинажных заводах было получено ещё 31,6 т; источники: добыча – ГБЗ РФ; производство – Союз золотопромышленников России, Минфин России, ПРАЙМ, отчётность добывающих компаний (ПАО «Полюс», Polymetal International plc и др.)

тенденцию на дальнейшее увеличение и в ближайшие годы, прежде всего за счёт крупных месторождений, запасы которых начнут снижаться. То есть очевидна тенденция к превышению добычи над постановкой на баланс новых запасов.

10. Одной из проблем, влияющих на эффективность добычных работ, являются высокие потери золота на стадии добычи. На рис. 14 на одной диаграмме совмещены добыча (списание балансовых запасов) и производство золота в целом из всех типов месторождений. Разница между этими двумя величинами – потери золота при разработке. Частично это потери в недрах, основные же потери связаны со стадией переработки – то есть технологические потери. Причём с 2004 г. до 2020 г. среднее извлечение золота снизилось с 84,9 до 76,7 %, то есть потери в целом возрастают, что обусловлено несколькими причинами. Во-первых, снижается в общем объёме добычи относительная доля россыпного золота, а так как технологические потери при россыпной золотодобыче значительно ниже, чем при переработке руд, увеличиваются и средние потери. Во-вторых, ухудшается качество руд в связи с вовлечением в разработку месторождений с труднообогатимыми рудами с соответствующим снижением извлечения золота. Это касается как собственно золоторудных месторождений, так и, особенно, комплексных объектов.

**Резюме.** Несмотря на перечисленные выше проблемы МСБ золота в Российской Федерации, в ближайшие годы прогнозируется дальнейшее увеличение производства золота в России из минеральных месторождений, в том числе за счёт начала или усиления эксплуатационных работ на ряде месторождений (Наталкинское, Быстринское, Нежданинское, Олимпиадинское, Сухой Лог и др.). Однако уже в обозримой перспективе при настоящей ситуации с подготовкой прогнозных ресурсов и запасов золота начнётся снижение общих балансовых запасов, а затем и добычи.

Для изменения возможной отрицательной тенденции в производстве золота в России необходимо выявление новых золоторудных месторождений, для чего требуется значительно увеличить работы ранних стадий для выявления рудопроявлений и подготовки прогнозных ресурсов, а затем и балансовых запасов. В связи с исчерпанием поискового задела советского периода необходимо внедрение в практику новых методов прогнозирования и поисков. Это обусловлено тем, что при предшествующих ГРП те или иные поисковые признаки были выявлены прежде всего на относительно открытых территориях. Для значительной части золотоперспективных регионов характерны сложные горно-таёжные ландшафты, где рудоносные структуры перекрыты чехлом рыхлых отложений различного генезиса и где стандартные методы

поисков (геологические маршруты, литохимическое опробование по вторичным ореолам рассеяния) неэффективны. В этом случае особую роль приобретают прогнозно-металлогенические исследования для локализации перспективных участков и структур, в том числе перекрытых, с целью концентрации в их пределах геологоразведочных работ. Данные исследования ещё более важны для поисков скрытых золоторудных месторождений в условиях, когда для большинства типов золоторудных объектов отсутствуют прямые геофизические методы поисков. Для заверки прогнозных построений и выделения перспективных участков для поисковых работ необходимо введение в действие стадии «прогнозно-минерагенические работы».

По мнению авторов, не смотря на действие «заявительного принципа лицензирования», для решения этой проблемы затраты федерального бюджета на работы ранних стадий (прогнозно-минерагенические и поисковые) должны значительно возрасти, причём одной из главных их задач должно быть восполнение банка перспективных участков («поискового задела») для последующих работ недропользователей.

**Минерально-сырьевая база металлов платиновой группы.** По состоянию на 01.01.2021 г. МСБ металлов платиновой группы (МППГ) включает 146 месторождений (35 коренных и 111 россыпных) с общими балансовыми запасами 15 897,93 т, в том числе: 11 384,23 т кат. ABC<sub>1</sub> и 4513,69 т кат. C<sub>2</sub>; 1067,5 т забалансовых.

Добыча МППГ в 2020 г. составила 148,7 т.

Ведущее значение в балансовых запасах и добыче МППГ в российской МСБ, как и в мировой, принадлежит коренным месторождениям (99,7 %) при весьма скромной роли россыпных (0,3 %) (таблица 2).

В балансовых запасах (кат. ABC<sub>1</sub> + C<sub>2</sub>) коренных месторождений основными компонентами являются палладий (72,5 % запасов) и платина (22,7 %) при соотношении 3,2:1; прочие платиноиды – попутные: родий (2,1 %), рутений (1,8 %), иридий (0,5 %), осмий (0,4 %). В россыпях, где заключено всего 0,3 % запасов, доминирует платина (96,1 % шлиха), запасы остальных МППГ составляют менее 4 %, в том числе (в %): палладий – 1,8, иридий – 1,3, осмий – 0,4, родий – 0,3, рутений – 0,1 (см. табл. 2, рис. 15, А1 и А2).

Основу МСБ составляют 22 комплексных медно-никелевых месторождения – 96 % балансовых запасов, 9 собственных месторождений МППГ включают 3,5 % балансовых запасов; на долю остальных трёх МППГ-содержащих месторождений приходится всего 0,2 % (медно-платиновое 0,13 %, ванадиево-железо-медное – 0,08 % и уран-ванадиевое – 0,01 %).

Балансовые запасы МППГ учтены на территориях одиннадцати субъектов шести Федеральных округов; добыча осуществляется в шести субъектах четырёх Федеральных округов. Основная часть запасов сконцентрирована в месторождениях Красноярского края (95,6 % российских). Относительно крупные запасы разведаны в объектах Мурманской области (3,7 %).

## 2. Состояние минерально-сырьевой базы МППГ РФ на 01.01.2021 г.

Россия, субъект РФ, типы месторождений	Количество месторождений	Запасы на 01.01.2021, т					Добыча 2020 г., т	
		кат. ABC <sub>1</sub>	кат. C <sub>2</sub>	Забаланс.	Кат. ABC <sub>1</sub> +C <sub>2</sub> всего	%	всего	%
Всего Россия	146	11 384,23	4513,69	1067,50	15 897,93	100	148,681	100
Коренные, в том числе:	35	11 351,21	4503,95	1035,92	15 855,17	99,73	148,212	99,68
собственные платинометалльные	9	271,024	292,95	106,915	563,97	3,55		
комплексные, в том числе:	26	11 080,19	4211	929,011	15 291,19	96,18	148,212	99,68
медно-никелевые	22	11 072,52	4183,76	851,206	15 256,28	95,96	148,062	99,58
медно-платинометалльные	1	7,667	12,995	2,092	20,662	0,13		
ванадиево железо-медные	1	0	12,83	46,923	12,83	0,08	0,15	0,1
уран-ванадиевые	1	0	1,418	0	1,418	0,01		
медно-сульфидные	1			28,79				
Россыпные, в том числе	111	33,02	9,74	31,57	42,76	0,27	0,469	0,32
собственно платиновые	59	30,31	9,33	30,5	39,64	0,25	0,436	0,29
золотоносные с платиной	23	0,38	0,05	0,04	0,43	0,002		
платино-золотоносные	21	2,34	0,22	1,03	2,55	0,02	0,024	0,02
алмазонасные с платиной	8		0,14	0	0,14	0	0,009	0,01

На территории остальных субъектов учтено около 0,7 % российских запасов: Свердловская область – 0,22 %, Хабаровский край – 0,18 %, Амурская область – 0,10 %, Республика Карелия – 0,09 %, Камчатский край – 0,08 %, Воронежская область – 0,05 %. Совсем незначительные запасы учтены в Пермском крае (0,003 %) и Республике Саха (0,001 %), в Забайкальском крае учтены забалансовые запасы МПГ.

В Красноярском крае запасы МПГ сосредоточены в 10 коренных медно-никелевых месторождениях (из них 3 месторождения с забалансовыми запасами); запасы 3 россыпей составляют около 0,01 % балансовых.

Коренные месторождения Красноярского края располагаются в Норильском (8 месторождений, в том числе 3 – с забалансовыми запасами) и Кингашском рудных районах, входят в группу Главнейших месторождений платиноидов России и существенно различаются масштабами запасов, составом руд и содержанием в них МПГ.

Балансовые запасы месторождений Норильского района составляют: Октябрьское – 33,53 % запасов кат. АВС<sub>1</sub> + С<sub>2</sub> России, Талнахское – 26,74 %, Норильск I – 20,63 %, Масловское – 9,57 %, Черногорское – 3,34 %. Средние содержания МПГ в сплошных и «медистых» рудах составляют 10–12 г/т (выделяются в запасах Талнахского и Октябрьского месторождений), во вкрапленных – 3,5–6 г/т.

Запасы месторождений Кингашского района составляют: Верхнекингашское – 1,02 %, Кингашское – 0,75 %. Руды относятся к вкрапленному типу, среднее содержание на порядок ниже норильских объектов – 0,5–0,6 г/т.

Основные запасы Мурманской области (94 % субъекта) и Республики Карелия (99,1 %), напротив, представлены малосульфидными платинометалльными рудами.

В Мурманской области к крупным месторождениям МПГ относится Федорова Тундра, к средним – Киевей, Мончетундровское и Северный Каменник, мелкое – Чуарвы Восточное. Средние содержания по объектам варьируют от 1,5 до 8,4 г/т МПГ, отношение палладия к платине – 2–7:1; в качестве извлекаемых компонентов в рудах также учтены запасы золота, серебра, никеля и меди. Медно-никелевые месторождения Печенгского рудного района включают 6 % балансовых запасов, но обеспечивают всю добычу МПГ в субъекте. Руды преимущественно вкрапленные с содержаниями, не превышающими сотых и десятых долей г/т.

В Республике Карелия в крупном месторождении Викша (155 т), новые запасы которого утверждены ФБУ «ГКЗ» по состоянию на 01.01.2021 г. (протокол № 6697) и пока не отражены в данных Госбаланса

РФ, сосредоточено более 97 % их количества от субъекта. Средние содержания платины – 0,3 г/т, палладия – 0,9 г/т, в качестве извлекаемых компонентов в рудах также учтены запасы золота, серебра и меди.

Запасы сульфидных медно-никелевых руд с попутными платиноидами (около 0,15 %) учтены также на территории Воронежской (Еланское и Елкинское, средние содержания 0,13 г/т) и Амурской (Кун-Манье – 0,345 г/т) областей, в Камчатском крае (Шануч – 0,62 г/т).

На Урале разведано среднее по запасам МПГ Волковское ванадиево-железо-медное месторождение с попутным палладием в рудах и мелкое Вересоборское коренное платиновое месторождение в дунитах.

В Хабаровском крае среди дунитов щёлочно-ультраосновного массива Кондер выявлен новый для России рудно-формационный тип месторождений МПГ – медно-платинометалльные руды в флогопитизированных титаномагнетитовых клинопироксенитах.

Среди россыпных месторождений МПГ выделяются собственно платиновые (среднее содержание в запасах – 0,26 г/м<sup>3</sup>), платино-палладиевые (7,5 г/м<sup>3</sup>) и комплексные россыпи трёх промышленных типов: платино-золотоносные (0,08 г/м<sup>3</sup>), золотоносные с содержаниями платины (0,007 г/м<sup>3</sup>) и алмазоносные с содержаниями платины (0,007 г/м<sup>3</sup>). Основные запасы сосредоточены в собственно платиновых россыпях Камчатского, Хабаровского, Пермского краёв, Свердловской области и платино-палладиевых россыпях Красноярского края. Запасы платино-золотоносных и золотоносных россыпей с содержаниями платины (Свердловская область) и алмазоносных россыпей с содержаниями платины (Республика Саха (Якутия)) составляют около 10 % запасов россыпей.

В 2020 г. из недр было добыто 148,7 т платиноидов – на 1,8 т (1,2 %) больше, чем в прошлом году. Добыча из коренных месторождений (148,2 т) выросла на 2,1 т (1,4 %), из россыпей (469 кг) уменьшилась на 35,5 %. Кроме того, на техногенных объектах было получено 6,3 т – на 6,9 % больше, чем в 2019 году (5,9 т).

Велась разработка 41 месторождения: 8 коренных и 33 россыпных, при этом 99,3 % добычи металлов платиновой группы было обеспечено разработкой трёх медно-никелевых месторождений Норильского рудного района: Октябрьского, Талнахского и Норильск I. Добыча остальной части платиноидов распределяется между Мурманской (0,25 %), Свердловской областями (0,2 %), Хабаровским (0,2 %) и Камчатским (0,02 %) краями. Незначительное количество попутной платины (9 кг) получили на алмазоносных россыпях Республики Саха (Якутия).

Приросты запасов кат. АВС<sub>1</sub> за 2020 год в целом по России составили 109,3 т МПГ, из них 75,7 т за счёт

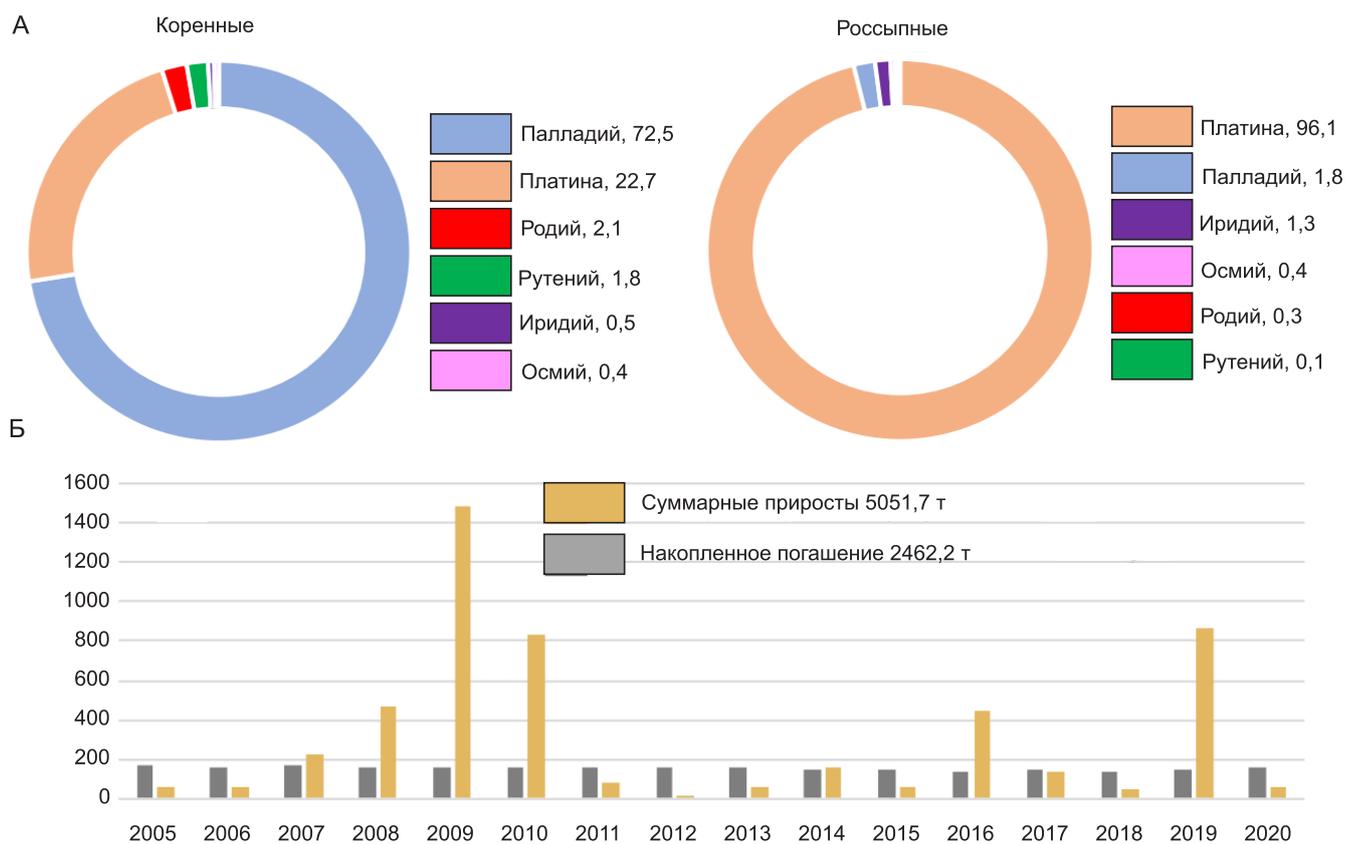


Рис. 15. Структура российских запасов МПГ (А – коренные и россыпные) и динамика прироста запасов и их погашения (Б – все типы)

разведки главным образом на Октябрьском и Талнахском месторождениях (перевод из категории  $C_2$ ) и 33,7 т при переоценке Северной части месторождения Норильск I. Из общего прироста запасов за счёт разведки около 89,9 % получено на разрабатываемых коренных (85,8 %) и россыпных (4,1 %) месторождениях. Постановка на учёт нового медно-платинометалльного месторождения Кондёр в Хабаровском крае (7,7 т) обеспечила 10,1 % за счёт разведки и 7 % общего прироста запасов за 2020 год.

В целом запасы МПГ категорий  $ABC_1$  по состоянию на 01.01.2021 г. с учётом разведки, переоценки, добычи и потерь при добыче в 2020 г. уменьшились на 43 т, категории  $C_2$  – на 54 т по сравнению с годом ранее.

В 2021 г., по результатам доразведки, отмечен прирост запасов на месторождении Викша по категории  $ABC_1 + C_2$  145 т, в том числе по кат.  $ABC_1$  92,7 т и участке Рудный Чинейского месторождения (Забайкальский край), соответственно 156,2 т и 38,3 т, что в сумме (301,2 т) выше достигнутого в 2020 г. (152,4 т) и ожидаемого (142–145 т) в 2021 г. уровня их

погашения в целом по РФ, а также отвечает тенденции устойчивого состояния МСБ МПГ по соотношению прироста и погашения запасов (см. рис. 15, Б).

Прогнозные ресурсы МПГ как поисковый задел локализованы только в расслоенных массивах Имандра-Варзуской металлогенической зоны Мурманской области (Мончегорский, Мончетундровский, Федорово-Панский) и в Северо-Карельской металлогенической зоне Республики Карелия (Луккулайсварский). Частично ресурсы (Рудопроявление Нюд-Морошковое, лицензия действует до 26.04.2022 г.) переданы недропользователю (АО «Росгео») для проведения поисковых работ (57,3 т  $P_1$  и 32,6 т  $P_2$ ). Среди объектов нераспределённого фонда недр наиболее крупные ресурсы категории  $P_1$  локализованы в пределах Мончегорского рудного района на рудопроявлениях Поаз (363,6 т – 2020 г.) и Ниттис-Кумужья-Травяная (66 т – 2018 г.). Подобные расслоенные базит-гипербазитовые массивы с необходимым набором признаков их платиноносности на остальной территории России неизвестны, и перспективы локализации прогнозных ресурсов платиноидов

в других регионах страны с учётом современного уровня геологической изученности пока отсутствуют.

**Резюме.** Российская сырьевая база металлов платиновой группы и существующее производство товарной продукции высокой степени передела значительны по своим масштабам, однако практически целиком сосредоточены в пределах Норильского горнорудного района, обеспеченного разведанными запасами более чем на 80 лет.

Крупные запасы высококачественных сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд месторождений Норильского рудного района, разрабатываемых и подготавливаемых к освоению ПАО «ГМК «Норильский никель»», позволят компании и дальше оставаться лидером в стране и одним из ведущих поставщиков продукции высокого передела на миро-

вой рынок. Установившееся доминирование единственного продуцента будет сохраняться.

Основные перспективы роста добычи и производства МПГ на предприятиях, не относящихся к действующим, связаны с освоением Черногорского месторождения и южной части месторождения Норильск I, реализацией которого занимается холдинг ООО «Русская платина». Другие недропользователи осваивают месторождения с существенно более бедными рудами, а планируемые объёмы добычи несопоставимо меньше текущих. Кроме того, некоторые объекты находятся в слабо освоенных районах вдали от горнопромышленных центров, что требует либо поиска перерабатывающих предприятий, либо организации производства непосредственно в местах добычи (таблица 3).

### 3. Перспективы прироста запасов МПГ РФ, включая результаты их государственной экспертизы за 2021 г.

Малосульфидного платинометалльного ГПТ	
Объекты распределённого фонда	
Разведываемые месторождения с балансовыми запасами	Федорова Тундра, Северный Каменник, Мончетундровское, Викша (ООО «Семченское золото (Polymetal International plc) в 2021 г. получен прирост запасов кат. АВС <sub>1</sub> + С <sub>2</sub> : МПГ 145 т, в т.ч. палладия 106,8 т, платины 38,2 т, а также золота 19 т, серебра 44 т, меди 110 тыс.т.
Рудопроявления с апробированными ПР	Рудопроявления Западно-Панского рудного поля (34 т кат. P <sub>1</sub> + P <sub>2</sub> ), рудопроявление Нюд-Морошковое (87 т кат. P <sub>1</sub> + P <sub>2</sub> ) Мончегорского рудного поля
Объекты с авторскими ПР	Площадь Лосевых Тундр (36 т кат. P <sub>2</sub> )
Объекты нераспределённого фонда	
Месторождения с балансовыми запасами	Вурчуйвенч, Чуарвы Восточное, Киевей
Рудопроявления с апробированными ПР	Луккулайсваарское рудное поле (27 т кат. P <sub>2</sub> ), Восточно-Панское рудное поле (85 т кат. P <sub>1</sub> + P <sub>2</sub> ), рудопроявление Поаз (283 т кат. P <sub>1</sub> + P <sub>2</sub> )
Объекты с авторскими ПР	Волчьетундровский массив (106 т кат. P <sub>1</sub> + P <sub>2</sub> ) Пудожгорский габбро-долеритовый массив (более 100 т)
Медно-никелевого и медно-сульфидного* ГПТ	
Объекты распределённого фонда	
Подготавливаемые к освоению и разведываемые месторождения с балансовыми запасами	Еланское, Ёлкинское, Тундровое, Верхнее, Быстринское, Масловское, Черногорское, Кингашское, Верхнекингашское, Кун-Манье, Чинейское месторождение уч. Рудный (медно-сульфидного) (ОАО «Забайкалстальинвест») в 2021 г. получен прирост запасов кат. АВС <sub>1</sub> + С <sub>2</sub> : МПГ 156,2 т, в т.ч. палладия 130,3 т, платины 25,9 т, а также золота 18,8 т, серебра 279,7 т, меди 775 тыс.т
Рудопроявления с апробированными ПР	Рудопроявления Южнокамчатского рудного района (40 т кат. P <sub>2</sub> )
Объекты нераспределённого фонда	
Месторождения Норильского типа с забалансовыми запасами	Норильск II (83 т), Горозубовское (93 т), Средне-Вологачанская пл. (354 т)
Рудопроявления с апробированными ПР	Рудопроявление НКТ (73 т кат. P <sub>1</sub> + P <sub>2</sub> ) Мончегорского рудного поля Карикъяврское рудное поле (18 т кат. P <sub>1</sub> + P <sub>2</sub> )

*Примечание.* \* отмечено отдельно.

На современном уровне изученности территории страны единственным регионом, обладающим необходимыми условиями образования собственных месторождений МПГ, является Карело-Кольский. Однако, ресурсный потенциал малосульфидного платинометалльного геолого-промышленного типа как по количеству, так и по качеству не может обеспечить значительного прироста запасов за счёт выявления новых месторождений.

В ближайшей и среднесрочной перспективе прирост запасов МПГ будет осуществляться за счёт геологоразведочных работ на разрабатываемых и подготавливаемых к освоению медно-никелевых месторождениях, главным образом Норильского района, и разведываемых малосульфидных платинометалльных месторождениях – Мурманской области и Республики Карелия.

**Минерально-сырьевая база серебра.** МСБ серебра РФ (рисунки 16, 17, таблица 4) определена двумя основными группами коренных месторождений: собственно серебряными и серебряносодержащими комплексными. Первая группа представлена двумя типами месторождений – серебряными и золото-серебряными, сосредоточенными на Дальнем Востоке – Республике Саха (Якутия) 54,37 % балансовых запасов категории  $ABC_1 + C_2$ , Магаданской области 39,38 %, Приморском 5,78 %, Камчатском 0,3 % и Хабаровском 0,17 % краях. Вклад этой группы в общие запасы серебра РФ по категории  $ABC_1 + C_2$  составляет 20 % (см. табл. 4).

Вторая группа представлена комплексными серебряносодержащими месторождениями, среди которых основные запасы металла учтены на семи типах месторождений (в сумме по категории  $ABC_1 + C_2$  71,52 % от РФ): медистых песчаников, медноколчеданном, сульфидном медно-никелевом, свинцово-цинковом, полиметаллическом, медно-порфиоровом, собственно золоторудном. Медистые песчаники представлены единственным Удоканским месторождением в Забайкальском крае. Медноколчеданные месторождения локализованы на Южном Урале (Республика Башкортостан и Оренбургская область), сульфидные медно-никелевые – в Норильском промышленном районе, свинцово-цинковые и полиметаллические – в Красноярском, Алтайском, Забайкальском краях и Республике Бурятия, медно-порфиоровые – в Чукотском АО, Челябинской области, Хабаровском крае. На многочисленных собственно золоторудных месторождениях, на которых серебро учтено в качестве попутного компонента, запасы локализованы в основном в регионах Дальневосточного (10 165,8 т) и Сибирского (2440,3 т) федеральных округов. Наиболее крупными по запасам этого типа являются Нежданинское месторождение (2343,4 т; в 2021 г., по результа-

там переоценки, произошло их снижение на 362,5 т), Сухой Лог (1533,3 т), Хаканджинское (1087,2 т).

Ещё 8,45 % общероссийских запасов числятся на месторождениях прочих типов, среди которых наиболее значимым (более 1000 т) является скарновый медно-магнетитовый (в сумме 1,7 % от РФ), представленный Быстринским и Култуминским месторождениями в Забайкальском крае.

Госбалансом также учитываются россыпные месторождения серебра, где металл представлен попутно. Их влияние на состояние и развитие МСБ серебра в целом незначительно. Кроме того, на государственном учёте числятся 12 техногенных месторождений серебра, образованных при процессах переработки руд серебряносодержащих месторождений.

Запасы серебра основных типов характеризуются достаточно высоким уровнем лицензирования (в зависимости от категории выше 82,2 %), при этом отдельные типы полностью переданы в освоение. Исключением является полиметаллический тип, так как в нераспределённом фонде недр находится Холдинское месторождение (3536,8 т), расположенное в центральной экологической зоне озера Байкал, где запрещена добычная деятельность.

Уровень вовлечённости переданных в освоение запасов (отношение добычи к запасам) зависит от стадий освоения конкретных месторождений, составляя на собственно серебряных объектах в среднем 0,7 % (серебряный) и 6,3 % (золото-серебряный тип), на основных серебряносодержащих он варьирует от 0,02 (медистые песчанки и сланцы) до 4,2 % (полиметаллический).

При этом среди собственно серебряных месторождений для золото-серебряного типа отмечена наибольшая диспропорция между долей запасов и добычи в целом от РФ – 7,1 и 22,7 %. Это вызвано сосредоточением всей добычи на месторождениях Дукацкое, Лунное, Арылахское в Магаданской области, осуществляемой АО «Серебро Магадана», структурным подразделением компании Polymetal International plc, а также высокой концентрацией (88,2 %) в регионе запасов этого типа от РФ. Если в ближайшие годы не будут выявлены новые крупные месторождения, а добыча на указанных объектах будет осуществляться в объёмах согласно утверждённым проектам, в среднесрочной перспективе в Магаданской области произойдёт сокращение запасов. Соответственно, снизится добыча, и ведущая роль в ней в РФ перейдет к Республике Саха (Якутия), где учтено 84,5 % запасов месторождений серебряного типа РФ. Часть из них (Вертикальное, Верхне-Менкече) находится в начальной стадии разработки, другие (Прогноз) подготавливаются к освоению. Фактором усиления позиции республики

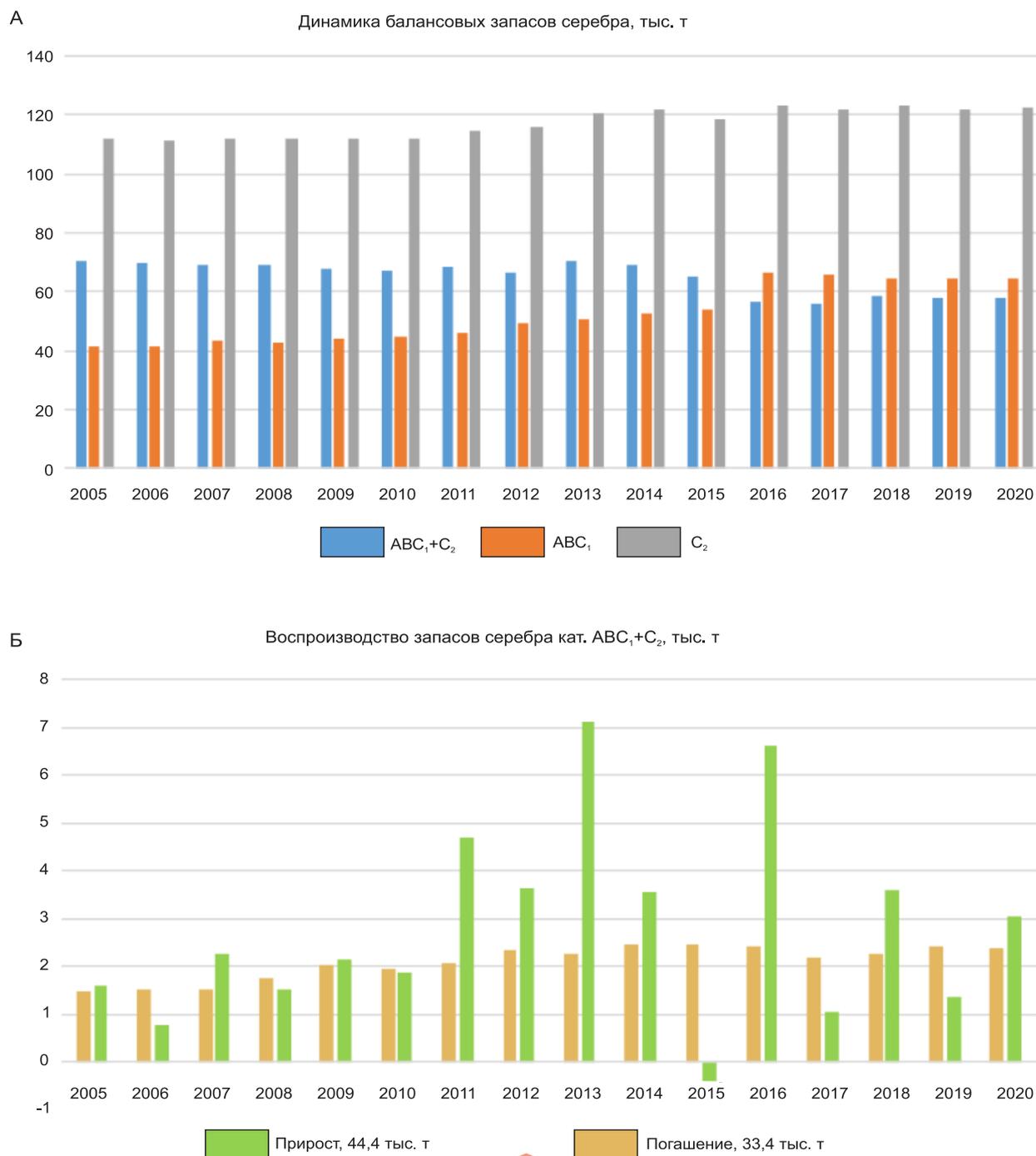


Рис. 16. Динамика изменения запасов серебра (А), их погашения и прироста (Б)

в формировании нового центра добычи серебра является её значительный ресурсный потенциал относительно других субъектов РФ, позволяющий нарастить запасы. Так, в 2021 г. по результатам поисковых и оценочных работ АО «Прогноз» в пределах Эндьбальской площади, для которой апробированы прогнозные ресурсы серебра, поставило на учёт Манга-

зейское серебряное месторождение, балансовые запасы серебра которого составляют 125,6 т, забалансовые – 171,2 т. Также на месторождении в качестве попутных компонентов оценены свинец и цинк. Ранее, в 2012 г., компания в границах указанной площади выявила и поставила на учёт запасы серебряного месторождения Вертикальное.

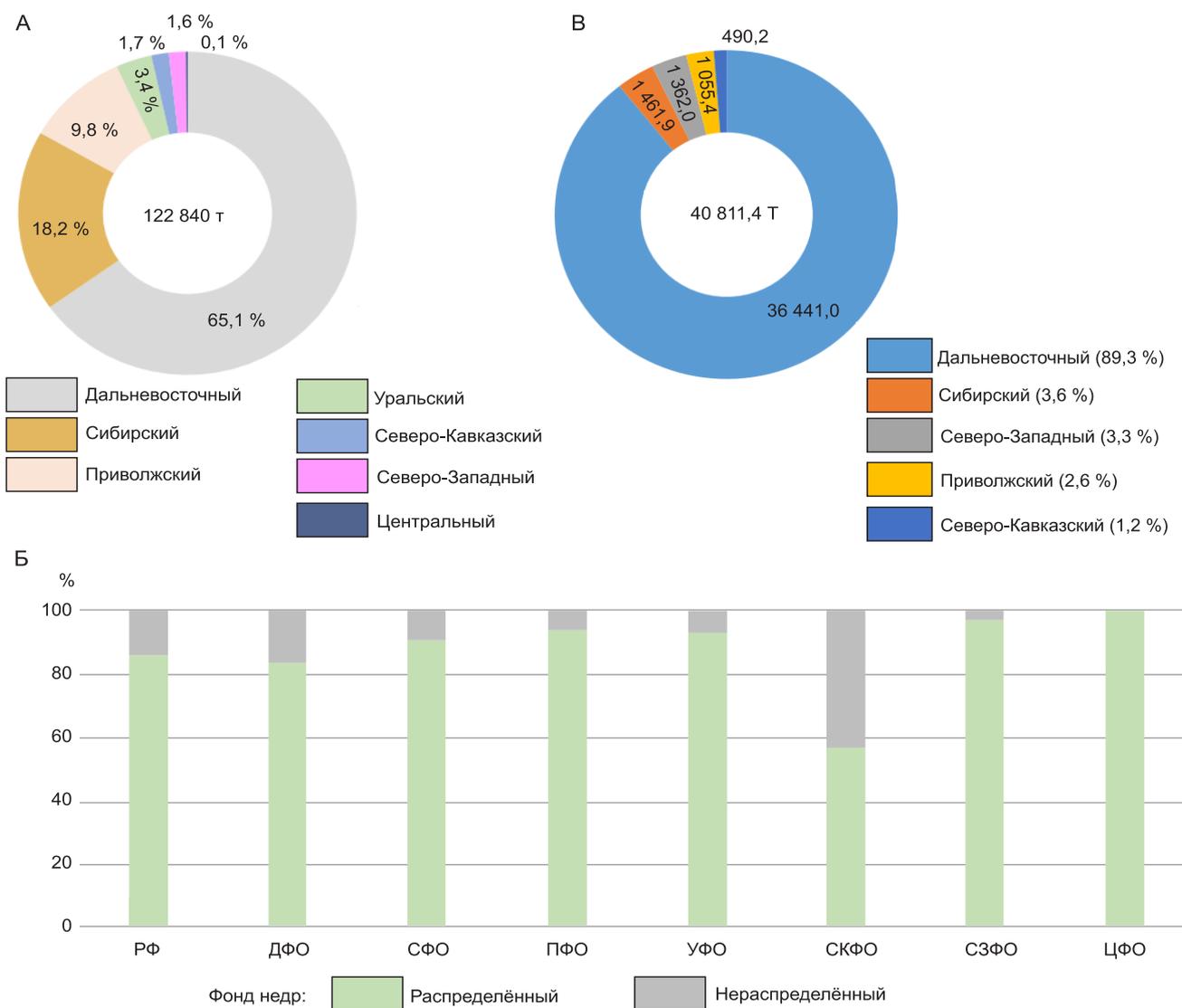


Рис. 17. Структура балансовых запасов серебра кат. ABC<sub>1</sub> + C<sub>2</sub> (А), их соотношений в распределённом и нераспределённом фонде (Б) и прогнозных ресурсов серебра кат. P<sub>1</sub> (В) по федеральным округам в РФ (на 01.01.2021)

В целом Российская Федерация обладает достаточно высоким ресурсным потенциалом для наращивания сырьевой базы серебра. На рудопроявлениях с апробированными прогнозными ресурсами высоких категорий P<sub>1</sub> и P<sub>2</sub>, как показывает их переосчёт с применением поправочных статистических коэффициентов в условные запасы C<sub>2</sub>, могут быть выявлены месторождения с количеством запасов, составляющих около 57 % от балансовых запасов страны категорий ABC<sub>1</sub> + C<sub>2</sub>. Большая часть этих рудопроявлений (89,3 % прогнозных ресурсов) сосредоточена в Дальневосточном ФО (Республики Саха (Якутия) – 57,5 %, Магаданская область – 18,2 %, Приморский край – 8,2 %) в пределах Верхояно-Колымской, Охотско-Чукотской, Сихотэ-Алинской метал-

логических провинций. Преобладают среди них серебро-полиметаллические объекты (47,9 % прогнозных ресурсов), меньшие доли приходятся на золото-серебряные (21,7 %), полиметаллически-серебряные (18,8 %) и серебряные (8,8 %). Качество прогнозных ресурсов категории P<sub>1</sub> по содержанию полезных компонентов и других параметров сопоставимо с таковыми для балансовых запасов.

**Резюме.** Таким образом, развитие сырьевой базы серебра собственно серебряных месторождений кроме доразведки флангов и глубоких горизонтов известных месторождений будет осуществляться в процессе геологоразведочных работ на рудопроявлениях с прогнозными ресурсами категорий P<sub>2</sub> и P<sub>1</sub>. Однако, важным направлением остаётся выявление новых

4. Минерально-сырьевая база серебра Российской Федерации

Тип месторождений	Количество	Балансовые запасы на 01.01.2021 г. (т), доля от РФ и их лицензирование (%)									Добыча	Доля, %
		кат. АВС <sub>1</sub>	Доля	РФН	кат. С <sub>2</sub>	Доля	РФН	кат. АВС <sub>1</sub> + С <sub>2</sub>	Доля	РФН		
Коренные	485	58125	100	87,0	64704,4	100	85,0	122 829,4	100	86,0	2252,5	100
Собственно серебряные	24	12 508,2	21,5	94,5	12 091,2	18,7	86,2	24 599,4	20	90,4	609,4	27,0
Серебряные	13	6955,8	12,0	96,8	8879,5	13,7	83,6	15 835,3	12,89	89,4	96,8	4,3
Золото-серебряные	11	5552,4	9,6	91,6	3211,7	5,0	93,4	8764,1	7,13	92,3	512,6	22,7
Комплексные серебро-содержащие	461	45 616,8	78,5	84,9	52 613,2	81,3	84,8	98 230	80	84,8	1643,1	72,9
Медистые песчаники и сланцы	1	0	0	0	17 115,5	26,4	100	17 115,5	13,93	100	3,4	0,2
Свинцово-цинковые	35	10 558,3	18,2	93,1	5686,8	8,8	83,5	16 245,1	13,22	89,7	507	22,5
Медно-колчеданные	63	12 068,4	20,8	91,0	4141	6,4	82,2	16 209,4	13,20	88,8	325,4	14,4
Золоторудные	263	5797,6	10,0	93,2	7738,8	12,0	88,3	13 536,4	11,02	90,4	432,9	19,2
Сульфидные медно-никелевые	19	6756,9	11,6	100	4648	7,2	100	11 404,9	9,28	100	124,3	5,5
Полиметаллические	25	5561,1	9,6	29,4	2820,9	4,4	60,1	8382	6,82	39,7	139,9	6,2
Медно-порфиновые	6	2668	4,6	100	2289,9	3,5	88,7	4957,9	4,04	94,8	45,5	2,0
Прочие	49	2206,5	3,8	65,7	8172,3	12,6	50,5	10 378,8	8,45	53,8	64,7	2,9
Россыпные	43	0,8	0,001	100	9,8	0,02	99,0	10,6	0,01	99,1	0,9	0,04
Техногенные	12	481,5	100	98,4	68	100	71,5	549,5	100	95,1	10,3	100
ВСЕГО	528	58125,8	100	87,0	64 714,2	100	85,0	12 2840	100	86,0	2253,4	100

Примечание. РФН – распределённый фонд недр.

объектов прежде всего в Магаданской области, где завершается отработка известных месторождений и по существу отсутствует «поисковый задел». Поэтому для его формирования необходимо проведение прогнозно-минерагенических работ за счёт средств ФБ для выделения перспективных участков для проведения поисковых работ и их последующего лицензирования. Освоение и развитие сырьевой базы комплексных серебросодержащих месторождений будет зависеть от проводимых работ по воспроизводству основных компонентов (золота, меди, цинка и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев Я. В., Попов И. В.* «Заявительный принцип», основные результаты работ на алмазы, благородные и цветные металлы // Отечественная геология. – 2021. – № 4–5. – С. 3–10.
2. *Иванов А. И., Вартамян С. С., Черных А. И., Волчков А. Г., Голубев Ю. К., Звездов В. С.* Перспективы развития минерально-сырьевой базы алмазов и золота Российской Федерации // Минеральные ресурсы. – 2016. – № 3. – С. 15–23.

3. Иванов А. И., Черных А. И., Вартамян С. С. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы золота в Российской Федерации // Смирновский сборник. – 2018. – С. 10–29.
4. Иванов А. И., Черных А. И., Вартамян С. С. Состояние, перспективы развития и освоения минерально-сырьевой базы золота в Российской Федерации // Отечественная геология. – 2018. – № 1. – С. 18–28.
5. Запасы и ресурсы [Электронный ресурс]. – URL: [https://polyus.com/ru/operations/reserves\\_and\\_resources/](https://polyus.com/ru/operations/reserves_and_resources/). (дата обращения: 08.02.2022).
6. Нежданинское [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.polymetalinternational.com/ru/assets/reservs-and-resources/#nezhda>. (дата обращения: 08.02.2022).
7. Сухой Лог [Электронный ресурс]. – URL: [https://polyus.com/ru/operations/development\\_projects/sukhoy-log/](https://polyus.com/ru/operations/development_projects/sukhoy-log/). (дата обращения: 08.02.22).
2. Ivanov A. I., Vartanyan S. S., Chernykh A. I., Volchkov A. G., Golubev Yu. K., Zvezdov V. S. Perspektivy razvitiya mineralno-syryevoy bazyalmazov i zolota Rossiyskoy Federatsii [Development prospects of the mineral resource base of diamonds and gold in the Russian Federation]. Mineralnyye resursy, 2016, No. 3, P. 15–23. (In Russ.)
3. Ivanov A. I., Chernykh A. I., Vartanyan S. S. Sostoyaniye i perspektivy razvitiya mineralno-syryevoy bazy zolota v Rossiyskoy Federatsii [Status and prospects for the development of the mineral resource base of gold in the Russian Federation]. Smirnovskiy sbornik, 2018, P. 10–29. (In Russ.)
4. Ivanov A. I., Chernykh A. I., Vartanyan S. S. Sostoyaniye, perspektivy razvitiya i osvoyeniya mineralno-syryevoy bazy zolota v Rossiyskoy Federatsii [Status, prospects for the development and development of the mineral resource base of gold in the Russian Federation]. Otechestvennaya geologiya, 2018, No. 1, P. 18–28. (In Russ.)
5. Zapasy i resursy, available at: [https://polyus.com/ru/operations/reserves\\_and\\_resources/](https://polyus.com/ru/operations/reserves_and_resources/).(08.02.2022) (In Russ.)
6. Nezhdaninskoye, available at: <https://www.polymetalinternational.com/ru/assets/reservs-and-resources/#nezhda>. (08.02.2022) (In Russ.)
7. Sukhoy Log, available at: [https://polyus.com/ru/operations/development\\_projects/sukhoy-log/](https://polyus.com/ru/operations/development_projects/sukhoy-log/). (08.02.2022) (In Russ.)

#### REFERENCES

1. Alekseyev Ya. V., Popov I. V. “Zayavitelnyy printsip”, osnovnyye rezultaty rabot na almazy, blagorodnyye i tsvetnyye metally [“Declaration principle”, the main results of work on diamonds, precious and non-ferrous metals]. Otechestvennaya geologiya, 2021, No. 4–5, P. 3–10. (In Russ.)

### Формационные типы медно-порфировых месторождений и их рудно-магматические системы

В семействе медно-порфировых месторождений выделены два самостоятельных рудно-формационных типа – золото-медно-порфировый и молибден-медно-порфировый. Принципиальное различие между ними заключается в их геотектонической позиции, определяющей происхождение и состав продуктивных плутоногенных формаций, а также другие особенности – состав рудоносных порфировых интрузивов, минералого-геохимические особенности руд, рисунок метасоматической и рудной зональности. Рассмотрены медно-порфировые рудно-магматические системы с комплексной металлогенией (КМПС), в которых медно-порфировые месторождения составляют главные, стержневые элементы и совмещены в пространстве с оруденением других рудно-формационных типов. Установлены отчётливые различия золото-медно-порфировых диоритовых КМПС, сформированных в структурах базальтоидных вулcano-плутонических поясов, и молибден-медно-порфировых гранодиорит-монзонитовых КМПС, принадлежащих андезитоидным поясам, по набору сопряжённых и совмещённых типов оруденения. Эти различия подтверждают обоснованность выделения двух рудно-формационных типов месторождений медно-порфирового семейства.

*Ключевые слова:* медно-порфировые месторождения, рудно-магматические системы, вулcano-плутонические пояса, формации.

МИГАЧЁВ ИГОРЬ ФЁДОРОВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, советник, migatchev@tsnigri.ru

ЗВЕЗДОВ ВАДИМ СТАНИСЛАВОВИЧ, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий отделом, metallogeny@yandex.ru

МИНИНА ОЛЬГА ВАСИЛЬЕВНА, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, minina@tsnigri.ru

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

### Formational types of porphyry copper deposits and their ore-magmatic systems

I. F. MIGACHEV, V. S. ZVEZDOV, O. V. MININA

Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals (TsNIGRI), Moscow

Two individual ore-formational types have been identified within the porphyry copper family: the gold-copper-porphyry and molybdenum-copper-porphyry ones. The fundamental difference between them lies in their geotectonic position that determines the origin and composition of fertile magmatic source, as well as other features - the composition of ore-bearing porphyry intrusions, the mineralogical and geochemical features of ores, and the pattern of metasomatic and ore zonation. In this study, we investigated porphyry copper ore-magmatic systems with complex metallogeny, or complex porphyry copper systems (CPCS), where porphyry copper deposits constitute the core elements spatially associated with mineralization of other ore-formational types. Based on a set of conjugated and combined types of ore mineralization we established the differences between diorite-related gold-copper-porphyry CPCS, formed in basaltic volcano-plutonic belts, and granodiorite-monzonite-related molybdenum-copper-porphyry CPCS, formed in andesite belts. These differences confirm the validity of the distinction of the two ore-formational types of deposits of the porphyry-copper family

*Key words:* copper-porphyry deposits, ore-magmatic systems, volcanic-plutonic belts, formations.

Для медно-порфировых месторождений (МПМ) в целом характерны прожилково-вкрапленный характер рудной минерализации, однотипный набор главных рудных минералов, постоянная пространственно-временная связь с телами порфировых фаз интрузивных комплексов, развитие оруденения в зонах гидротермально-изменённых пород, зональное расположение метасоматитов и руд, а также одни и те же механизмы возникновения рудовмещающих трещинных каркасов и процессов рудоотложения. Всё это позволяет рассматривать МПМ в рамках единого семейства. В то же время многие исследователи неоднократно отмечали определённые отличия в геохимических характеристиках, профиле рудоносного магматизма, рудно-метасоматической зональности, тектонической позиции и менее значимых особенностях этих месторождений, что нашло отражение в предлагаемых классификациях. Обзор таких представлений, проведённый с учётом собственных разработок, позволил А. И. Кривцову [8] выделить следующие типы МПМ по составу руд и соотношениям в них Au, Cu и Mo: собственно медно-порфировые и золото-медно-порфировые, молибден-медно-порфировые и медно-молибден-порфировые. Отмечается, что МПМ разных типов принадлежат разным геоструктурам, а рудоносные магматиты – разным сериям.

Основываясь на установленных различиях между типами МПМ с учётом проведённого авторами на принципах структурно-формационного и рудно-формационного сравнительного анализа характеристик более 100 месторождений Мира, в том числе открытых в последние десятилетия в юго-восточной Азии, можно среди месторождений медно-порфирового семейства выделить две группы: золото-медно-порфировые и молибден-медно-порфировые. При этом главная, принципиальная разница между месторождениями этих групп заключается в их геотектонической позиции, определяющей происхождение и состав рудоносных плутоногенных формаций, а также другие особенности геологического строения.

**Золото-медно-порфировые месторождения** принадлежат базальтоидным вулканоплутоническим поясам (ВПП), которые представляют собой элементы строения островодужных либо рифтогенных структур, возникающих на коре океанического типа. Обычно они располагаются между фронтальными прогибами и внутренними либо тыльными зонами островодужного пространства, а во внутриконтинентальных обстановках – над самими рифтами либо на их флангах (плечах). Базальтоидные пояса обладают простым строением. Они сложены продуктами мантийного базальтоидного магматизма,

завершающими развитие островодужных и рифтогенных структур. Вулканиты базальт-андезитобазальтовой и плутониты габбро-диорит-кварц-диоритовой-(плагиогранитной) формаций составляют вулканоплутоническую ассоциацию (ВПА) натриевой серии, продуктивную на (золото)-медно-порфировые, золото-сульфидно-кварцевые, золото-порфировые, а также магнетитовые руды. Рудоносные порфировые интрузивы сложены диоритами, кварцевыми диоритами, реже плагиогранитами. Из наиболее известных базальтоидных ВПП можно отметить Прибрежный Филиппинско-Новогвинейской провинции, Карибский Антильской провинции, Прибрежный и Островной на Аляске, Ирландский на Южном Урале.

**Молибден-медно-порфировые месторождения** размещены в андезитоидных (чаще окраинно-континентальных) ВПП, формирующихся на субстрате разного состава и возраста в орогенно-активизационном режиме и завершающих развитие подвижных поясов. Слагающие их вулканогенные и плутоногенные образования обладают более разнообразным составом по сравнению с базальтоидными ВПП, но в основной своей массе принадлежат известково-щелочной и высококальциевой сериям. От базальтоидных ВПП они отличаются более сложным строением и разнообразной металлогенией. Становление андезитоидных ВПП может рассматриваться в рамках обобщённой схемы их структурно-вещественно-металлогенической эволюции и зональности (рис. 1) [27]. В наиболее полном виде формирование таких поясов происходит в три этапа, отвечающие соответствующим структурно-формационным этапам (СФЭ) в их строении. Продукты магматизма разных этапов обычно разделены вулканогенно-терригенными толщами или молассами.

Типы месторождений каждого этапа обнаруживают тесную пространственно-временную связь с соответствующими геологическими формациями, что определяет металлогеническую зональность таких ВПП. В начальные этапы их развития возникают месторождения медно-порфирового семейства, ассоциирующие с (базальт)-андезит-дацит-риолит-(гранодиорит)-гранитной, андезит-латит-диорит-монцитовой, андезит-риолит-гранодиоритовой ВПА, которые представляют собой полные либо редуцированные гомодромные серии пород. С ними также связаны месторождения меди других формационных типов, железа, золота. В средние этапы в связи с (андезит)-дацит-риолит-гранодиорит-гранитной и риолит-лейкогранит-щелочногранитной ВПА образуются месторождения молибдена, вольфрама, олова, урана, золото-серебряные, серебро-полиметаллические. Поздние или завершающие этапы



Рис. 1. Принципиальная схема строения и формационно-металлогенической зональности андезитоидных ВПП. По И. Ф. Мигачёву, 2006 [27]:

геологические и рудные формации, их группы, комплексы и семейства: 1–11 – основания ВПП: 1 – базальт-андезит-дацит-риолитовая вулканогенная и базальт-риолитовая терригенно-флишоидная, 2 – углеродисто-терригенно-флишоидная, 3 – карбонатно-терригенно-флишевая, 4 – известняково-доломитовая, 5 – трахиандезит-трахириолит-кремнисто-карбонатная, 6 – медно-цинково-колчеданная и колчеданно-полиметаллическая, 7 – золото-сульфидная, 8 – магнетит-гематитовая, 9 – железо-марганцевая, 10 – свинцово-цинковая стратиформная, 11 – гранитизированные и метаморфические сиалические серии; 12–27 – нижнего этажа: 12 – вулканогенно-терригенно-карбонатная, 13 – андезитовая, 14 – габбро-диорит-гранодиоритовая, 15 – диорит-гранодиорит-гранитная, 16 – диорит-монцонит-гранодиоритовая, 17 – (серебро)-золото-полисульфидно-кварцевая, 18 – меднорудная типа «манто», 19 – полиметаллическая жильно-штокверковая, 20 – молибденово-медная жильная, 21 – молибден-медно-порфировая, 22 – медно-молибден-порфировая, 23 – молибден-порфировая, 24 – полиметалльно-оловянная, 25 – группа скарновых формаций (железо, железо-медная, молибденово-медная), 26 – свинцово-цинковая скарновая, 27 – оловоносная скарново-грейзеновая; 28–40 – среднего этажа: 28 – дацит-риолитовая, 29 – гранит-лейкогранитная-щелочногранитная-аляскитовая группа, 30 – золото-серебро-адуляр-кварцевая, 31 – молибден-урановая жильно-штокверковая, 32 – редкометалльно-оловянная, 33 – (бериллий)-вольфрам-молибденовая группа, 34 – редкометалльная (тантало-ниобиевая), 35 – кварц-полевошпатовая редкометалльная (тантало-ниобиевая), 36 – вольфрам-молибденовая скарновая, 37 – оловорудная скарновая, 38 – скарново-магнетитовая, 39 – свинцово-цинковая жильно-штокверковая, 40 – полиметалльно-медная жильно-штокверковая; 41–51 – верхнего этажа: 41 – трахибазальт-трахиандезит-трахириолитовая, 42 – монцосиенит-щелочногранитная, 43 – серебро-полиметаллическая, 44 – редкометалльно-редкоземельная, 45 – сурьмяно-ртутная, 46 – флюорит-берtrandитовая, 47 – кварц-полевошпатовая редкометалльно-редкоземельная, 48 – свинцово-цинковая скарновая и жильных зон, 49 – золото-кварцевая, 50 – железорудная скарновая и жильных зон, 51 – полиметалльно-медная жильно-штокверковая; прочие обозначения: сплошные и пунктирные стрелки – установленные и возможные (допускаемые) пространственно-временные связи плутогенных и рудных формаций, а также установленные и возможные случаи преобразования рудных формаций; сводообразные линии в контурах плутогенных формаций – установленные и возможные верхние (апикальные) уровни формирования интрузивных колонн; римские цифры – основные типы субстрата ВПП: I – фемический, II – сиалофемический, III – сиалический (метаморфизованный и гранитизированный, эпикратонный)

характеризуются формированием редкометалльно-редкоземельного оруденения, флюорита, сурьмы и ртути, которые ассоциируют со щелочными магматическими сериями пород. Состав руд молибден-медно-порфировых месторождений и рудоносных интрузивов в значительной степени определяется составом основания ВПП. При этом сиалический субстрат (эпикратонный, по А. И. Кривцову [9]) характеризуется скоплением гранитофильных рудных элементов, сиалофемический – присутствием месторождений стратиформных полиметаллических, золотых и железных руд, фемический – колчеданных, железорудных и марганцевых залежей.

В представленной схеме строения и формационно-металлогенетической зональности андезитоидных ВПП (см. рис. 1) отражены установленные и возможные (допускаемые) пространственно-временные связи рудных и геологических формаций, а также случаи преобразования рассеянной и концентрированной (в месторождениях) минерализации поздними магматическими и рудогенными процессами. Формационно-металлогенетическая зональность имеет как латеральное, так и вертикальное выражение и отвечает разновременному ряду геологических и рудных формаций – от слагающих субстрат поясов до формирующихся на поздних этапах их развития.

Среди андезитоидных ВПП устанавливаются пояса с полным и редуцированным или неполным циклом развития. Первые проходят все три этапа формирования, состоят из образований трёх структурно-формационных этажей и могут вмещать наиболее полный набор рудных объектов. В поясах неполного развития отсутствуют комплексы среднего или верхнего этажей, что определяет специфику их металлогенетических рядов.

Достаточно сходные последовательности формирования структурно-вещественных и металлогенетических рядов андезитоидных ВПП могут быть вызваны близкими и однотипными механизмами и способами генерации магматических образований. Представляется, что сумме геофизических, петрохимических, геохимических и изотопных данных наиболее полно отвечает модель петрогенезиса андезитоидных магм, выдвинутая Р. Торпом, П. Поттсом и П. Френсисом с учётом схемы А. Рингвуда и основанная на изучении андезитоидного магматизма Анд. Согласно этим авторам, андезитовые магмы представляют собой результат сложного взаимодействия процессов парциального плавления, фракционной кристаллизации и контаминации на мантийных уровнях, а также двух последних процессов – в коре.

В настоящее время не вызывает сомнения генерация риолитовых магм в результате анатексиса верх-

них частей сиалической коры. Можно полагать, что для ВПП существует причинная обусловленность продуцирования этих магм андезитоидными колоннами, выступающими в качестве источников тепла и потока петрогенных (и рудных) компонентов для анатектического магмообразования. Возможно, одним из условий возникновения риолитовых магм в структуре ВПП является достаточная мощность их сиалического основания. С этой позиции становится понятным отсутствие кислых магматитов средних этапов развития в некоторых ВПП Андийского подвижного пояса, Курьинском ВПП Чукотки, формирующихся на островодужном субстрате. Породы щелочных непрерывных и контрастных серий третьего этапа развития андезитоидных ВПП, согласно их изотопным, геохимическим и петрохимическим характеристикам, обязаны своим возникновением процессам на нижнекоровых или мантийных уровнях.

Таким образом, в качестве причины возникновения структурно-вещественной и металлогенетической зональности андезитоидных ВПП может рассматриваться сложнопостроенная диапироподобная, валлообразная магматическая колонна, эволюция которой происходит в рифтоподобных линейных зонах растяжения и выражается в смене мантийных источников магм и рудной минерализации – коромантийными, затем коровыми и вновь глубиннокоровыми или мантийными. Конечные продукты такой эволюции представлены образованиями соответствующих СФЭ поясов.

Очевидно, что геотектоническая позиция МПМ, состав и происхождение рудоносных магматических ассоциаций в значительной степени определяют и другие особенности строения месторождений, относящихся к двум выделенным группам. Наиболее заметны отличия в составе рудоносных порфировых интрузивов, минерально-геохимическом составе руд и рисунке метасоматической зональности [11, 12].

В золото-медно-порфировых месторождениях интрузивные тела, представляющие собой стержневые элементы МПМ, представлены порфировыми диоритами и кварцевыми диоритами (80% выборки из 50 месторождений), реже плагиогранитами (20%). В молибден-медно-порфировых объектах в качестве рудоносных тел выступают преимущественно гранодиорит-порфиры (68% выборки из 128 месторождений), в меньшей степени – породы монцитонидного ряда (28%).

Рудная минерализация в золото-медно-порфировых месторождениях отличается от молибден-медно-порфировых повышенным содержанием Au (0,5–1,5 г/т) и отсутствием либо незначительной концентрацией Mo (тысячные доли%). В то же время в рудах

последних Mo и Re содержатся в количествах, достаточных для попутного извлечения.

Заметно отличается и рисунок метасоматической зональности этих двух типов МПМ. К молибден-медно-порфировым месторождениям применима генерализованная схема метасоматической зональности типовой модели Дж. Лоуэлла и Дж. Джайлберта [25], согласно которой внутренняя калишпат-кварц-биотит-серицитовая зона обрамляется филлизитовой, сменяющейся аргиллизитовой. Для внешней пропилитовой зоны характерна ассоциация карбонат-хлорит-эпидот с пиритом. Применительно к золото-медно-порфировым объектам В. Холлистером [24] сформирована «диоритовая» модель метасоматической зональности, для которой характерен сравнительно простой рисунок, в котором внутренние зоны кварц-серицитового состава обрамляются аргиллизитовыми, граничащими с широким ореолом пропилитизации. Иногда между кварц-серицитовой и пропилитовыми зонами отмечается зона биотитизации.

Проведённое ранее обобщение данных по минеральному составу руд более чем 60 отечественных и зарубежных МПМ [11] с привлечением материала ещё по нескольким десяткам объектов позволяет выделить в составе первичных руд следующие типы:

- магнетит-пиритовый, который в золото-медно-порфировых месторождениях обычно развит во всём объёме рудных тел, в то время как в молибден-медно-порфировых – локально в виде тонкой вкрапленности;
- молибденитовый слагает значительные части рудных тел в молибден-медно-порфировых объектах, а в золото-медно-порфировых практически отсутствует;
- халькопирит-борнитовый и халькопирит-пиритовый типы широко развиты на молибден-медно-порфировых месторождениях, являясь для них определяющими, в то время как на золото-медно-порфировых объектах встречаются реже;
- полисульфидный часто проявлен в молибден-медно-порфировых месторождениях, иногда в значительных объёмах, а на золото-медно-порфировых развит незначительно.

Таким образом, даже достаточно краткое перечисление различий между МПМ двух выделенных групп, в том числе принципиальных, таких как геотектоническая позиция, пространственно-временные и генетические связи с разными по составу и происхождению магматическими ассоциациями, позволяет, исходя из понятия о рудных формациях [9, 17], достаточно обоснованно рассматривать месторождения этих групп в качестве самостоятельных рудно-формационных типов – золото-медно-порфирового и молибден-медно-порфирового (см. таблицу). В по-

следних колебания отношения Cu/Mo и содержания Au в рудах зависят от состава фундамента ВПП [8, 12].

Медно-порфировые месторождения представляют собой рудно-магматические медно-порфировые системы (МПС), понятие о которых было введено Р. Силлитоу. Помимо рудной минерализации, они включают рудоносные интрузивы основных и порфировых фаз, брекчиевые тела, элементы рудно-метасоматической зональности, геохимические ореолы и породы рамы. В то же время многочисленные случаи совмещения МПМ с другими типами оруденения послужили основой для формирования синтетических моделей медно-порфировых рудно-магматических систем, из которых наиболее известна модель Р. Силлитоу (рис. 2) [29]. В структуре модели показаны связи медно-порфировых месторождений с многофазными порфировыми штоками и проявлениями различного оруденения во вмещающих породах: проксимальными и дистальными скарнами, трубообразными телами типа манто, эпитермальными месторождениями высокой (HS) и средней (IS) сульфидизации в зонах смешивания магматических растворов и вадозных вод. Подчёркивается, что в конкретных МПС обычно присутствуют только некоторые из этих месторождений.

В целом МПМ или МПС, представляющие собой главные стержневые элементы более крупных рудно-магматических систем, вместе с сопровождающими их разнообразными рудными проявлениями целесообразно рассматривать в рамках единых достаточно крупных комплексных медно-порфировых рудно-магматических систем (КМПС), в прикладном выражении отвечающих комплексным рудным районам или узлам. В таком понимании термин КМПС приближается к определениям магматогенно-рудных систем Г. Власова, узлам длительной эндогенной активности М. Фаворской и Н. Томсона, рудным кластерам П. Биллингслея и А. Локка, комплексным рудным узлам [27].

Большая часть телескопированных унифицированных моделей КМПС создавалась применительно к рудно-магматическим системам единого медно-порфирового семейства, без учёта различий между их стержневыми элементами – месторождениями разных рудно-формационных типов. С учётом ассоциации золото-медно-порфировых месторождений с диорит-порфиритами, а молибден-медно-порфировых – с гранодиорит- и монцонит-порфирами, с определённой долей условности можно разделить КМПС на золото-медно-порфировые диоритовые и молибден-медно-порфировые гранодиорит-монцонитовые. Принципиальные различия между этими КМПС отражаются и на наборе рудно-формационных типов

1. Рудно-формационные типы месторождений медно-порфирового семейства. С использованием данных [12]

Характеристики	Золото-медно-порфировый	Молибден-медно-порфировый
Геотектоническая позиция	Базальтоидные вулканоплутонические пояса – барьерные зоны островодужных структур, рифты	Андезитоидные вулканоплутонические пояса: орогенно-активизационные краевые периокеанические и внутриконтинентальные
Рудоносные интрузивные формации	Габбро-диорит-кварцдиоритовая (плаггиогранитная), натриевая	Габбро-диорит-гранодиоритовая калиево-натриевая; диорит-гранодиорит-монцитонитовая натриево-калиевая
Рудоносные порфиновые фазы	Диоритовые, кварцевые диоритовые порфиры, плаггиогранит-порфиры	Гранодиорит-порфиры, кварцевые монцитонит-порфиры
Значение индекса $S/I = Al_2O_3 : (Na_2O + K_2O + CaO)$ , по Дж. Гриффитсу и К. Гудвину	0,6–0,9	0,7–1,1
Геохимические характеристики, по С. Титли и Р. Бину, $Sr^{87}/Sr^{86}$	0,705	0,703–0,710
Основные рудообразующие (второстепенные типичные) минералы	Пирит, халькопирит, магнетит, гематит, борнит (пирротин)	Пирит, халькопирит, молибденит, борнит (магнетит, галенит, сфалерит)
Геохимические особенности руд: отношение Cu/Mo в первичных рудах, отношение Cu/Au, содержание Re в молибдените	250:1 и более, 9000:1–75 000:1, 600–1500 (до 1800)	15–30:1, 15 000:1–200 000:1, 50–1000 (до 1600)
Состав метасоматических изменений и их зональность (от центра к периферии): К – калишпатизация, Б – биотитизация, Ф – филлизитизация, А – аргиллизация, П – пропилизитизация	С-Б-П, Ф-А-П, Б-П	К-Б (+Б)-Ф-А-П, Б-Ф-А-П, Ф-А-П

сопряжённого и совмещённого (возможного) оруденения. Сопряжённые типы формируются близодновремененно с МПМ в единых рудно-магматических системах, в то время как возможные типы могут закономерно присутствовать в составе КМПС в результате совмещения в их пространстве ранних (в породах рамы и комплексе основания ВПП) или более поздних продуктов рудогенеза.

Среди сопряжённых типов оруденения в КМПС ведущую роль играют золоторудные месторождения разной рудно-формационной принадлежности. Мировая практика геологоразведочных работ последних десятилетий свидетельствует о наиболее частой сопряжённости медно-порфиновых месторождений с локализованными в комагматичных вулканитах эпитермальными золоторудными и золото-серебряными с образованием КМПС, называемых «порфирово-эпитермальными». Среди них – эпитермальные золото-медные жильные и стратоидные месторожде-

ния NS типа и золото-серебряные преимущественно жильные IS типа. Тесная пространственно-временная связь этих месторождений с медно-порфировыми, по мнению Д. Кука, П. Холлингса, Г. Корбе, Т. Лича, Р. Силитоу, Дж. Уолша, Дж. Хеденквиста, М. Эйнауди и др., обусловлена тем, что источником рудного вещества для тех и других служат единые магматические очаги, продуцирующие рудоносные интрузивные и вулканогенные формации, а особенности рудно-формационной зональности «порфирово-эпитермальными» КМПС обусловлены прежде всего термодинамическими и физико-химическими условиями газоотделения в «материнских» плутонах (промежуточных магматических очагах) и их апофизах (порфириковых штоках), а также составом вмещающих пород [3].

В КМПС островодужных базальтоидных и андезитоидных периокеанических ВПП эпитермальные месторождения золота и серебра, как правило,

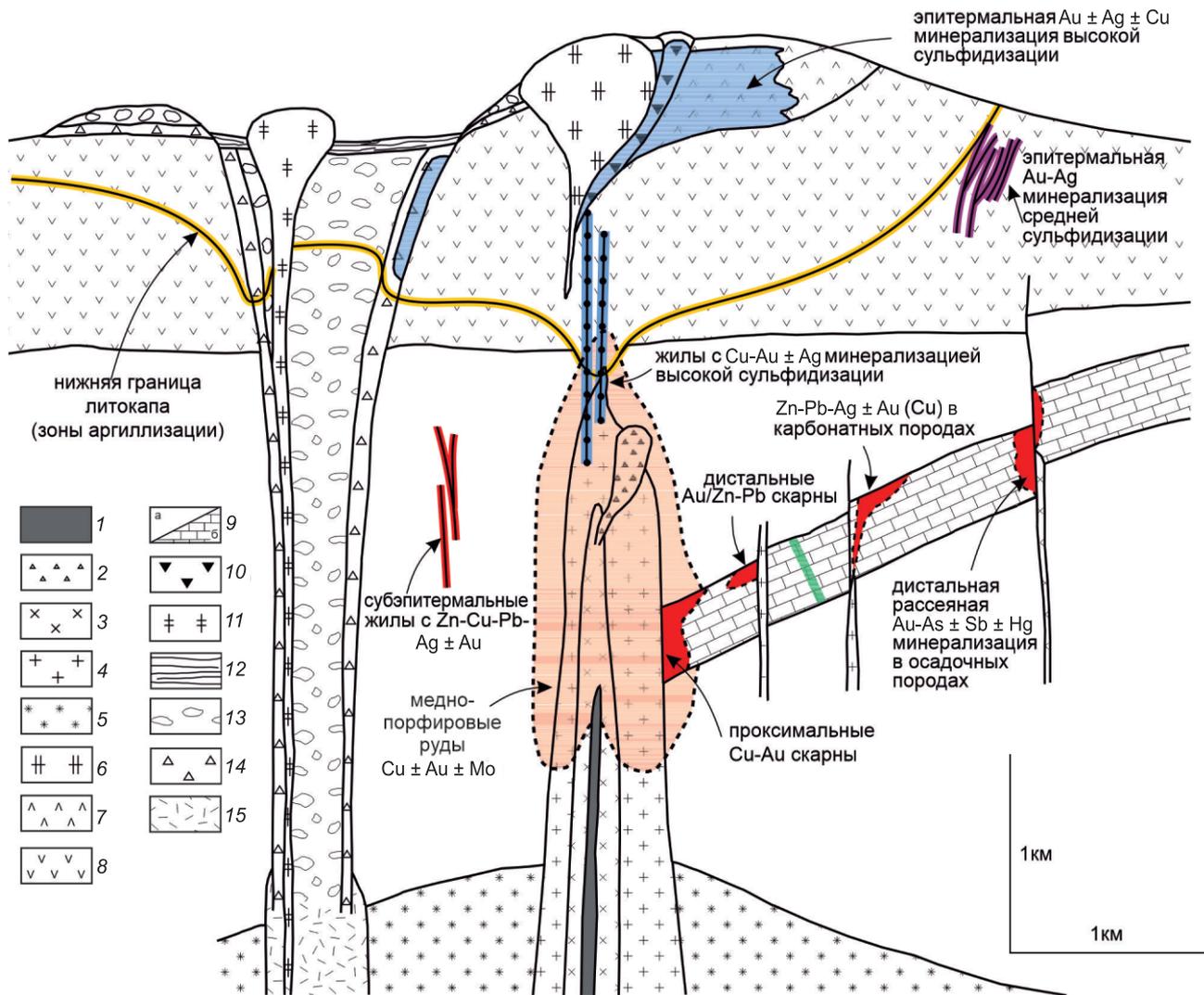


Рис. 2. Модель телескопированных медно-порфировых систем. По R. Sillitoe [29]:

1–4 – порфировый шток: 1 – поздние порфиры, 2 – промежуточные гидротермально-магматические брекчи, 3 – промежуточные порфиры, 4 – ранние порфиры; 5 – равномернозернистые интрузивные породы; 6–9 – вмещающие породы: 6 – дацитовый купол, 7 – фельзитовые туфы, 8 – андезиты, 9 – породы основания (а) с карбонатным горизонтом (б); 10–15 – перекрывающие комплексы – кратерный и диатремовый: 10 – фреативные брекчи, 11 – некк-купол дацит-порфиров, 12 – озёрные осадки, 13–14 – фреато-магматические брекчи: 13 – поздние, 14 – ранние, 15 – пострудные порфиры

локализованы в верхних периферийных, а не в осевых (над порфировыми штоками) частях этих систем. Такие пространственные соотношения благороднометалльного и медно-порфирового оруденения наблюдаются в Алмалыкской (Узбекистан), Лепанто (Филиппины), Уафу-Голпу (Новая Гвинея), Андаколло, Рефуджио (Чили), Янакоча (Перу), Речк (Венгрия) и многих других КМПС. Большинству изученных авторами КМПС северо-восточных ВПП России

(Егдэкгычской, Бургачанской, Ольховкинский, Ольдянской, Уктурской и др.) также свойственна латеральная рудно-формационная зональность [6].

В верхних частях КМПС типа «интрузив под вулканом» локализованы эпитеpмальные Au-Ag, Au-Te и золото-полисульфидные объекты типа низкой сульфидизации (LS), составляющие до 60% мировых запасов Au. Примерами служат месторождения Лихир, Ладолам, Поргера в Папуа–Новая Гвинея; Слиппер,

Буллфрэг, Крипл Крик, Раунд Моунтин в США; Белая Гора, Покровское, Буриндинское, Прогнозное и другие в России. В глубинных частях некоторых из них (Многовершинное, Нявленга, Джульетта, Кумроч) известны незначительные проявления медно-порфировой минерализации, в том числе совмещённые с золото-серебряными рудами [6].

В то же время практически все гигантские и супергигантские золото-медно-порфиновые месторождения ВПП Тихоокеанского кольца (Грасберг, Голпу в Индонезии; Фрида Ривер, Ок Теди в Папуа-Новая Гвинея) при повышенных содержаниях золота в собственном медно-порфириновом руде, вблизи поверхности увенчаны мощными безрудными аргиллизитовыми «шляпами». Отмеченные особенности строения КМПС обусловлены геодинамическими обстановками возникновения магматических очагов («материнских» плутонов), а также структурно-петрофизическими и геохимическими условиями их разгрузки (рудоотложения) [3, 4].

В структурах КМПС медно-порфириновые месторождения нередко сопряжены с мезотермальными золото-полисульфидными, золото-кварцевыми, золото-порфириновыми, а также жильными полиметаллическими объектами, локализованными во фланговых зонах в плутонах основных фаз рудоносных формаций либо в вулканитах. Присутствие в породах рамы рудоносных интрузивов реакционно-способных карбонатных пород (известняков, доломитов, мергелей) предопределяет проявление в структуре КМПС проксимальных золотоносных (медно)-магнетитовых, золото-медных и дистальных свинцово-цинковых скарновых и скарнированных залежей. Они отмечаются во многих МПС (Алмалыкская, Ауэрбаховская, Бингхэм, Грасберг, Ок Теди, Кэды Хилл и др.), отличаясь повышенным содержанием металлов, включая Au.

Целесообразно рассмотреть архитектуру конкретных КМПС базальтоидных и андезитовидных поясов с целью проиллюстрировать принципиальные различия между ними, подтверждающие обоснованность выделения двух типов таких систем.

**Базальтоидные ВПП.** Для *золото-медно-порфириновых диоритовых КМПС* характерно присутствие мезо- и эпitherмальных золоторудных (серебро-золоторудных, золото-теллурических), а также медных и медно-магнетитовых вулканогенных и скарновых месторождений и проявлений. Золоторудные (с серебром) месторождения возникают в заключительных этапах формирования МПС и обычно располагаются на их периферии, но в отдельных случаях – в центральных частях, накладываясь на медно-порфириновые руды. Подобные соотношения характерны для многих рудных узлов Явы и Сумбава (Индонезия), возникших в широком возрастном диапазоне – от палеоцена до плейстоцена.

Крупная золото-медно-порфириновая диоритовая КМПС, включающая медно-порфириновые месторождения *BatuHijau, Tumpangpitu, Elamg* (о. Ява), расположена в восточном сегменте магматической дуги Sunda [26], по-видимому, представляющей собой островную дугу поздней стадии развития островодужной системы. Основная фаза рудоносного комплекса представлена крупным диоритовым массивом (5,81–5,18 млн лет). Медно-порфириновые месторождения, формировавшиеся в плиоцене-плейстоцене (5,0–2,5 млн лет), ассоциируют с небольшими штоками и дайками тоналит-диорит-порфиритов нескольких фаз внедрения (4,89–2,7 млн лет) (рис. 3). В их структуре выделяются дорудные и пострудные тела брекчий; развиты биотит-магнетит-актинолитовая, хлорит-серицит-гематитовая и аргиллизитовая метасоматические зоны.

В состав КМПС, помимо медно-порфириновых, входят эпitherмальные серебро-золото-теллуридные и кварц-энаргит-теннантит-тетраэдритовые преимущественно жильные проявления разной сульфидизации, в которых золото, как правило, представлено теллуридами и электрумом. Золотоносные жилы и зоны формируются в заключительные этапы развития КМПС (2,4–1,5 млн лет) в её периферических, а также центральных частях, пересекая медно-порфириновые руды и пострудные брекчии. На периферии КМПС известны также золотосодержащие магнетитовые скарны, сопряжённые во времени с медно-порфириновым оруденением.

В *рудном районе Багио (Baguio)* на острове Лусон (Филиппины) выявлено несколько золото-медно-порфириновых месторождений, формировавшихся в диапазоне 3,0–0,51 млн лет, а также золото-серебряное оруденение, которое образует самостоятельные месторождения на флангах рудного района.

Золото-медно-порфириновая диоритовая КМПС Багио расположена в Центральной Кордильере острова Лусон (Филиппины), в позднемиоцен-плиоцен-плейстоценовом базальтоидном ВПП [30]. На флангах пояса распространены вулканогенные и вулканогенно-осадочные образования эоцена–олигоцена–нижнего миоцена – базальты, андезибазальты, песчаники, алевролиты, рифогенные известняки. Они вмещают крупный интрузив центрально-кордильерского габбро-диорит-гранодиоритового комплекса (12–13 млн лет) на восточной границе КМПС. В вулканогенном разрезе продуктивной ВПА выделяются андезибазальтовая и андезитовая толщи, отличающиеся присутствием граувакк и горизонтов известняков. Интрузивные и субвулканические образования представлены штоками диорит-порфиритов, дайками андезитов и дацитов (рис. 4).

КМПС включает золото-медно-порфировые, эпitherмальные золото-серебряные, серебро-золото-полисульфидные и скарновые золото-сульфидно-магнетитовые месторождения и проявления, которые в западной части района (Black Mountain и Mexico) датируются интервалами 3,09 и 2,81 млн лет, в южной (Santo Tomas II) – 1,5 млн лет, а в восточной (Hatzwee и Ampuca) – 1,09 и 0,51 млн лет. Всё это указывает на длительное функционирование КМПС. Золото-медно-порфировые руды локализованы в верхних и апикальных частях рудоносных штоков диоритовых и андезитовых порфиритов, а также в вулканитах вмещающей андезибазальтовой толщи. Для них характерны внутренние зоны биотитизации и мощные пропилитовые ореолы. Кварц-карбонат-полисульфидные жилы с Au и Ag со временем об-

разования 0,65 млн лет (Asuran) пересекают медно-порфировые руды и брекчиевые трубки. Золото-сульфидосодержащие тела скарнов магнетит-хлорит-кальцит-гранат-цоизит-кварцевого состава приурочены к прослоям известняков и тяготеют к их контактам с андезитовыми порфиритами. Крутопадающие жилы с эпitherмальной золото-серебряной минерализацией сопровождают диатрему Valatos, которая вместе с вулканитами дацитового состава завершает становление пояса.

КМПС Mankayan в северной части о. Лусон содержит несколько крупных рудных скоплений на площади около 25 км<sup>2</sup> [23]: золото-медно-порфировые месторождения Far Southeast (FSE), Guinaoyang и проявления Buaki и Palidan, а также эпitherмальные месторождения – стратойдное золото-медное

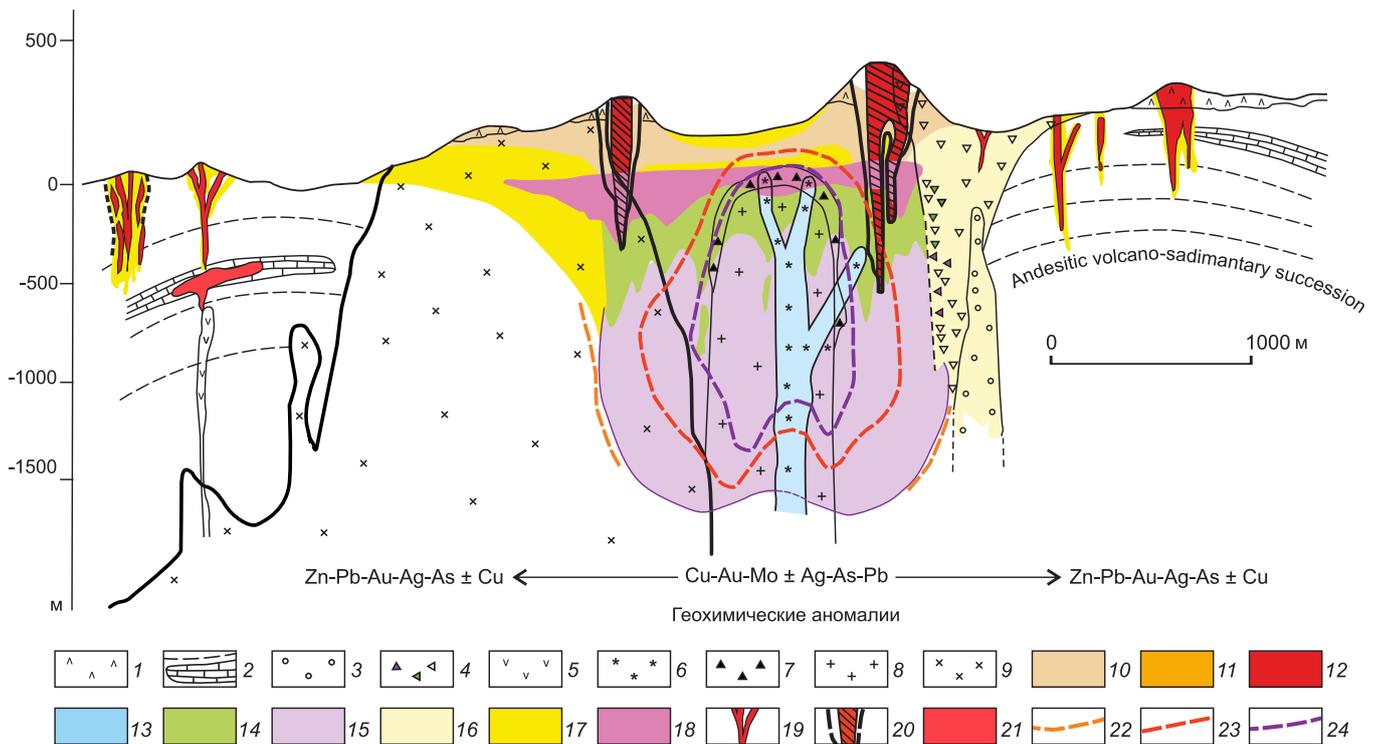
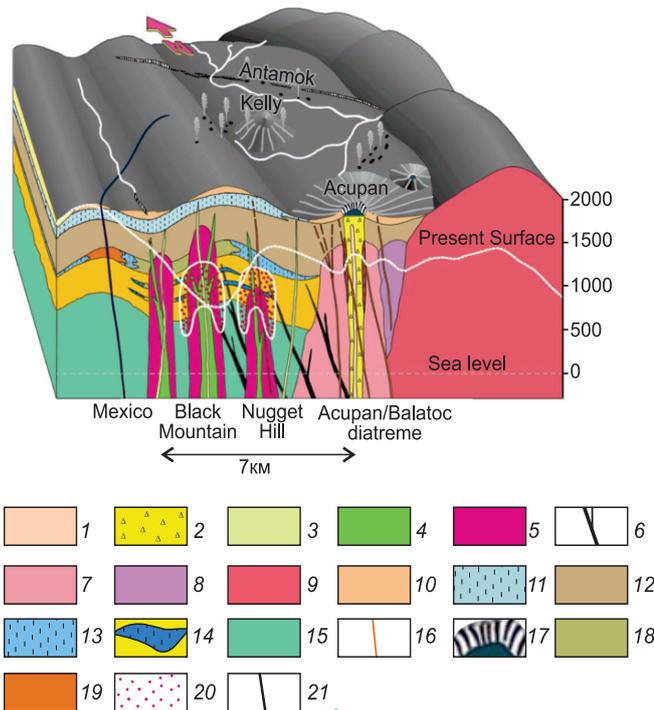


Рис. 3. Принципиальная модель золото-медно-порфировых и золото-серебряных месторождений восточной части дуги Sunda (запад о. Ява, Индонезия) [26]:

1–2 – породы интрузивной рамы: 1 – туфы дацитов, 2 – лавы андезитов с линзами известняков; 3–9 – интрузивные образования: 3 – поздние дацитовые дайки и купола, 4 – диатремовые брекчии, 5 – андезит-диоритовые дайки, 6 – поздние тоналит-порфиры, 7 – интрузивные брекчии, 8 – промежуточные тоналит-порфиры, 9 – диоритовые штоки; 10–14 – метасоматиты: 10–11 – аргиллизитовые: 10 – диккит-каолинитовые, 11 – кварц-диккит-каолинит-пирофиллитовые, 12 – кварц-алунитовые, 13 – хлорит-серицит-гематитовые, 14 – биотит-магнетит-актинолитовые; 15–17 – метасоматические изменения пород: 15 – слабая биотитизация, 16 – аргиллизация (серицит, иллит, смектит), 17 – слабая аргиллизация; 18–24 – руды: 18 – продукты гипергенного обогащения, 19 – эпitherмальные серебро-золото-теллуридные IS типа, 20 – кварц-энаргит-теннантит-тетраэдритовые типа HS, 21 – золотосодержащие скарновые магнетитовые, 22–24 – золото-медно-порфировые: 22 – халькопирит-пиритовые, 23 – преимущественно халькопиритовые, 24 – халькопирит-борнитовые



**Рис. 4. Принципиальная модель формирования золото-медно-порфирового, эпитермального золото-серебряного и скарнового золото-сульфидно-магнетитового оруденения в районе Багио, о. Лусон (Филиппины) [30]:**

1–9 – интрузивные и субвулканические породы: 1 – дациты, 2 – диатрема Balatoc, 3 – дайки андезитов, 4–5 – рудоносные штоки: 4 – андезитовые порфириты, 5 – роговообманковые диоритовые порфириты, 6 – дайки диабазов, 7 – гранодиориты Viras, 8 – габбро Lucbuban, 9 – диоритовый комплекс Центральной Кордильеры; 10–15 – стратифицированные отложения ВПП: 10 – туфы андезитов, песчаники, сланцы, 11 – верхний горизонт известняков, 12 – андезиты, граувакки, 13 – средний горизонт известняков, 14 – андезибазальтовые граувакки, песчаники, сланцы с нижними горизонтами известняков, 15 – базальты и андезиты метаморфизованные; 16–20 – типы оруденения: 16 – эпитермальное жильное золото-серебряное и кварц-карбонат-полисульфидное с Au и Ag, 17 – минерализованные брекчии, 18 – скарны магнетит-хлорит-кальцит-гранат-цоизит-кварцевого состава, 19 – золото-сульфидсодержащее в скарнах, 20 – золото-медно-порфировое; 21 – разломы

Лепанто и жильные золото-серебряные Виктория и Тереза, сформировавшиеся в интервале 2–3 млн лет назад. Во внутренней части КМПС находится шток кварцевых диоритов с золото-медно-порфировыми рудами месторождения FSE. В её фланговой зоне гипсометрически выше располагается месторождение Лепанто типа HS, которое представлено серией горизонтально залегающих пластообразных тел общей протяжённостью около 4 км, сложенных люцит-энаргитовыми рудами в кварц-алунитовых метасоматитах. Оба месторождения имеют общий воз-

раст кварц-алунитовых и калиевых метасоматитов (1,4 млн лет). Во фланговой зоне МПС ниже и выше золото-медных залежей располагаются штокверки и жилы эпитермальных золото-серебряных руд.

КМПС Фрида-Ривер–Нена (Папуа–Новая Гвинея) во внутренней зоне содержит крупное медно-порфировое месторождение Фрида-Ривер, а на фланге – месторождение Нена с запасами энаргит-люцитонитовых руд 60 млн т при содержании Cu 2,0 %, Au 6,0 г/т. Стратоидные руды этого месторождения, относимые к типу HS, развиты в зоне окварцевания вулканитов с выходом в кварцево-алунитовую зону. Вертикальный размах оруденения превышает 400 м, при этом люцитонитовые и ковеллин-энаргитовые руды верхних горизонтов с глубиной сменяются энаргит-люцитонитовыми [10].

Сочетание таких же типов руд наблюдается в Кедабекском рудном районе среднеюрского ВПП Малого Кавказа. Карадагское и Хар-Харское медно-порфировые месторождения, приуроченные к эндо-экзоконтактной зоне габбро-диорит-плаггиогранитного интрузива, соседствуют с Битти-Булагским энаргит-люцитонитовым Au- и Ag-содержащим месторождением, локализованным в кальдере проседания, выполненной вулканитами комагматичной андезибазальт-андезитовой формации.

На Урале, в структурах Ирендыкского, Новоалексеевского, Гумбейского, палеозойских базальтоидных ВПП выделяется ряд золото-медно-порфировых диоритовых КМПС, в которых проявлена ассоциация медно-порфирового, золото-сульфидно-кварцевого и золото-порфирового оруденения.

К их числу относится Вознесенская КМПС в крайнем выступе фундамента Ирендыкского ВПП, где в массиве диоритов салаватского комплекса локализовано Вознесенское (молибден)-медно-порфировое месторождение. В контурах вмещающего его магматогенного поднятия размещены небольшие золоторудные месторождения Камышканское, Большой и Малый Каран, локализованные в вулканокластических отложениях нижней части разреза вулканитов базальт-андезибазальтовой формации, комагматичной плутонитам рудоносного комплекса. Золоторудные тела представляют собой залежи альбит-слюдяных и альбит-хлоритовых сланцев с вкрапленностью золотоносного пирита и халькопирита по туфогенно-осадочным породам и залегают с ними согласно. В Северо-Миасской металлогенической зоне, включающей Вознесенский рудный узел, с массивами диоритов салаватского комплекса ассоциируют месторождения золото-порфирового типа (Тыелгинское, Наилинское и др.), представленные золото-сульфидно-кварцевыми штокверками в эндо- и экзо-контактах интрузивов.

В обстановках, где в породах рамы рудоносного интрузива в том или ином объёме присутствуют карбонатные породы, в структуре золото-медно-порфировых КМПС возможно появление золотосодержащих (медно)-магнетитовых и медных скарновых залежей, сопряжённых с медно-порфировыми в рамках становления рудоносной плутогенной формации. Это особенно характерно для золото-медно-порфировых объектов островодужных поясов юго-востока Азии, где содержания Au в рудах иногда достигают аномально высоких значений, причём существенная часть его запасов сосредоточена именно в скарновых залежах, локализованных в экзоконтактах рудоносных интрузивов.

Наиболее ярким примером золото-медных скарнов является крупное *месторождение Ок Теди* с 5 млн т запасов меди (ср. сод. 0,76 %) и 490 т золота (ср. сод. 1,1 г/т). Золотосодержащие магнетит-сульфидные скарновые руды, вмещающие основные запасы меди и золота, развиты в известняках на фланге рудоносного штока кварцевых монцонит-порфиров с медно-порфировыми рудами, в которых главные пирит и халькопирит ассоциируют с пирротинном и магнетитом.

Показателен также рудный район *Ertsberg* (Эртсберг, Индонезия) с несколькими медно-золоторудными месторождениями, включая *Grasberg* – одно из крупнейших золото-медно-порфировых месторождений Мира. Плиоценовые рудоносные интрузивы от диоритового до кварц-монцонитового состава, образованные продуктами нескольких продуктивных стадий внедрения, размещены в меловых и третичных обломочных и карбонатных породах. Кроме основных медно-порфировых, здесь находится несколько медно-скарновых месторождений – *Ertsberg* и его восточная скарновая зона, *Big Gossan*, *Kucing Liar* и *DOM*, которые расположены вокруг интрузивов *Ertsberg* и *Grasberg*, а также вдоль основных разломов вблизи них. Основной объём золото-медно-скарновых руд связан с ранней интрузивной стадией *Dalam*, представленной диоритами [28].

Сопряжённость в пространстве медно-порфирового, скарнового медного и медно-магнетитового, а иногда и золотого оруденения, обусловленная их связью с массивами общей продуктивной плутогенной формации, характерна для рудных узлов Урала, где выделяется несколько таких КМПС: Воскресенская, Ключевская, Круглогорская, Кияктинская и др. Набор развитого в них оруденения полностью определяется рудоносностью ВПА базальтоидных ВПП, которым они принадлежат. На *Гумешевском месторождении*, приуроченном к структурам Новоалексеевского базальтоидного ВПП (Средний Урал), скарновые медные и медно-магнетитовые руды, пред-

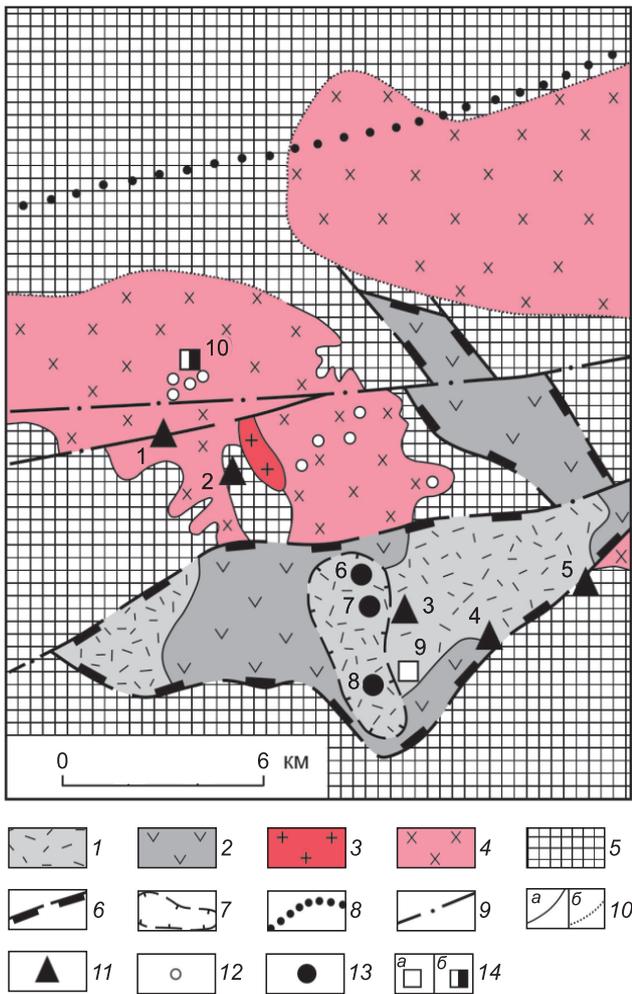
ставляющие скарново-медно-порфировый тип, выделенный М. Эйнаути с коллегами [22], определяют основную промышленную значимость этого объекта, а медно-порфировое оруденение развито в кварцевых диоритах Восточного массива. Все типы руд отличаются повышенной золотоносностью, обеспечивая промышленные концентрации золота в коре выветривания.

**Андезитоидные ВПП.** Для *молибден-медно-порфировых гранодиорит-монцонитовых КМПС* андезитоидных ВПП наиболее характерна сопряжённость медно-порфирового оруденения с эпитермальным золото-серебряным, золото-медным типа NS и золото-полисульфидным, мезотермальным золото-(сульфидно)-кварцевым, жильным и скарновым полиметаллическим, а также совмещение со скарированными свинцово-цинковыми залежами в карбонатных породах рамы рудоносного интрузива.

Наиболее представительным примером молибден-медно-порфировой гранодиорит-монцонитовой КМПС является Алмалыкская, включающая рядовые и крупные медно-порфировые, а также золоторудные и полиметаллические месторождения. Она расположена на юго-восточном фланге Бельтау-Кураминского андезитоидного ВПП, сформированного в три этапа в среднем карбоне–перми на южной окраине Северо-Кызылкумского микроконтинента (Узбекистан).

Алмалыкская КМПС образовалась на раннем этапе становления пояса на сочленении двух взаимосвязанных структур: магматогенного поднятия длительного унаследованного развития и примыкающего к нему компенсационного вулканотектонического грабена (рисунки 5, 6). Поднятие представляет собой выступ фундамента ВПП, сложенный среднепалеозойскими терригенно-флишоидными, вулканогенными, карбонатными отложениями и массивами разновозрастных гранитоидов. В строении крупного Алмалыкского плутона ( $C_2$ ) участвуют габброиды, габбродиориты, диориты, сиенитодиориты, гранодиориты, а также тела порфировых пород (гранодиоритов, кварцевых диоритов и кварцевых монцонитов), завершающих его становление. Более ранние плутоны принадлежат серпуховско-раннебашкирской рифтовой системе, пересекающей северный фланг поднятия, а поздние – Бельтау-Кураминскому ВПП. Вулканотектонический грабен, облекающий магматогенное поднятие с юга и востока, выполнен андезитовыми и андезидацитовыми вулканитами с интервалом накопления  $C_2$ , раннемосковский век –  $C_3$ . Вместе с поздними гранитоидами Алмалыкского плутона они образуют рудоносную ВПА раннего этапа становления Бельтау-Кураминского ВПП.

В выступе фундамента, в Алмалыкском плутоне и породах его рамы размещена внутренняя (стержневая)



**Рис. 5. Схема геологического строения Алмалыкского комплексного рудного узла (Срединный Тянь-Шань, Узбекистан):**

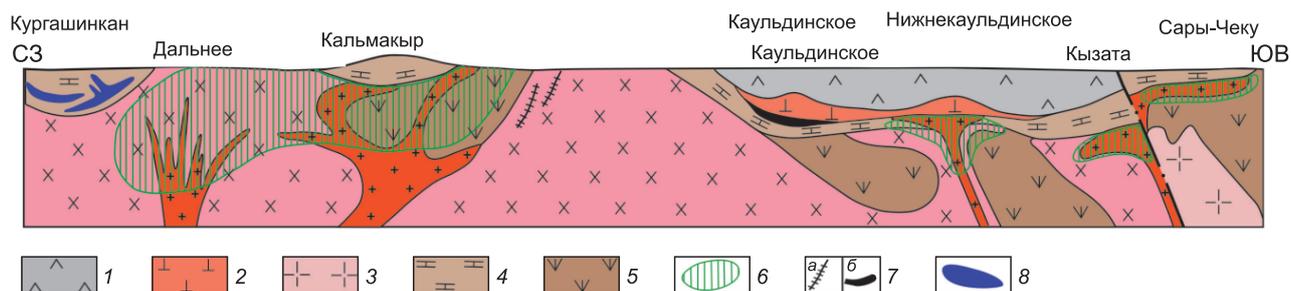
1–4 – рудоносная вулcano-плутоническая ассоциация: 1–2 – андезит-дацитовая формация ( $C_2m-C_3$ ): 1 – андезидацитовая и андезидацит-дацитовая толщи нерасчленённые, 2 – андезитовая толща, 3–4 – алмалыкский габбро-диорит-сиенитодиорит-кварцмонцитонитовый комплекс ( $C_2$ ), продуктивный на медно-порфировое оруденение: 3 – рудоносные кварцевые монцитонит-порфиры и гранодиорит-порфиры, 4 – диориты и сиенитодиориты; 5 – фундамент ВПП ( $S, D_1, D_3-C_1$ ); контуры: 6 – Алмалыкского вулcano-тектонического грабена, 7 – Каульдинской палеокотловины; 8 – Ангрэн-Чаткальская рифтовая зона ( $C_3y-s$ ); 9 – основные разрывные нарушения; 10 – геологические границы: а – установленные, б – предполагаемые по геофизическим данным под рыхлыми отложениями долины р. Ангрэн; 11–14 – месторождения: 11 – медно-порфировые (1 – Дальнее, 2 – Кальмакыр, 3 – Нижнекаульдинское, 4 – Кызата, 5 – Сарычеку); 12 – жильные золото-кварцевые (Актурпак, Гольдуран, Акджен, Сартабуткан) и полиметаллические (Накпай, Карахана, Кальтасай), 13 – эпитермальные золото-халцедон-кварцевые (Каульдинское, участки: 6 – Центральный, 7 – Южный, 8 – Южный-II), 14 – колчеданно-полиметаллические: а – непереработанные (9 – Кульчулак), б – скарнированные и частично регенерированные (10 – Кургашикан)

зона КМПС с крупными золото-молибден-медно-порфировыми месторождениями Кальмакыр и Дальнее (см. рис. 5). В качестве рудоносных выступают порфировые интрузивы гранодиоритов-кварцевых монцитонитов. На месторождении Дальнее они представлены крутопадающими дайками – апофизами расположенного на глубоких горизонтах штока. На Кальмакыре апофизы рудоносного интрузива сочетают крутопадающие и субгоризонтальные (под экраном карбонатной толщи) элементы [5].

Медно-порфировые месторождения Алмалыкской КМПС отличаются высокой золотоносностью руд, которая, как показано Е. И. Николаевой, обусловлена широким распространением в рудах более поздних собственно золоторудных полисульфидных минеральных комплексов. В периферических зонах МПС локализованы самостоятельные золоторудные жильные объекты (Актурпак, Гольдуран, Акджен, Сартабуткан), сложенные кварц-пирит-золоторудным комплексом с золотоносным пиритом, теллуридами золота, халькопиритом, галенитом, сфалеритом и блёклыми рудами.

Характерным объектом внутренней зоны Алмалыкской КМПС является полиметаллическое месторождение Кургашикан, локализованное в карбонатной толще фундамента ( $D_3-C_1$ ) и сформированное в ходе её накопления. При становлении МПМ его пластообразные залежи, сохранившиеся в провисе кровли Алмалыкского плутона, были интенсивно скарнированы, обогащены медью, золотом, селеном и теллуром и осложнены жилообразными апофизами со стороны висячего бока (см. рис. 6). Аналогичные залежи месторождения Кульчулак, расположенного во внешней зоне КМПС, таким преобразованиям не подвергались. Возможно, продуктами регенерации стратоидных залежей под воздействием Алмалыкского плутона могут быть и мелкие полиметаллические жилы (Накпай, Карахана, Кальтасай и др.) на периферии медно-порфировых штокверков месторождений Кальмакыр и Дальнее.

Внешняя зона Алмалыкской КМПС размещена в Центрально-Алмалыкском грабене, примыкающем к выступу фундамента с крупными медно-порфировыми месторождениями внутренней зоны. Грабен выполнен вулканитами ( $C_2m-C_3$ ) мощностью до 800 м, залегающими на терригенно-карбонатных отложениях с базальным горизонтом в основании. В разрезе выделяются нижняя андезитовая, средняя и верхняя андезидацитовые толщи. В вулканитах локализованы залежи Каульдинского эпитермального золоторудного месторождения и несколько рудопроявлений, а в выступах и относительно поднятых блоках основания грабена – рядовые медно-порфировые ме-



**Рис. 6. Схематический сводный разрез Алмалыкской комплексной медно-порфировой системы (КМПС):**

1 – андезит-дацитовая формация ( $C_2m-C_3$ ) нерасчленённая; 2 – андезидацитовые экструзивные купола ранней генерации, продуктивные на эпитермальное золотое оруденение; 3 – граносиениты и граниты ( $C_3-P$ ); 4–5 – фундамент ВПП: 4 – терригенно-карбонатная толща ( $D_3 fm$ ), 5 – андезиты, риодациты ( $D_1$ ); 6–8 – руды Алмалыкской комплексной РМС: 6 – золото-молибден-медно-порфировые, 7 – золото-кварцевые: а – жильные, б – стратойдные эпитермальные, 8 – скарнированные колчеданно-полиметаллические; см. услов. обозн. к рис. 5

сторождения Сарычеку, Кызата и Нижнекаульдинское (см. рис. 6).

В отличие от внутренней зоны МПС, где в качестве рудовмещающих выступают в основном магматиты Алмалыкского плутона, медно-порфировые месторождения внешней зоны локализованы в породах фундамента и во внутренних зонах рудоносных порфириновых интрузивов. Последние представлены субгоризонтальными линзо- и пластообразными телами и вместе с уплощёнными штокверками медно-порфириновых руд размещены под экраном фаменских известняков [5]. Месторождения Кызата и Сарычеку расположены по обе стороны крутопадающего Мисканского разлома, ограничивающего Алмалыкский грабен. Они являются частями некогда единого объекта, «разорванного» взбросо-сдвигом с амплитудой вертикального перемещения 500–700 м, горизонтального – 2,0–2,5 км. Нижнекаульдинское медно-порфириновое и Каульдинское эпитермальное золоторудное месторождения, образующие Каульдинскую КМПС второго порядка (см. рисунки 5, 6), находятся в центральной части грабена [16].

Нижнекаульдинское месторождение локализовано в поднятом блоке субстрата грабена, над которым мощность фаменских известняков и вулканитов андезитовой толщи резко сокращена. Рудоносный порфириновый интрузив гранодиоритов-кварцевых монзонитов Т-образной формы состоит из крутопадающего подводящего канала и близгоризонтальных апофиз-силлов, залегающих в толще известняков. В апикальной части он «надстроен» экструзивом андезидацитов мощностью до 400 м. Над палеоперфорностью андезитовой толщи возвышаются наиболее крупные выступы кровли экструзива в сопровождении продуктов разрушения и перемыва. Этим опре-

деляется возрастная интервал становления сопряжённого с ним рудоносного порфиринового интрузива и, соответственно, медно-порфириновых руд – в завершение накопления андезитовой толщи.

Каульдинское месторождение малосульфидной кварц-халцедон-золоторудной формации представлено десятью линзо- и пластообразными залежами на трёх участках. Все они приурочены к палеовулканической котловине с наиболее полным разрезом вулканитов. Промышленная золотоносность связана с линзами, гнёздами и прожилками криптозернистого колломорфно-полосчатого халцедоновидного кварца с высоким (до 17 г/т) содержанием золота. Ж. Н. Кузнецовым в рудах выявлены два продуктивных комплекса: основной золото-пирит-кварцевый с тонкодисперсным и коллоидным золотом и поздний кварц-карбонат-полисульфидный (присутствующий и в медно-порфириновых рудах Нижнекаульдинского месторождения) с более крупным и низкопробным золотом.

В качестве рудоносного выступает Каульдинский андезидацитовый экструзив, сформированный на палеоперфорности андезитовой толщи. К куполу выжимания высотой до 150 м примыкает лавовый шлейф протяжённостью до одного километра, который вмещает золоторудные залежи, локализованные в кластолах. В качестве рудоконтролирующих выступают палеовулканические депрессионные структуры. Присутствие рудокластов в породах кровли залежей указывает на их сингенетичность вмещающим породам, а также на близсинхронное формирование золоторудного и медно-порфиринового месторождений вслед за накоплением андезитовой толщи. От стержневой зоны Каульдинской КМПС с Нижнекаульдинским медно-порфириновым месторождением

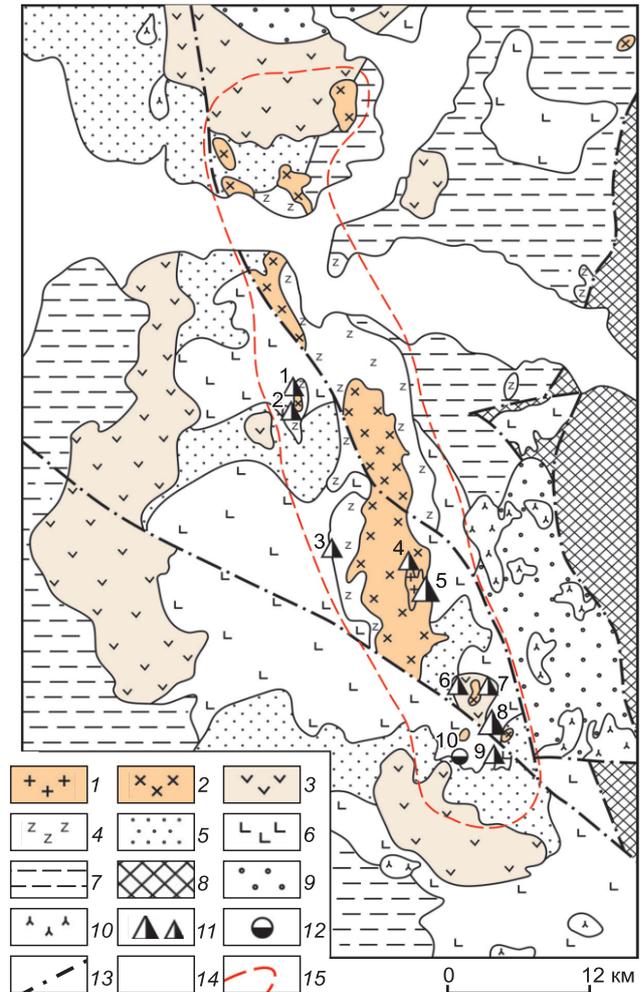
эпитермальные золоторудные залежи удалены по латерали на расстояние от 1 до 2,5 км, что отражает свойственный этой системе латеральный тип рудно-формационной зональности (см. рисунки 5, 6).

В молибден-медно-порфировых КМПС сопряжённые типы оруденения часто представлены жильно-штокверковыми мезо-эпитермальными объектами золото-полисульфидного типа, тяготеющими к периферии МПМ. Обычная для этих объектов золотоносная халькопирит-галенит-сфалеритовая минеральная ассоциация отличается несколько повышенной сульфидностью (1–5%), иногда содержит теллуриды, а Au/Ag – от 1–2:10 до 1:1. По составу она близка полисульфидному типу руд медно-порфировых месторождений, свойственному их внешним частям [11]. Сопряжённость таких типов оруденения свойственна ряду рудных узлов андезитоидных ВПП Чукотки, Корякско-Камчатского, Малокавказского и других регионов.

Примером является *Екдэкгычская КМПС* Баимского рудного района в юго-восточном звене позднечукотского Курьинского ВПП (Чукотка), где плутониты продуктивной монцонитовой формации слагают крупный Екдэкгычский плутон. Основными промышленно значимыми объектами являются золото-содержащие молибден-медно-порфировые месторождения – крупное Песчанка и рядовое Находка. Кроме них и нескольких медно-порфировых проявлений, присутствуют золото-серебросодержащие кварц-карбонат-полисульфидные и золото-кварцевые проявления (рис. 7).

Центральную часть КМПС занимает золото-медно-порфировое месторождение Песчанка (Баимское) с дайкообразным телом рудоносных кварцевых монцонит-порфиров протяжённостью 6 км [14]. От центра к периферии здесь отмечена смена следующих рудно-метасоматических зон: интенсивного штокверкового окварцевания («кварцевое ядро») с магнетит-сульфидной минерализацией → калиево-кремниевая с молибденит-блёклорудно-борнит-халькопиритовыми рудами → внутренняя пропиловитовая и сменяющая её филлизитовая с молибденит-содержащими пирит-халькопиритовыми рудами → внешняя пропиловитовая с «пиритовым ореолом». Основными полезными компонентами руд являются медь и молибден, главными попутными – золото и серебро. Расположенное южнее медно-порфировое месторождение Находка, локализованное в крупной вулканоструктуре комагматичной субщелочной андезитовой формации, имеет более высокий эрозионный срез над выклинками рудоносных порфировых интрузивов.

На южном и юго-западном флангах рудного узла, во внешней верхней зоне КМПС распространена золото-серебро-полисульфидная минерализация



**Рис. 7. Схема геологического строения Баимского рудного района (Чукотка).** Составлена с использованием данных [14]:

1–3 – позднечукотская ( $J_3v_3$ ) андезит-монцонитовая ВПА Курьинского ВПП: 1–2 – монцонитовая формация, продуктивная на медно-порфировые руды: 1 – рудоносные кварцевые монцониты и монцонит-порфиры, 2 – равномернозернистые и порфировидные монцониты, 3 – субщелочная андезитовая формация; 4–5 – предрудная позднечукотская ( $J_3v_3$ ) ВПА: 4 – габбро-плаггиогранитная формация, 5 – базальт-андезитовая молассовая формация; 6–8 – образования фундамента ВПП: 6–7 – позднечукотские: 6 – терригенно-вулканогенные с базальтами, андезитами, дацитами, риолитами, 7 – существенно терригенные, 8 – средне-позднепалеозойские Алучинского поднятия, включая гипербазитовую и кремнисто-базальтовую формации; 9–10 – раннемеловые образования Охотско-Чукотского ВПП: 9 – терригенные верхнемолассовые, 10 – экструзивно-субвулканические и интрузивные среднего и кислого состава; 11–12 – месторождения (крупный знак) и рудопроявления (мелкий знак): 11 – золотосодержащие молибден-медно-порфировые (1 – низовья р. Егдэкгыч, 2 – Лучик, 3 – руч. Удачный, 4 – Егдэкгыч, 5 – Песчанка, 6 – Малыш, 7 – Третий Весенний, 8 – Находка, 9 – Прямой), 12 – золото-серебряные полисульфидные (10 – Весеннее); 13 – основные разломы; 14 – четвертичные отложения; 15 – граница Баимского рудного района

(проявления Весеннее, Верное, Смешливое). На рудопроявлении Весеннее рудоносный шток монцитопорфиоров в приконтактовых зонах аргиллизитов и вторичных кварцитов содержит полисульфидную минерализацию, состоящую из халькопирита, галенита, сфалерита, блёклой руды и аргентита, с повышенным содержанием Au и Ag.

Совмещение медно-порфиорового и золотого оруденения проявлено и в отдельных блоках Охотско-Чукотского андезитоидного ВПП (Ольховкинская, Бурганчанская КМПС). В Чаплинской КМПС с раннемеловой андезит-диоритовой ВПА связаны медно-порфиоровые проявления Синвеем и Гагачье, локализованные в выступе фундамента, и золото-серебряные преимущественно золото-полисульфидного типа Хед, Алеут и Журавленок – в примыкающей к нему вулканотектонической депрессии.

Рудный узел Левинсон-Лессинга выделяется в северном окончании Срединного выступа фундамента неогенового Корякско-Центрально-Камчатского андезитоидного ВПП. Он представляет собой одноимённую вулканоструктуру, сложенную вулканитами продуктивной андезит-диоритовой ВПА и перекрывающей её андезитами толщи (рис. 8). В примыкающих к ней блоках фундамента в диорит-гранодиоритовых массивах продуктивного лавкинского комплекса размещены медно-порфиоровые проявления (Лагерное и Туманное), а в вулканитах их рамы – золото-серебро-полисульфидные (Оганчинское, Лазурное), локализованные в комагматичных вулканитах. На Оганчинском проявлении, изученном Ю. М. Щепотьевым [21], жильно-штокверковые золото-полисульфидные руды в кварц-серицит-гидрослюдистых метасоматитах приурочены к экзоконтакту массива диоритов-кварцевых диоритов с молибден-медно-порфиоровым проявлением Туманное, а на участке Интрузивный оба типа руд совмещены.

Золото-серебро-полиметаллические (галенит-сфалерит-халькопиритовые) руды Оганчинского проявления с низкими значениями Au/Ag = 1:1–2:1 и возрастающим с глубиной количеством сульфидов идентичны золото-полисульфидному минералого-геохимическому типу руд, формирующемуся на поздних этапах образования медно-порфиоровых месторождений, в их периферических частях [11]. Тесная пространственная связь этих проявлений, сформированных в ходе становления рудоносной диорит-андезитовой ВПА, подтверждает их принадлежность единой Левинсон-Лессинга КМПС.

Данные последних лет свидетельствуют о частом вхождении в молибден-медно-порфиоровые КМПС эпитермальных золото-медных и золото-серебряных месторождений типа HS, формирующихся в вулканоструктурах на периферии, в верхних частях МПС [3].

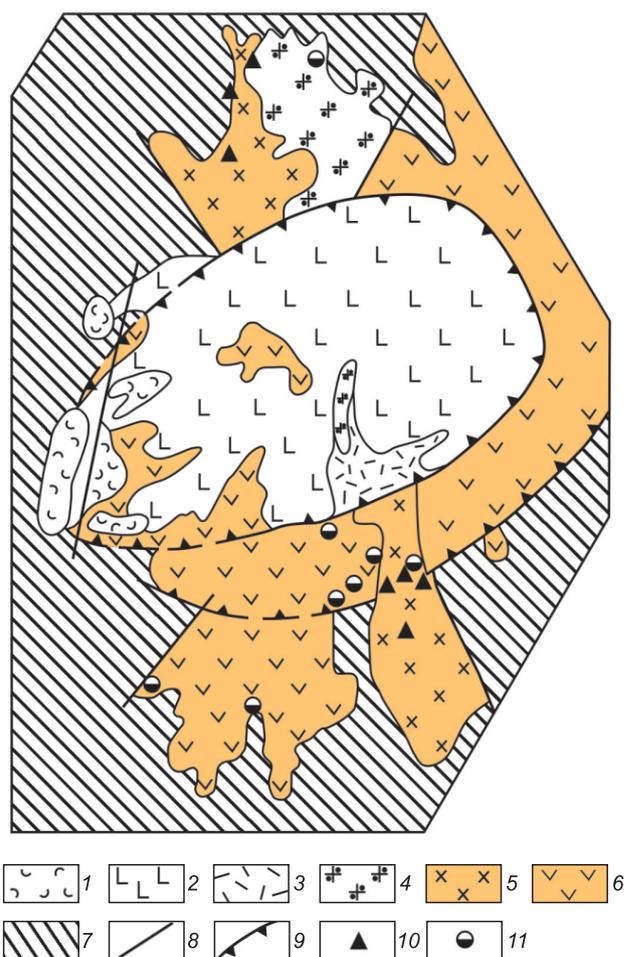
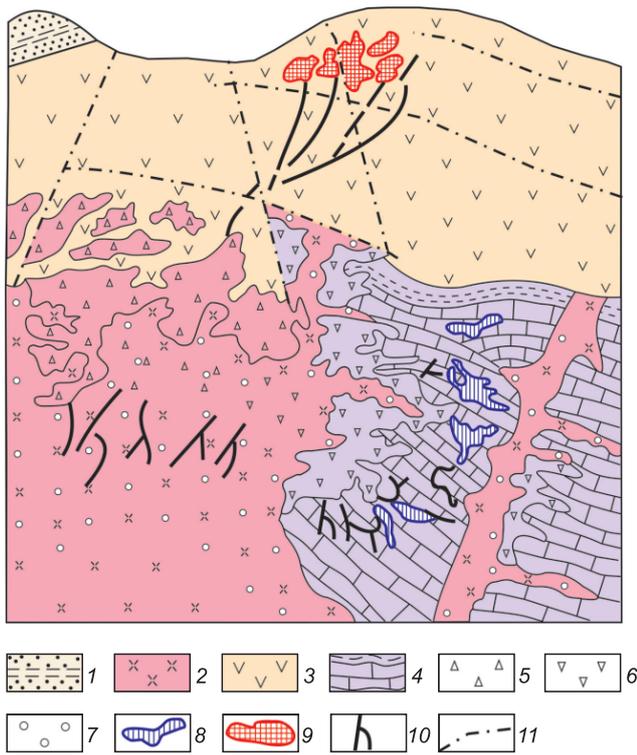


Рис. 8. Схематическая геологическая карта рудного узла Левинсон-Лессинга, Камчатка. По [21], с упрощением:

1 – современные отложения; 2–6 – образования неогенового Корякско-Центрально-Камчатского ВПП: 2 – андезитами, 3–6 – рудоносная ВПА: 3 – экструзивы риодацитов-риолитов, 4 – гранодиорит-порфиры, 5 – диориты, гранодиориты, 6 – андезиты, дациты; 7 – основание ВПП – вулканогенно-терригенные отложения палеогена; 8 – разломы; 9 – границы кальдеры; 10–11 – месторождения и рудопроявления: 10 – медно-порфиоровые, 11 – золото-полисульфидные и золото-серебряные

Они представлены стратоидными залежами, жилами, штокверками, оруденелыми брекчиями и зонами вкрапленности в алуниносодержащих метасоматитах (вторичных кварцитах). В рудах преобладают сульфиды с серой высшей окисленной формы – энаргит, люцит, теннантит; главными компонентами являются высокопробное Au и Cu (до 2–2,5%). Такие объекты известны в основном в кайнозойских ВПП со сравнительно небольшим эрозионным срезом: Лахоца (Венгрия); Пьерина, Янакоча, Эль Индио, Тамбо и Паскуа (Перу); Чекьюлимпе, Ла Пепе, Эль Хуесо



**Рис. 9. Геологический разрез месторождения Речк, Венгрия.**  
По И. Киссу и др., 1980 [12]:

1 – песчано-глинистые отложения олигоцена; 2–3 – образования позднеэоценового Внутренне-Карпатского ВПП: 2 – рудоносный интрузив диоритовых порфиритов, 3 – туфы и лавы андезитов; 4 – породы основания ВПП (известняки и сланцы триаса); 5 – эндоскарны; 6 – экзоскарны; 7–10 – типы оруденения: 7 – медно-порфировое месторождение Речк, 8 – скарновое полиметаллическое, 9 – прожилковое энаргит-люционитовое с золотом и серебром (проекция рудных тел месторождения Лахоци на плоскость разреза), 10 – жильное полиметаллическое; 11 – разрывные нарушения

(Чили); Нена и Уафи (Папуа–Новая Гвинея); Маунт-Каси (Фиджи); Гиджинбунг и Пик Хилл (Австралия).

КМПС Речк–Лахоци (Венгрия) размещена в выступе триасового основания позднеэоценового Внутренне-Карпатского андезитоидного ВПП. Она включает молибден-медно-порфировое месторождение Речк и расположенное на его дальнем фланге и выше по разрезу золото-медное месторождение Лахоци (рис. 9) [12]. Штоки диоритовых порфиритов, прорывающие толщу триасовых известняков и постепенно переходящие на верхних уровнях в андезиты, являются центром КМПС и контролируют положение разнообразной рудной минерализации. Прожилково-вкрапленные (молибден)-медно-порфировые руды в серицит-кварцевых метасоматитах и пропилитах внешней части эндоконтактной зоны и в силлооб-

разных апофизах интрузива сближены с гранат-актинолитовыми эндоскарнами, содержащими халькопирит-пиритовую минерализацию. В известняках экзоконтактной зоны рудоносного штока размещены пластообразные тела и линзы известковых скарнов с медными и цинково-медными рудами, в которых пирит ассоциирует с магнетитом, халькопиритом и пирротинном, а на более высоких горизонтах – со сфалеритом. Некоторые из них представляют собой залежи массивных колчеданных руд. На дальних флангах месторождения медная и медно-цинковая скарновая минерализация сменяется субпластовыми скарнированными свинцово-цинковыми залежами в известняках. Поздние полиметаллические жилы развиты как в рудоносном интрузиве, так и в скарнах.

Месторождение Лахоци типа HS, представленное субпластовыми, трубообразными и штокверковыми стратоидными залежами пирит-энаргит-люционитовых руд с высокими содержаниями Au и Ag, локализовано на фланге КМПС в аргиллизированных андезитах надинтрузивной зоны и на удалении от неё. Собственно, медно-порфировый Речк был обнаружен в ходе поискового бурения на глубоких горизонтах золото-медных залежей.

В Малетойваямском рудном узле неогенового Корякско-Центрально-Камчатского андезитоидного ВПП медно-порфировые проявления в телах диоритов известны в локальных выступах фундамента. Прожилково-вкрапленная медно-мышьяковая (энаргит-люционитовая) Au-Ag-содержащая минерализация в сероносных вторичных кварцитах локализована во внутренней зоне (Юбилейное) и на периферии (Октябрьское, Вамтуваямское) вулканической постройки, сложенной породами рудоносной миоценовой диорит-андезитовой ВПА с апофизами нескрытого интрузива, продуктивного на медно-порфировые руды. Очевидно, к этому же типу может быть отнесено и эпитермальное золото-теллурическое месторождение Озерновское, содержащее сульфосольную фаматинит-энаргит-люционитовую серную минерализацию в алунитовых кварцитах [6].

В КМПС в качестве сопряжённых с медно-порфировыми выступают также золото-порфировые объекты, представленные штокверковыми рудами в эндо- и экзоконтактных зонах порфировых интрузивов и в самостоятельных телах магматитов рудоносной ВПА.

В Томинско-Березняковской КМПС (Южный Урал) андезитоидного Увельско-Еленовского ВПП, содержащего в основании продукты базальтоидного магматизма, раннекаменноугольная рудоносная диорит-андезитовая ВПА сопровождается медно-порфировыми (Томинское, Калиновское, Биргильдинское) и золото-порфировым (Березняковское) месторождениями. Основной объект – Томинское золото-

медно-порфировое месторождение локализовано в эндо-экзоконтактовой зоне массива диоритов-кварцевых диоритов. На Березняковском золото-порфировом месторождении рудоносным является экстрезивно-субвулканический массив порфировых диоритов-андезитов. Золото-сульфидный штокверк, прослеженный до глубины более 450 м, локализован в кварцевых порфировых диоритах, превращённых в рудной зоне в кварц-серицитовые метасоматиты и кварциты. На расположенном в том же районе Николае-Святительском месторождении промышленное золото-порфировое оруденение на глубоких горизонтах сменяется минерализацией медно-порфирового типа.

Присутствие карбонатных пород в породах рамы рудоносных интрузивов обуславливает появление в КМПС андезитовидных ВПП скарновых месторождений, состав которых напрямую зависит от типа фундамента пояса. В ВПП с фемическим составом фундамента – это золотоносные медные и медно-магнетитовые скарны, совозрастные (медные) или прешествующие (магнетитовые) медно-порфировым рудам (Майданпек, Великий Кривель, Сербия; Саяк и Каратас, Казахстан). Типичные для таких обстановок рудные узлы (Fe, Cu, Au) широко распространены на Урале, образуя группу КМПС «ауэрбаховского типа», связанную со становлением рудоносной известково-щелочной габбро-андезибазальт-диорит-андезитовой ВПА. В эту группу входят (с севера на юг): Янаслорский, Хараматолоуский, Новогодненский, Элькошорский, Масловский, Ауэрбаховский, Травянский, Тахталымский, Круглогорский, Тарутинский, Варваринский и Баталинский рудные узлы, характеризующиеся пространственным совмещением нескольких типов оруденения из числа перечисленных: магнетитового (магматического, вулканогенно-осадочного, в том числе скарнированного, и скарнового); халькопирит-пиритового (медно-порфирового, скарнового, стратиформного вулканогенно-осадочного и вулканогенного); золоторудного (мезотермального золото-кварцевого жильного и штокверкового, вкрапленного золото-кварц-сульфидного, эпитептермального вулканогенно-осадочного). Из редко встречающихся типов можно отметить боросиликатное стратиформное и жильное оруденение в Ауэрбаховской КМПС и медно-титаномагнетитовое магматическое в Круглогорской.

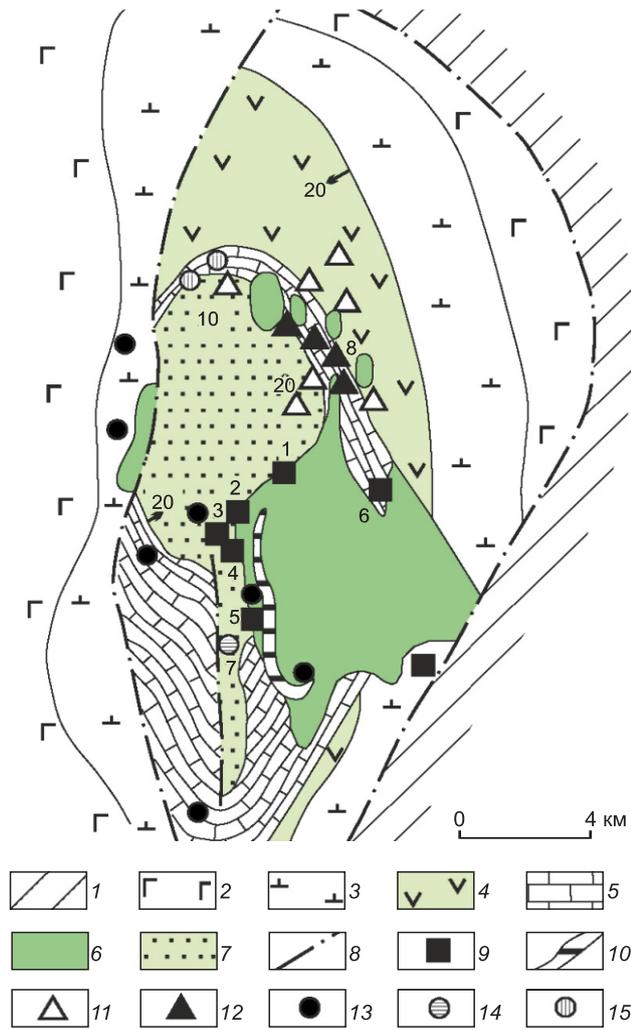
Ярким примером разнообразия совмещённого оруденения служит *Ауэрбаховская КМПС* в раннедевонском Ауэрбаховско-Новогодненском андезитовидном ВПП, сформированном на фемическом субстрате. Как было показано ранее [15], здесь сосредоточено несколько десятков месторождений магнети-

товых, медных и золотых руд всех перечисленных выше типов (рис. 10).

Сопряжённое скарново-медно-порфировое и золотое оруденение проявлено и в отдельных блоках Охотско-Чукотского андезитовидного ВПП. В *Медьгорской КМПС* на северо-восточном фланге Омолонского массива присутствуют скарново-золото-медно-порфировый (месторождения Медь-Гора и Кэн), жильный золото-кварцевый и золото-сульфидно-кварцевый, а также золото-серебряный, преимущественно золото-серебро-полисульфидный (проявление Извилистый и др.) типы оруденения. Все они сопряжены с раннемеловой рудоносной андезит-диоритовой ВПА. Характерно проявление латеральной рудно-формационной зональности с размещением скарново-медно-порфировых и мезотермальных золоторудных объектов в выступе фундамента, а золото-серебряных – в примыкающей к нему вулканотектонической депрессии [6].

Вместе с тем ряд андезитовидных ВПП сформирован на терригенно-карбонатных толщах окраин карбонатных платформ с характерными для них стратиформными свинцово-цинковыми месторождениями миссисипского типа, которые оказываются в сфере воздействия плутонитов рудоносных формаций. Подвергаясь скарнированию и частичной регенерации, эти залежи утрачивают признаки сингенетичности с образованием скарновых свинцово-цинковых рудных тел, а также полиметаллических жил. Таким образом, в структуре КМПС реализуется вариант совмещённого (возможного) оруденения – первичного метасоматического (сингенетичного вмещающим породам) и скарнированного свинцово-цинкового с медно-порфировыми. Так, в Карпато-Балканском регионе свинцово-цинковые с золотом и серебром проявления известны на флангах медно-порфировых месторождений Златица-Плавица, Медет, Златно и других [10, 12].

Наиболее масштабно этот тип медно-молибден-порфировых КМПС представлен в горнорудном районе Бингхэм Каньон (штат Юта, США) эоценового андезитовидного Уосатчского ВПП, сформированного на мощном осадочном чехле окраины Вайомингского кратона. Стратоидные свинцово-цинковые залежи и жилы в известняках располагаются как в ореоле пиритизации, так и за его пределами, на удалении до нескольких километров от штока кварцевых монзонит-порфиров, с которым сопряжено гигантское золото-молибден-медно-порфировое месторождение Бингхэм [12]. Это даёт достаточно веские основания для отнесения стратоидных свинцово-цинковых залежей района Бингхэм к первично сингенетичным, частично метаморфизованным и регенерированным



**Рис. 10. Схема геологического строения Ауэрбаховского рудного района (Северный Урал):**

1 – серпентиниты; 2–3 – породы основания ВПП: 2 – базальты и андезибазальты, 3 – трахибазальты и трахиандезиты; 4–7 – рудоносная габбро-диорит-андезибазальт-андезитовая ВПА раннедевонского Ауэрбаховско-Новогодненского ВПП: 4 – андезибазальты и андезиты нижней толщи, 5 – известняки, 6 – плутониты габбро-диорит-гранодиоритовой формации, 7 – андезибазальты, андезиты, дациты верхней толщи (вулканокластиты, лавы, пирокластиты, экструзивы); 8 – разломы; 9–15 – типы оруденения: 9–10 – магнетитовое: 9 – вулканогенное, скарновое и скарнированное, 10 – вкрапленное гистеромагнетическое и ксенолиты в андезибазальтовом экструзиве, 11 – сульфидное магнетитсодержащее, 12 – медно-скарновое (скарново-медно-порфировое) и медно-порфировое в диоритах, 13 – жильное золото-кварцевое, 14 – золото-реальгарпиритовое; 15 – золото-полисульфидное; местоположение месторождений: 1–6 – магнетитовые: 1 – Ново-Песчанское, 2 – Северо-Песчанское, 3 – Западно-Песчанское, 4 – Южно-Песчанское, 5 – Северо-Воронцовское, 6 – Ауэрбаховское, 7 – Воронцовское золото-реальгарпиритовое, 8 – Вадимо-Александровское скарново-медно-порфировое, 9 – Башмаковское и Богословское сульфидные пирит-пирротин-халькопиритовые, 10 – Васильевское золото-полисульфидное

под воздействием продуктов многофазного монцитонитового плутонизма, включая внедрение порфирового штока, с которым сопряжено это молибден-медно-порфировое месторождение.

Таковую же природу имеют свинцово-цинковые залежи в рудных полях некоторых медно-порфировых месторождений Юго-Восточной Европы (Речк, Венгрия; Злата Баня, Словакия; Окно-де-Фьер, Румыния). Особенно наглядно процесс преобразования подобных залежей проявлен на месторождении Кургашикан Алмалыкской КМПС (Узбекистан), где в фундаменте ВПП присутствуют и первичные свинцово-цинковые залежи, сохранившие все признаки сингенетичности (месторождение Кульчулак).

Имеется достаточно оснований для включения в КМПС мезотермальных жильных полиметаллических руд, являющихся продуктами поздних стадий развития медно-порфировых систем и тяготеющих к внутренним частям пропиловитовых ореолов. В то же время среди таких жил, как и среди находящихся на флангах и в верхних частях МПС, могут присутствовать полиметаллические жилы, являющиеся продуктами регенерации свинцово-цинковых залежей, сингенетичных карбонатным породам рамы рудоносных интрузивов. Примером этому служат проявления полиметаллической минерализации (Накпай, Каракхана, Кальтасай и др.) на периферии медно-порфировых штокверков месторождений Кальмакыр и Дальнее в Алмалыкской КМПС (Узбекистан).

Отличительная особенность молибден-медно-порфировых КМПС заключается в возможности появления в их структуре совмещенного оруденения более поздних этапов развития андезитоидных ВПП, сопряженного с другими рудоносными ВПА и формациями, продуктивными на другие типы месторождений. Такие системы представляют собой рудные районы и узлы с комплексной металлогенией, возникшие в связи с телескопированием оруденения, принадлежащего нижним и средним, реже верхним этапам поясов, а также их фундаменту (Златно, Сербия; Коунрад, Акчатау, Карагайлы, Казахстан). Обычно они приурочены к плутогенным поднятиям, к участкам резкого нарушения линейной конфигурации ВПП и сочленения крупных региональных и глубинных разломов. Не исключено, что такие комплексные рудные узлы фиксируют зоны тепломассопереноса – своеобразные локальные «горячие точки», длительно существующие во всем временном интервале формирования ВПП.

*Коунрадская (Коньратская) КМПС (Казахстан)* приурочена к крупному выступу фундамента Прибалхашско-Илийского андезитоидного ВПП. Сопоставление палеотектонических схем позднего палеозоя [1, 2] показывает, что в формировании пояса выделяются три этапа:  $C_{2-3}$ ,  $C_3-P_2$  и  $P_2-T_1$ . В первый

из них образуется андезит-риолит-гранодиоритовая ВПА, с плутонитами которой (балхашский и топарский комплексы) ассоциируют медно-порфиновые (Коунрад, Актогай и др.), а также золоторудные мезотермальные (Слушюкы, Музбель) месторождения, а с вулканитами – золото-серебряные месторождения и проявления (Таскора, Караоба, Аяк-Уайт, Бесшюкы, Наурызбай и др.) [7]. Образования второго этапа представлены дацит-риолит-гранит-лейкогранитной ВПА, с которой связаны редкометалльные (Mo, W, Sn-W, Hg) объекты. Со щелочными магматитами третьего этапа ассоциирует редкоземельное оруденение.

Стержневым элементом КМПС служит крупное медно-порфировое месторождение Коунрад (Коньрат), размещающееся в выступе фундамента в пределах Токрауского плутона балхашского комплекса [2]. Рудовмещающей является палеовулканическая постройка центрального типа, сложенная вулканитами рудоносной андезит-риолит-гранодиоритовой ВПА раннего этапа ВПП. Интрузив гранодиорит-порфиоров третьей фазы балхашского комплекса и сопряжённый с ним рудный штокверк сложной воронкообразной формы локализованы в жерловой зоне. Вулканиты в ней превращены во вторичные кварциты, сменяющиеся в направлении флангов кварц-серицитовыми метасоматитами, аргиллизитами и пропилитами. В рудоносных гранодиорит-порфирах до глубины 80–300 м в кварц-серицитовых метасоматитах развиты богатые энаргит-халькозиновые руды зоны вторичного сульфидного обогащения, а ниже, до глубины 700 м и более – убогие халькопиритовые медно-порфиновые руды с содержанием Cu 0,3%.

С востока и северо-востока к вулканоструктуре, вмещающей медно-порфировое месторождение Коунрад, примыкает Восточно-Коунрадский массив рудоносной гранодиорит-гранит-лейкогранитной формации (акчатауский комплекс) второго этапа становления ВПП. К его апикальной части приурочены жильно-штокверковые редкометалльные (Mo, W) месторождения Восточный, Северный, Южный Коунрад и Вольфрамтовые сопки. Крутопадающие кварцево-жильные рудные тела имеют кулисное строение по простиранию и падению и контролируются трещинными зонами протяжённостью до нескольких км при мощности десятки–сотни метров. В.Ф. Чухровым [20] установлено 3 типа жил: высокотемпературные кварцевые молибденовой и вольфрамовой формаций, разобщённые в пространстве, и средне-температурные позднего полосчатого кварца. Крупное месторождение Восточный Коунрад представлено кварц-молибденитовыми жилами протяжённостью 8 км, а также двумя более поздними кварц-

молибденит-вольфрамитовыми жилами. Кварцевые жилы и слюдяно-кварцевые околожильные грейзены содержат богатые молибденовые руды. Среднее содержание молибдена по месторождению – 0,424%, вольфрама – 0,013%.

Совмещение рудных образований раннего и среднего этапов становления Прибалхашско-Илийского ВПП характерно и для *Акчатауской КМПС*, также приуроченной к выступу фундамента пояса. Оруденение раннего этапа представлено медно-порфировым, золото-кварцевым и жильно-штокверковым свинцово-цинковым типами. С массивом продуктивного топарского комплекса здесь связаны медно-порфиновые проявления Алтуайт, Жакедуан и Косчеко-Восточный, а также жильное золото-кварцевое Аэродромное. К относительно опущенному блоку, сложенному вулканитами дацит-риолитовой формации в объёме керегетасской свиты (C<sub>2-3</sub>), приурочено жильно-штокверковое свинцово-цинковое проявление Кузюкадыр. Рудные жилы, штокверки и минерализованные брекчии локализованы в туфах кислого состава, в экзоконтактной зоне штока гранодиоритов топарского комплекса, продуктивного на медно-порфиновые руды. Главные рудные минералы – пирит, галенит, сфалерит, второстепенные – халькопирит и самородное серебро.

Со вторым этапом становления Прибалхашско-Илийского ВПП здесь связано крупное месторождение Акчатау (и Акчатау-Западный) и ряд проявлений (Аксай, Карашин) редкометалльной кварцевожильно-грейзеновой формации. Все они локализованы в апикальной части слабоэродированного массива лейкократовых гранитов продуктивного акчатауского комплекса гранит-лейкогранитной формации.

В Акчатау-Коунрадском рудном районе, включающем обе рассмотренные КМПС, в последние десятилетия выявлен ряд золото-серебряных объектов, сформированных, как и медно-порфиновые, в рамках раннего этапа становления пояса. Среди них – мелкое месторождение Наурызбай с запасами Au до 478 кг при среднем содержании 17 г/т, а также несколько рудопроявлений золото-серебряного типа в вулканитах андезит-дацитовой формации [18]. На месторождении Наурызбай рудная минерализация ассоциирует с линзовидным телом монокварцитов. В золото-серебряных рудах с отношением Au к Ag 1:20 среди рудных минералов преобладают пирит (5–10%) и антимонит (до 5–40%), менее распространены колорадоит, высокопробное самородное золото и теллур, а также пираргирит, реальгар, галенит, халькопирит и другие минералы, а нерудные представлены в основном кварцем, гидрослюдами и пиррофиллитом.

Таким образом, Акчатау-Коунрадский рудный район характеризуется комплексной металлогенией,

обусловленной телескопированием медно-порфиروهого, золото-кварцевого, золото-серебряного и жильно-штокверкового свинцово-цинкового оруденения Коунрадской и Акчатауской КМПС, сформированных в связи с ВПА раннего этапа становления ВПП, и более позднего редкометалльного (MoW) в ассоциации с плутонитами второго этапа.

В комплексах основания молибден-медно-порфировых КМПС, принадлежащих андезитоидным ВПП, в отдельных случаях присутствуют медно-колчеданные и колчеданно-полиметаллические руды (Панагюрский рудный район в Болгарии, Кедабекский в Закавказье), за счёт которых формируются комплексные рудные узлы с «унаследованной металлогенией» [27]. Воздействие высокотемпературного поля, сопровождающего становление интрузивов МПС, приводит к перекристаллизации колчеданных руд и формированию новых минеральных ассоциаций в виде жил и прожилков (Карагайлы, Казахстан; Бор, Сербия). На месторождении Таш-Яр (Южный Урал) на основе анализа изменений содержаний железа и элементов-примесей в рудных минералах различных генераций и восстановления температурных режимов образования и преобразования колчеданных руд установлено, что последние в течение длительного времени (около 1 млн лет) находились в высокотемпературном и высокоградиентном поле более позднего гранитоидного интрузива [19]. Результатом стало возникновение метаморфической зональности, почти полная перекристаллизация колчеданных руд и формирование новых высокотемпературных минеральных парагенезисов, экстракция и рассеяние рудного вещества с образованием новых рудных тел – жильных и прожилковых в крутопадающих зонах (рис. 11).

Следует отметить, что для базальтоидных ВПП присутствие колчеданных залежей в основании золото-медно-порфировых КМПС не характерно, что обусловлено автономностью зон развития колчеданосных вулканогенных формаций и следующих за ними ВПА, продуктивных на медно-порфиновые и сопряжённые руды. Это обстоятельство, а также простое строение базальтоидных поясов, состоящих из единственной рудоносной ВПА, ограничивают возможности формирования в них КМПС с совмещённым оруденением. Совместное нахождение месторождений, принадлежащих базальтоидным вулканоплутоническим поясам с одной стороны, и их основанию, с другой, может быть достигнуто только за счёт процессов скупивания, достаточно широко проявленных в шовных зонах разного масштаба. Примером может служить рассмотренная выше Воскресенская КМПС с проявлением хромитовых руд в блоках базит-гипербазитового основания.

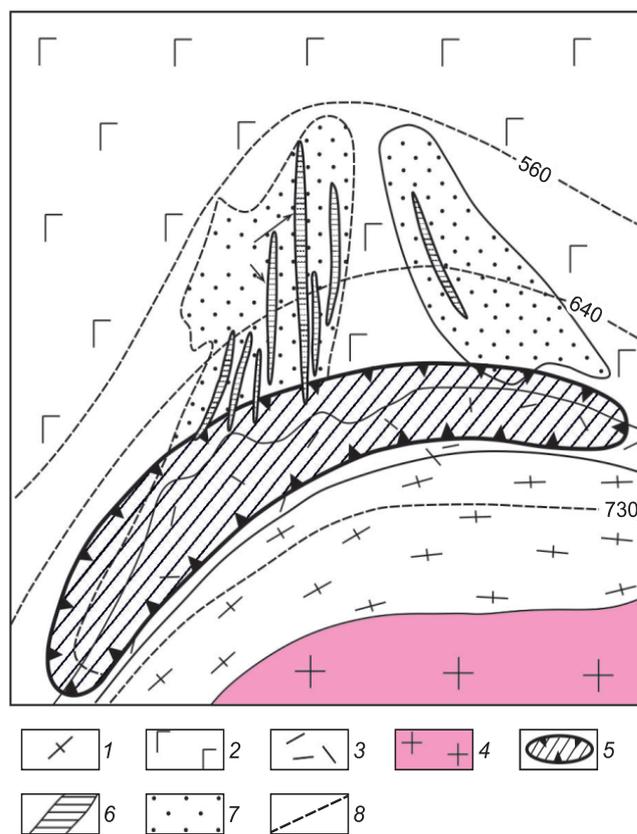


Рис. 11. Строение месторождения Таш-Яр, Ю. Урал, по [19], с упрощением:

1 – гнейсы; 2 – порфировые базальты; 3 – риолитовый порфир; 4 – гранитоиды; 5 – первичные колчеданные руды и их контур; 6 – жильно-прожилковые рудные тела; 7 – метасоматиты; 8 – изограды

Таким образом, выделенные две группы золото-медно-порфировых и молибден-медно-порфировых месторождений, принадлежащих соответственно базальтоидным и андезитоидным ВПП, заметно отличаются не только собственными характеристиками, но и строением соответствующих комплексных МПС, стержневыми элементами которых они являются. Принципиальные различия между этими КМПС отражены в наборе рудно-формационных типов сопряжённого и совмещённого оруденения.

Приведённые данные позволяют сделать следующие выводы:

1. Месторождения медно-порфирового семейства отчётливо разделяются на две группы – золото-медно-порфиновые и молибден-медно-порфиновые, которые различаются по совокупности формационных признаков и принадлежат двум рудно-формационным типам.

2. МПМ или МПС представляют собой главные, стержневые элементы более крупных рудно-магматических систем с комплексной металлогенезией или комплексных МПС (КМПС) – золото-медно-порфировых диоритовых и молибден-медно-порфировых гранодиорит-монцитонитовых.

3. КМПС двух выделенных типов, обладая рядом сближающих их признаков, в то же время обнаруживают специфические черты строения и особенности входящих в их состав рудных образований. Для золото-медно-порфировых диоритовых КМПС характерно присутствие следующих сопряжённых типов оруденения: золото-сульфидно-кварцевого, золото-порфирового, эпитептермального золото-теллурического и золото-полисульфидного, реже золото-медного (люционит-энаргитового), а также скарнового и вулканогенного медного и медно-магнетитового. Этим КМПС не свойственно совмещённое оруденение.

Молибден-медно-порфировые гранодиорит-монцитонитовые КМПС отличаются существенно более разнообразными типами сопряжённого оруденения: эпитептермального золото-серебряного разной сульфидизации, (серебро)-золото-медного (люционит-энаргитового), золото-полисульфидного, золото-порфирового, мезотермального жильного золото-кварцевого и золото-сульфидно-кварцевого, а также скарнового и жильного полиметаллического. Существенным отличием КМПС андезитовидных ВПП является появление совмещённого оруденения более поздних этапов их становления (в основном редкометалльного), а также более раннего в комплексах фундамента – преимущественно скарнированного свинцово-цинкового миссисипского типа в карбонатных толщах. В обстановках фемического субстрата КМПС андезитовидных поясов по набору сопряжённого оруденения сближаются с золото-медно-порфировыми КМПС базальтоидных ВПП.

4. Установленные различия в характеристиках золото-медно-порфировых и молибден-медно-порфировых КМПС подтверждают обоснованность выделения двух рудно-формационных типов месторождений медно-порфирового семейства.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Геологическое строение СССР и закономерности размещения полезных ископаемых: в 10 томах / Гл. ред. Е. А. Козловский. Т. 6: Казахстан и Средняя Азия, кн. 1: Казахская складчатая область // Н. П. Михайлов, Ю. П. Селиверстов, М. Г. Хисамутдинов и др. – Л.: Недра, Ленинградское отделение, 1989. – 234 с.*
2. *Даукеев С. Ж., Ужкенов Б. С., Абдуллин А. А. и др. Глубинное строение и минеральные ресурсы Казахстана. Т. 2. Металлогения. – Алматы, 2002. – 272 с.*
3. *Звездов В. С. Обстановки формирования крупных и сверхкрупных медно-порфировых месторождений // Отечественная геология. – 2019. – № 5. – С. 16–35.*
4. *Звездов В. С. Структурно-петрофизические обстановки формирования медно-порфировых штокверков месторождений // Отечественная геология. – 2021. – № 6. – С. 3–44.*
5. *Звездов В. С., Мигачев И. Ф., Минина О. В. Морфологические типы медно-порфировых штокверков и обстановки их формирования // Руды и металлы. – 2018. – № 4. – С. 37–52.*
6. *Звездов В. С., Мигачев И. Ф., Минина О. В. Прогностико-поисковые модели комплексных рудно-магматических систем вулканоплутонических поясов Востока России // Отечественная геология. – 2011. – № 3. – С. 13–21.*
7. *Кошкин В. Я., Сушков В. А. Историко-геологическая и геодинамическая позиция золоторудных месторождений Северного Прибалхашья // Геология и разведка недр Казахстана. – № 5. – 1995. – С. 24–29.*
8. *Кривцов А. И. Геологические основы прогнозирования и поисков медно-порфировых месторождений. – М.: Недра, 1983. – 256 с.*
9. *Кривцов А. И. Прикладная металлогения. – М.: Недра, 1989. – 288 с.*
10. *Кривцов А. И., Звездов В. С., Мигачев И. Ф., Минина О. В. Медно-порфировые месторождения. Сер. Модели месторождений цветных и благородных металлов. – М.: ЦНИГРИ, 2001. – 323 с.*
11. *Кривцов А. И., Мигачев И. Ф., Минина О. В. Зональность и золотоносность руд медно-порфировых месторождений // Геология, методы поисков и разведки месторождений металлических полезных ископаемых. Обзор ВИЭМС. – М., 1985. – 47 с.*
12. *Кривцов А. И., Мигачев И. Ф., Попов В. С. Медно-порфировые месторождения мира. – М.: Недра, 1986. – 236 с.*
13. *Мигачев И. Ф. Металлоносность рудно-магматических систем – прогнозы и их реализация // Базовые доклады «Прогноз, поиски, оценка рудных и нерудных месторождений на основе их комплексных моделей – достижения и перспективы». Научно-практич. конф. – М.: ЦНИГРИ, 2006. – С. 47–57.*
14. *Мигачев И. Ф., Гирфанов М. М., Шишаков В. Б. Медно-порфировое месторождение Песчанка // Руды и металлы. – 1995. – № 3. – С. 48–58.*
15. *Минина О. В. Ауэрбаховская комплексная рудно-магматическая система на Среднем Урале // Отечественная геология. – 1994. – № 7. – С. 17–23.*
16. *Минина О. В. Модель Каульдинской рудно-магматической системы (Узбекистан) как основа прогноза и поисков эпитептермальных месторождений золота // Руды и металлы. – 2006. – № 3. – С. 83–90.*
17. *Российский металлогенический словарь // Гл. ред. А. И. Кривцов. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2003. – 319 с.*
18. *Сайдашева Ф. Ф. Эпитептермальное золото-серебряное оруденение Акшатау-Коньратского рудного района*

- (Центральный Казахстан) // Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Алматы, 2010. – 25 с.
19. *Сначев В. И., Романовская В. А.* Контактный метаморфизм колчеданных месторождений уральского типа // Вестник МГУ. Сер. геологическая. – 1989. – № 4. – С. 33–39.
  20. *Чухров Ф. В.* Минералогия и зональность Восточного Коунрада. – М.: АН СССР, 1960. – 236 с.
  21. *Щепотьев Ю. М., Вартамян С. С., Орешин В. Ю., Гузман Б. В.* Золоторудные месторождения островных дуг Тихого океана. – М.: ЦНИГРИ, 1989. – 244 с.
  22. *Эйнауди М. Т., Мейнерт Л. Д., Ньюбери Дж.* Скарновые месторождения // Генезис рудных месторождений. Т. 1. – М.: Мир, 1984. – 203 с.
  23. *Chang Z., Hedenquist J. W., White N. C. et al.* Exploration Tools for Linked Porphyry and Epithermal Deposits: Example from the Mankayan Intrusion-Centered Cu-Au District, Luzon, Philippines // *Economic Geology*. – 2011. – V. 106, I. 8. – P. 1365–1398.
  24. *Hollister V. F.* Regional characteristics of porphyry copper of South America. *Trans. A. I. M. E.* – № 1. – 1974. P. 45–53.
  25. *Lowell J. D., Guilbert J. M.* Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry copper deposits // *Econ. Geol.*, 1970, vol. 65, P. 373–409.
  26. *Maryono A., Harrison R. L., Cook D. R., Rompo I., Terence G. H.* Tectonics and Geology of Porphyry Cu-Au Deposits along the Eastern Sunda Magmatic Arc, Indonesia // *Economic Geology*. – 2018. – V. – 113. – P. 7–38.
  27. *Migachev I.* Complex ore nodes of marginal volcanoplutonic belts and their geological setting // *Resource Geology Special Issue*. 1993. – № 15. – P. 199–209.
  28. *Pollard P. J., Taylor R. J., Peters L.* Ages of Intrusion, Alteration, and Mineralization at the Grasberg Cu-Au Deposit, Papua, Indonesia // *Economic Geology*. – 2007. V. 100. – P. 1005–1020.
  29. *Sillitoe R. H.* Porphyry Copper Systems // *Economic Geology*. – 2010. – V. 105. – P. 3–41.
  30. *Waters P. J., Cook D. R.* Porphyry and Epithermal Deposits and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar Geochronology of the Baguio District, Philippines // *Economic Geology*. – 2011. V. 106. – P. 1335–1363.
  4. [Environments of formation of large and super-large porphyry copper deposits]. *Otechestvennaya geologiya*, 2019, No. 5, P. 16–35. (In Russ.)
  5. *Zvezdov V. S., Migachev I. F., Minina O. V.* Morfologicheskiye tipy medno-porfirovykh shtokverkov i obstanovki i ikh formirovaniya [Morphological types of porphyry copper stockworks and conditions of their formation]. *Rudy i metally*, 2018, No. 4, P. 37–52. (In Russ.)
  6. *Zvezdov V. S., Migachev I. F., Minina O. V.* Prognozno-poiskovyye modeli kompleksnykh rudno-magmaticheskikh sistem vulkano-plutonicheskikh pojasov Vostoka Rossii [Predictive-search models of complex ore-magmatic systems of volcano-plutonic belts in the East of Russia]. *Otechestvennaya geologiya*, 2011, No. 3, P. 13–21. (In Russ.)
  7. *Koshkin V. Ya., Sushkov V. A.* Istoriko-geologicheskaya i geodinamicheskaya pozitsiya zolotorudnykh mestorozhdeniy Severnogo Pribalkhashya [Historical-geological and geodynamic position of gold deposits in the Northern Balkhash]. *Geologiya i razvedka neдр Kazakhstana*, No. 5, 1995, P. 24–29. (In Russ.)
  8. *Krivtsov A. I.* Geologicheskiye osnovy prognozirovaniya i poiskov medno-porfirovykh mestorozhdeniy [Geological bases of forecasting and prospecting of porphyry copper deposits]. Moscow, Nedra publ., 1983, 256 p. (In Russ.)
  9. *Krivtsov A. I.* Prikladnaya metallogeniya [Applied metallogeny]. Moscow, Nedra publ., 1989, 288 p. (In Russ.)
  10. *Krivtsov A. I., Zvezdov V. S., Migachev I. F., Minina O. V.* Medno-porfirovyye mestorozhdeniya [Copper-porphyry deposits]. Ser. Modeli mestorozhdeniy tsvetnykh i blagorodnykh metallov, Moscow, TSNIIGRI publ., 2001, 323 p. (In Russ.)
  11. *Krivtsov A. I., Migachev I. F., Minina O. V.* Zonalnost i zolotonosnost rud medno-porfirovykh mestorozhdeniy [Zoning and gold content of ores of porphyry copper deposits]. *Geologiya, metody poiskov i razvedki mestorozhdeniy metallicheskih poleznykh iskopayemykh*. Obzor VIEMS. Moscow, 1985, 47 p. (In Russ.)
  12. *Krivtsov A. I., Migachev I. F., Popov V. S.* Medno-porfirovyye mestorozhdeniya mira [Copper-porphyry deposits of the world]. Moscow, Nedra publ., 1986, 236 p. (In Russ.)
  13. *Migachev I. F.* Metallonosnost rudno-magmaticheskikh sistem – prognozy i ikh realizatsiya [Metal content of ore-magmatic systems – forecasts and their implementation]. Bazovyye doklady “Prognoz, poiski, otsenka rudnykh i nerudnykh mestorozhdeniy na osnove ikh kompleksnykh modeley – dostizheniya i perspektivy”, Nauchno-praktich. Konf, Moscow, TSNIIGRI publ., 2006, P. 47–57. (In Russ.)
  14. *Migachev I. F., Girfanov M. M., Shishakov V. B.* Medno-porfirovovye mestorozhdeniya Peschanka [Porphyry copper deposit Peschanka]. *Rudy i metally*, 1995, No. 3, P. 48–58. (In Russ.)
  15. *Minina O. V.* Auerbakhovskaya kompleksnaya rudno-magmaticheskaya sistema na Srednem Urale [Auerbakhovsky

## REFERENCES

1. *Geologicheskoye stroyeniye USSR i zakonomernosti razmeshcheniya poleznykh iskopayemykh: v 10 tomakh* [Geological structure of the USSR and patterns of distribution of minerals: in 10 volumes]. Gl. red. Ye. A. Kozlovskiy. V. 6 Kazakhstan i Srednyaya Aziya, bk. 1 Kazakhstanskaya skladchataya oblast. N. P. Mikhaylov, Yu. P. Seliverstov, M. G. Khisamutdinov et al. Leningrad, Nedra publ., 1989, 234 p. (In Russ.)
2. *Daukeyev S. Zh., Uzhenov B. S., Abdullin A. A. et al.* Glubinnoye stroyeniye i mineralnyye resursy Kazakhstana [Deep structure and mineral resources of Kazakhstan]. V. 2. Metallogeniya. Almaty, 2002, 272 p. (In Russ.)
3. *Zvezdov V. S.* Obstanovki formirovaniya krupnykh i sverkhkrupnykh medno-porfirovykh mestorozhdeniy

- complex ore-magmatic system in the Middle Urals]. *Otechestvennaya geologiya*, 1994, No. 7, P. 17–23. (In Russ.)
16. *Minina O. V.* Model Kauldinskoy rudno-magmaticheskoy sistemy (Uzbekistan) kak osnova prognoza i poiskov epitermalnykh mestorozhdeniy zolota [Model of the Kaulda ore-magmatic system (Uzbekistan) as a basis for forecasting and prospecting for epithermal gold deposits]. *Rudy i metally*, 2006, No. 3, P. 83–90. (In Russ.)
  17. *Rossiyskiy metallogenicheskiy slovar* [Russian Metallogenetic Dictionary]. Gl. red. A. I. Krivtsov, St. Petersburg, VSEGEI publ., 2003, 319 p. (In Russ.)
  18. *Saydasheva F. F.* Epitermalnoye zoloto-serebryanoye orudneniye Akshatau-Konyratskogo rudnogo rayona (Tsentralnyy Kazakhstan) [Epithermal gold-silver mineralization of the Akshatau-Konyrat ore region (Central Kazakhstan)]. Avtoref. dis. ... kand. geol.-mineral. nauk. Almaty, 2010, 25 p. (In Russ.)
  19. *Snachev V. I., Romanovskaya V. A.* Kontaktovyy metamorfizm kolchedannykh mestorozhdeniy uralskogo tipa [Contact metamorphism of pyrite deposits of the Ural type]. *Vestnik MGU, Ser. Geologicheskaya*, 1989, No. 4, P. 33–39. (In Russ.)
  20. *Chukhrov F. V.* Mineralogiya i zonalnost Vostochnogo Kounrada [Mineralogy and zoning of East Kounrad]. Moscow, ANSSSR publ., 1960, 236 p. (In Russ.)
  21. *Shchepotyev Yu. M., Vartanyan S. S., Oreshin V. u., Guzman B. V.* Zolotorudnyye mestorozhdeniya ostrovnykh dug Tikhogo okeana [Gold deposits of island arcs of the Pacific Ocean]. Moscow, TSNIGRI, 1989, 244 p. (In Russ.)
  22. *Eynaudi M. T., Meynert L. D., Nyuberi Dzh.* Skarnovyye mestorozhdeniya [Genesis of ore deposits]. *Genezis rudnykh mestorozhdeniy*, V. 1, Moscow, Mir publ., 1984, 203 p. (In Russ.)
  23. *Chang Z., Hedenquist J. W., White N. C.* et al. Exploration Tools for Linked Porphyry and Epithermal Deposits: Example from the Mankayan Intrusion-Centered Cu-Au District, Luzon, Philippines. *Economic Geology*, 2011, V. 106, I. 8, P. 1365–1398.
  24. *Hollister V. F.* Regional characteristics of porphyry copper of South America. *Trans. A.I.M.E.*, No. 1, 1974, P. 45–53.
  25. *Lowell J. D., Guilbert J. M.* Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry copper deposits. *Econ. Geol.*, 1970, Vol. 65, P. 373–409.
  26. *Maryono A., Harrison R. L., Cook D. R., Rompo I., Terence G. H.* and Geology of Porphyry Cu-Au Deposits along the Eastern Sunda Magmatic Arc, Indonesia. *Economic Geology*, 2018, V. 113, P. 7–38.
  27. *Migachev I.* Complex ore nodes of marginal volcanoplutonic belts and their geological setting. *Resource Geology Special Issue*, 1993, No. 15, P. 199–209.
  28. *Pollard P. J., Taylor R. J., Peters L.* Ages of Intrusion, Alteration, and Mineralization at the Grasberg Cu-Au Deposit, Papua, Indonesia. *Economic Geology*, 2007, V. 100, P. 1005–1020.
  29. *Sillitoe R. H.* Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 2010, V. 105, P. 3–41.
  30. *Waters P. J., Cook D. R.* Porphyry and Epithermal Deposits and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Geochronology of the Baguio District, Philippines. *Economic Geology*, 2011, V. 106, P. 1335–1363.

## Минералого-геохимические поисковые признаки золото-полисульфидно-кварцевого оруденения в ряду «коренной источник – кора выветривания – россыпь» (на примере Урала)

Рассмотрены особенности золото-полисульфидно-кварцевой минерализации штокверкового типа в интрузивных массивах в ряду «коренной источник – кора выветривания – россыпь» на примере месторождений Среднего и Северного Урала. Показано изменение признаков самородного золота в экзогенных условиях.

*Ключевые слова:* золото-полисульфидно-кварцевая минерализация, кора выветривания, типоморфизм самородного золота.

ЗУБОВА ТАТЬЯНА ПЕТРОВНА, старший научный сотрудник, zubova@tsnigri.ru

ПОЗДНЯКОВА НАТАЛЬЯ НИКОЛАЕВНА, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, natali-silver@bk.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геолого-разведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»), г. Москва

## Mineralogical and geochemical characteristics for exploration of gold-polysulfide-quartz mineralization from ore through weathering crust to placer

T. P. ZUBOVA, N. N. POZDNYAKOVA

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

We studied the peculiarities of the stockwork type gold-polysulfide-quartz mineralization in intrusive massifs and their modification from ore through weathering crust to placer on the examples of deposits from the Middle and Northern Urals. This allowed us to demonstrate the transformation of native gold features under the supergene conditions.

*Key words:* gold-polysulfide-quartz mineralization, weathering crust, native gold typomorphism.

**Введение.** Изучение минералого-геохимических изменений в ряду «коренной источник – кора выветривания – россыпь» является одним из важнейших направлений при проведении геологоразведочных работ (ГРП), а полученные данные необходимы для выявления поисковых признаков и их дальнейшего использования при работе на аналогичных объектах.

Данная работа подготовлена на основе обобщения информации по некоторым месторождениям и рудопроявлениям Среднего и Северного Урала с золото-полисульфидно-кварцевым оруденением в магматических массивах продуктивных адалелит-плагио-гранитной и габбро-диорит-гранодиоритовой формаций позднедевонского возраста, в пределах которых широко развиты мезозойские коры выветривания: Ларьковское, Первомайско-Зверевское и других.

Геолого-минералогическая характеристика рудной минерализации дана в обобщенном виде по материалам А. И. Александрова (1962), А. Г. Баранникова

(1990, 1992), Р. О. Берзона, Н. М. Риндзюнской (1994), Г. В. Ручкина, Ч. Х. Арифупова (2008), Г. В. Тычковой, А. П. Татарникова и др. (1980), В. Б. Чекваидзе, Б. С. Зелликсона, И. З. Исакович (2002), В. Н. Хрыпова (1997).

Объектом исследования авторов являлась кора выветривания с определением особенностей её вещественного состава и типоморфных признаков золота. Линейно-площадная кора выветривания, развивающаяся по золото-полисульфидно-кварцевой минерализации штокверкового типа в интрузивных массивах, как правило, имеет россыпеобразующее значение. С данным типом золотого оруденения нередко связаны наиболее богатые и протяжённые россыпи. Коры выветривания являются промежуточным коллектором, в котором происходят разрыхление материала и высвобождение золота из сростков. При этом они сами преобразуются в щебнисто-песчано-глинистые гипергенные руды с преобладанием свободного золота гравитационных классов крупности (60–90%).

Иногда золотоносные коры выветривания (ЗКВ) с золотом гравитационных классов крупности принимают за погребённые россыпи, за счёт обогащения таким золотом верхних горизонтов коры выветривания при частичном перемыве рыхлого материала.

Месторождения ЗКВ могут быть легко освоены с применением современных гравитационных установок с доизвлечением золота цианированием хвостов гравитации. Масштабы таких месторождений невелики, но рентабельность их высокая.

Важно отметить, что остаточная золотоносная кора выветривания нередко наследует информацию о рудной минерализации, с которой имеет тесные пространственные и генетические связи, но за счёт процессов глубокого выветривания в ней происходят дифференциация вещества первичных руд, изменение минерального и химического состава руд и рудовмещающих пород, типоморфных признаков золота и его минеральных соединений, морфологии рудных тел и условий их залеганий, технологических свойств руд.

Систематические исследования сопровождались большим количеством лабораторных анализов: литологического, полуколичественного минералогического, золото-атомно-абсорбционного, спектрального полуколичественного на 26 элементов, масс-спектрометрического (ICP MS), силикатного, рентгено-спектрального микроанализа (РСМА), определения типоморфизма золота и его внутреннего строения с помощью многократного структурного травления монтированных аншлифов с золотинами раствором  $\text{CrO}_3$  в  $\text{HCl}$ .

**Геолого-минералогическая характеристика рудной минерализации.** Описываемый в работе тип золоторудной минерализации приурочен к кварцевым, полевошпат-кварцевым жилам и прожилкам, образующим трещинные (штокверковые) зоны, часто в апикальных частях интрузий гранодиоритов, кварцевых диоритов, либо в них самих, либо на контактах с породами, которые они прорывают: андезитобазальтами, серпентинитами [1, 5].

Мощность кварцевых жил варьирует от нескольких сантиметров до нескольких метров. Содержания золота в них в среднем – 3–10 г/т, в отдельных гнездах значения его могут достигать 80–600 г/т.

В рудах абсолютно преобладает кварц разнообразного текстурно-структурного облика. Подчинённое значение имеют карбонаты, серицит, альбит, хлорит, турмалин. Количество сульфидов не превышает 7–12%. Главным среди них является пирит, в подчинённых количествах встречаются другие рудные минералы: арсенопирит, галенит, блёклые руды, халькопирит, сфалерит, шеелит. Присутствие послед-

них в кварцево-жилных зонах обуславливает проявление геохимических ореолов Au, Cu, Pb, Zn, Ag, Bi, W, Mo, As, контрастность которых зависит от количества рудной минерализации.

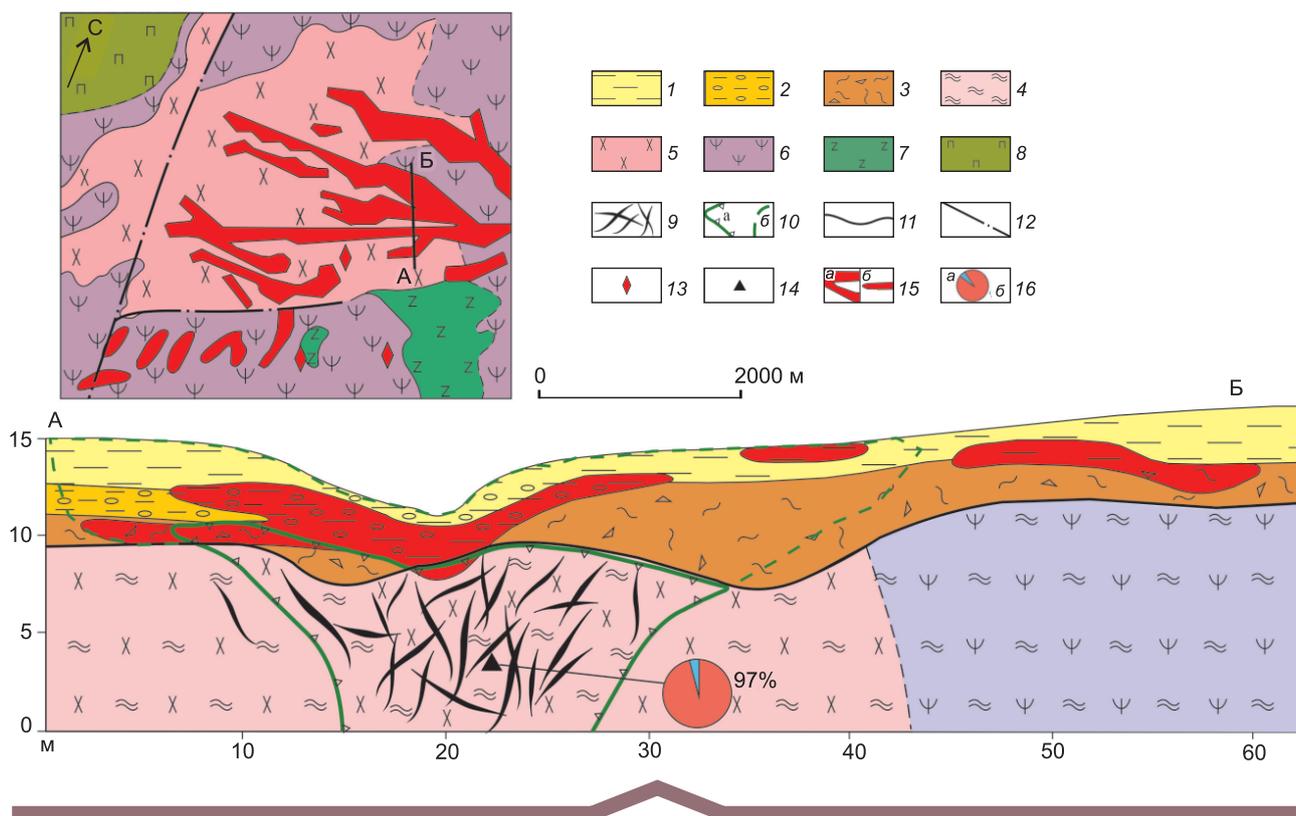
Кварцевые жилы и жилные зоны сопровождаются кварц-серицитовыми оторочками, переходящими во внешние зоны в хлорит-карбонат-серицитовые метасоматиты. Часто рудная минерализация штокверковых зон находится в ореолах пирротин-халькопирит-пиритовой вкрапленности и прожилкования [4].

**Характеристика золотоносной коры выветривания.** В пределах пенепленизированных поверхностей, в бортах, частично днищах эрозионно-карстовых депрессий по штокверковому орудуению и по крупным жилным полям формируется *остаточная кора выветривания линейно-площадного типа*. На Среднем и Северном Урале в основном сохранилась кора выветривания неполного профиля, в которой выделяются две нижние зоны: 1) дезинтеграции и 2) гидратации и начального выщелачивания с сохранением, как правило, текстурно-структурных особенностей пород. Нередко можно наблюдать, как глинизированный материал гранодиоритов пронизан дезинтегрированными, часто ожелезнёнными кварцевыми жилами и прожилками (рис. 1). Мощность коры выветривания может достигать 40 м, в линейных зонах – 100 м.

Количество глинистого материала при выветривании алюмосиликатных пород варьирует от 30 до 60%. Состав верхних горизонтов коры выветривания преимущественно кварц-слюдисто-хлорит-сметитовый, при глубоком выветривании – каолинитовый. Снизу вверх по разрезу накапливаются  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ , выносятся  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{S}_{\text{сульф.}}$ , происходит уменьшение объёмной массы пород.

Среди минералов тяжёлой фракции в шлиховых пробах в связи с окислением сульфидов и темнокрасных минералов преобладают гидроксиды железа и марганца; в незначительном количестве (> 1–3%) сохранились магнетит, гематит, хромит, ильменит, пирит. В лёгкой фракции преобладают кварц «рудного» облика, кавернозный, обохренный, а также глинизированный полевой шпат. Как правило, гидроксиды железа, образующие псевдоморфозы по сульфидам, тёмно-коричневого цвета. Они сохраняют остаточные концентрации рудных элементов, что позволяет при использовании аналитических методов (ICP AES, ICP MS) установить специализацию рудной минерализации, подвергшейся выветриванию.

В остаточной несмещённой коре выветривания «in situ» контрастность и морфология ореолов золота и его элементов-спутников аналогична рудной минерализации (см. рис. 1).



**Рис. 1. Геологическая карта и схематический геологический разрез (А-Б) Ларьковского месторождения.** Составлены с использованием материалов Южно-Заозёрского прииска, Г. В. Тычкова, А. П. Татаринов и др., 1980:

1 – покровные четвертичные суглинки; 2 – аллювиальные отложения; 3 – слабоперемытая кора выветривания; 4 – остаточная структурная кора выветривания; 5 – интрузивные породы габбро-гранодиоритовой формации; 6 – серпентиниты; 7 – габбро; 8 – оливинные пироксениты; 9 – прожилки кварца; 10 – комплексный геохимический ореол Au\*Cu; 11 – кровля коры выветривания; 12 – тектонические нарушения; 13 – рудопоявления золото-полисульфидно-кварцевой формации; 14 – место отбора технологической пробы; 15 – россыпь золота: а – на карте, б – на разрезе; 16 – результаты технологического опробования (в %): а – гравитационное золото, б – свободное тонкое золото

В перекрывающих ЗКВ покровных отложениях также фиксируются геохимические аномалии Au, Ag, Cu, Hg, Mo, Zn, но с понижением их контрастности, что было установлено при проведении работ в пределах Ларьковского рудного поля (Н. М. Риндзюнская, В. Б. Чекваидзе, Б. С. Зеликсон, И. З. Исакович и др., 2002).

Среднее содержание золота в коре выветривания по объектам Урала (Гравянское, Вилуйское, Ларьковское, Кремлевское, Первомайско-Зверевское, Чесноковское) составляет 2 г/т, сохраняется неравномерный, как правило, гнездовой характер его распределения. Возможно, более низкие содержания золота в коре выветривания по сравнению с первичными рудами связаны с особенностями ранее проводимого опробования, когда в пробу отбиралась лишь половина керна, в которую из-за неравномерного распределения золота, его крупные частицы в навеску могли не попасть.

За счёт глинизации субстрата происходит высвобождение золота из дезинтегрированных кварцевых прожилков. Количество его, извлекаемое гравитационными методами, составляет в среднем 90%, в то время как из первичных руд – 63–65%.

Соотношение гравитационного и тонкого золота в коре выветривания сильно варьирует даже на небольшом интервале. Технологические испытания трёх проб из коры выветривания Ларьковского месторождения, проведённые в «ЦНИГРИ» (Н. М. Риндзюнская и др., 2002), показали, что в одной из проб на долю гравитационного золота приходится 97%, в пробе, отобранной в 20 м от первой, количество его составляет 44%, в третьей пробе преобладает тонкое золото (95%). Тонкое и тонкодисперсное золото сосредоточено как в остаточном пирите (до 25 г/т), так и в алевро-пелитовой фракции (0,3–0,4 г/т).

Остаточная ЗКВ часто является промежуточным коллектором для образования россыпей ближнего

сноса (пролювиальных, делювиально-пролювиальных), которые имеют ограниченные по протяжённости размеры (от первых десятков метров до 1,5–2 км, редко больше), приурочены к склонам, за счёт чего имеют значительные уклоны плотика. Отложения, слагающие тело россыпи, являются продуктом частичного перемива коры выветривания и характеризуются высокой глинистостью, слабопроявленными процессами сепарации. Часто пласты россыпи находятся над минерализованными зонами в коре выветривания (см. рис. 1).

В минералогическом составе шлиховых проб, отобранных из россыпей ближнего сноса, отмечаются повышенные количества гидроксидов железа, встречаются полуокисленный пирит, обломки пород с вкрапленностью рудных минералов и признаками метасоматических изменений. Обломочный материал имеет разную степень окатанности: от остроугольных обломков до полу-среднеокатанных, редко хорошо окатанных.

В отдельных случаях в условиях высокого пене-плена из верхних горизонтов коры выветривания возможен вынос мелкого материала одновременно с выносом мелкого и тонкого золота и перемещением относительно крупного золота в нижние горизонты. На таких участках сохраняется только остаточный щебнисто-глинистый элювий с промышленными содержаниями золота повышенной гидравлической крупности: преобладают крупные и средние частицы; мелкие и тонкие составляют менее 30%. Таким путём может формироваться *плащеобразная золотосносная залежь*, которую из-за её субгоризонтального положения можно принять за погребённую россыпь. Фактически это частично размытая кора выветривания, в составе которой присутствуют щебень местных невыветрелых пород, глыбы кварца, связанные каолинит-гидрослюдистой глинистой массой; нередко в них стяжения лимонита. Мощность продуктивного пласта, как правило, может составлять 0,2–1,0 м; он имеет изометричную форму, в плане иногда вытянут за счёт особенностей рельефа. Подобный механизм образований концентрации золота в коре выветривания, названный Н. М. Риндзюнской гравитационно-суффозионным [6], по её мнению, может привести к увеличению содержания металла на этих участках до 0,3–11 г/м<sup>3</sup> (0,15–5 г/т). Такая ситуация наблюдалась на Первомайско-Зверевском рудном поле Среднего Урала [2].

В делювиально-пролювиальных отложениях минерализованная зона находит отражение в геохимических полях. Геохимические аномалии имеют большую площадь распространения (как бы «шляпка гриба» над минерализованной зоной) либо смещены по склону вниз; их контрастность может умень-

шиться на порядок по сравнению с корами выветривания и коренными породами.

**Преобразование типоморфных признаков золота в ряду «коренной источник – кора выветривания – россыпь».** При изучении преобразований золоторудной минерализации в экзогенных условиях в ряду «коренной источник – кора выветривания – россыпь», особое место отводится самородному золоту, на котором отражаются следы его пребывания в разных геологических обстановках, как гипогенных, так и гипергенных.

Размер самородного золота в *первичных рудах* варьирует в широких пределах: от мелких до крупных (0,15–0,8 см), вплоть до самородков, также нередки сростания его с кварцем и (или) с сульфидами (рис. 2). Для золотин характерны объёмные комковидные и кристаллической формы, реже дендритовидные и проволоковидные выделения, встречаются трещинные частицы (прожилково-пластинчатые, прожилково-чешуйчатые). Структура выделений золота моно- и полизернистая, с двойниками.

На участках развития стержневых золото-сульфидно-кварцевых жил (Наилинское, Кашеевский шток) золото более крупное, чем в штокверковых прожилково-вкрапленных зонах, где оно мельче, а часть заключена в сульфидах в виде микровключений.

Пробность золота варьирует в пределах 784–980‰, в среднем – 919‰, что характерно для золотин, относимых к золото-полисульфидно-кварцевой формации, в отличие от золото-кварцевой, где средняя пробность золота составляет 943‰, при разбросе значений от 870 до 972‰. По данным В. В. Мурзина (1983), пробность золота колеблется в зависимости

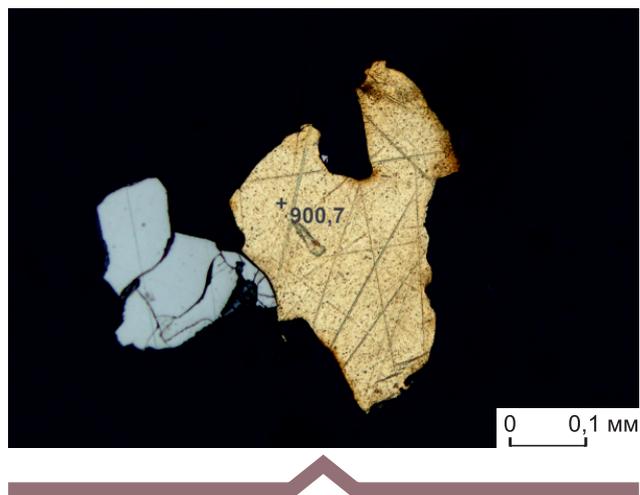


Рис. 2. Сростание самородного золота (жёлтое) с пиритом (серое). Первомайско-Зверевское рудное поле Среднего Урала. Монтир. полир. шлиф, травление  $\text{CrO}_3 + \text{HCl}$

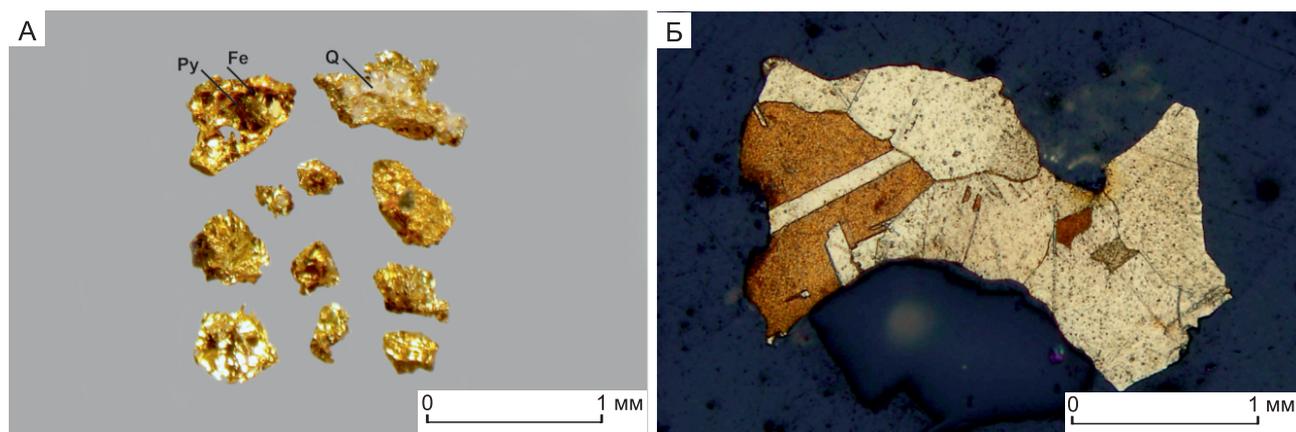


Рис. 3. Золото «рудного» облика из пласта россыпи, недавно высвободившееся из коренного источника без признаков гипергенных преобразований: А – трещинно-прожилковидные и гемиидиоморфные частицы в сростании с кварцем (Q), пиритом (Py) и включениями гидроксидов железа (Fe) по сульфидам, Б – структура высокопробной золотины зернистая, двойниковая. Монтир. полир. шлиф, травление  $\text{CrO}_3 + \text{HCl}$ . Первомайско-Зверевское рудное поле Среднего Урала

от минеральной ассоциации. Отмечается тенденция понижения пробности золота от ранних ассоциаций к более поздним; эта тенденция может быть осложнена появлением на поздних стадиях минералообразования высокопробного золота, ассоциирующегося с теллуридами. В золоте, кроме Ag, отмечаются примеси Cu, Te, Bi, Hg, W, иногда Sn, As, Pt.

Описанные выше особенности выделений рудного золота сохраняются в россыпях, формирующихся вблизи коренного источника. Для них характерно

присутствие золотинок «рудного» облика, частые сростания золота с кварцем, неокисленными или частично окисленными сульфидами; внутреннее строение ненарушенное (разнозернистая структура с чёткими границами двойников) (рис. 3).

В коре выветривания гравитационное золото в целом сохраняет морфологию рудного золота; на 70–90% преобладают частицы комковидной формы, кристаллы, в меньшем количестве присутствуют трещинно-прожилковые и дендритовидные выделения.

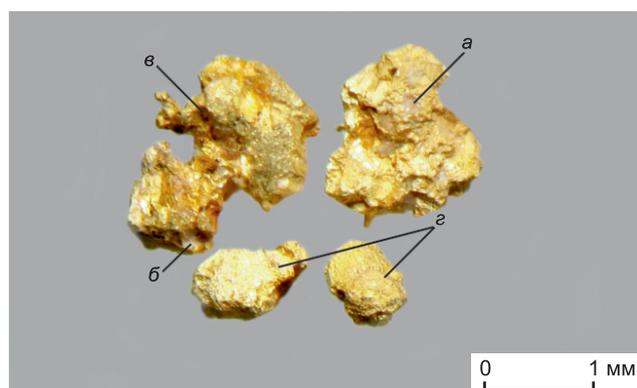


Рис. 4. Золото неокатанное, с оглаженными выступами, с включениями кварца (а), глинистых минералов (б) и примазками гидроксидов железа (в). На ямчато-бугорчатой поверхности видны чёткие следы выщелачивания (г) в результате пребывания золотинок в коре выветривания. Невьянско-Аятская площадь Среднего Урала

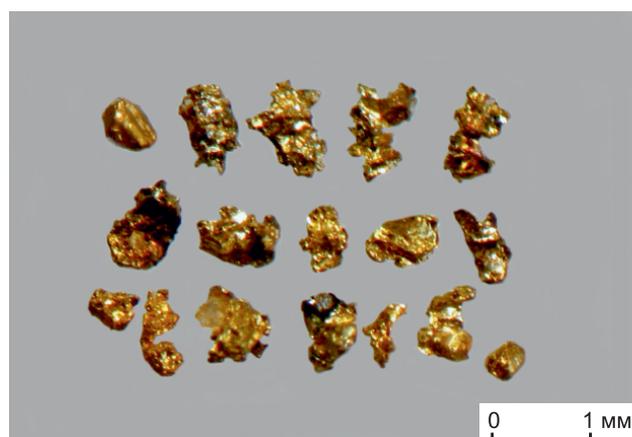


Рис. 5. Золото «рудного» облика из коры выветривания с включениями кварца и сульфидов, в плёнках гидроксидов железа. Первомайско-Зверевское рудное поле Среднего Урала

В зависимости от интенсивности корообразовательных процессов происходит «растворение» поверхности золотин, особенно на выступах, частицы приобретают «оглаженный/оплавленный» вид, а поверхность становится занозисто-губчатой микропористой (рис. 4). Оглаженность часто путают с окатанностью, приобретённой золоти́нами при перемещении в россыпи.

Широко распространено золото в сростании с кварцем, часто обохренным, ожелезненным, а также с окисленными и полуокисленными сульфидами. На поверхности золота и в углублениях присутствуют примазки гидроксидов железа и глинистых минералов (рис. 5).

В структуре золотин в результате гипергенных процессов в коре выветривания появляются и разрастаются межзерновые высокопробные прожилки (рис. 6), также формируются широкие диффузионные зоны с выносом Ag и других элементов-примесей с размытой границей от сохранившегося реликтового матрикса к краевым зонам (рис. 7, А). Край частиц при этом становится тонкозанозистый, мелкопористый (см. рис. 7, Б).

В структуре золота из более зрелой коры выветривания (как правило верхние горизонты профиля выветривания) отмечается увеличение мощности высокопробной коррозионной оболочки, вплоть до полного преобразования частиц золота без сохранения его реликтов. Встречается новообразованное (гипергенное, вторичное) золото натёчно-почковидной фор-

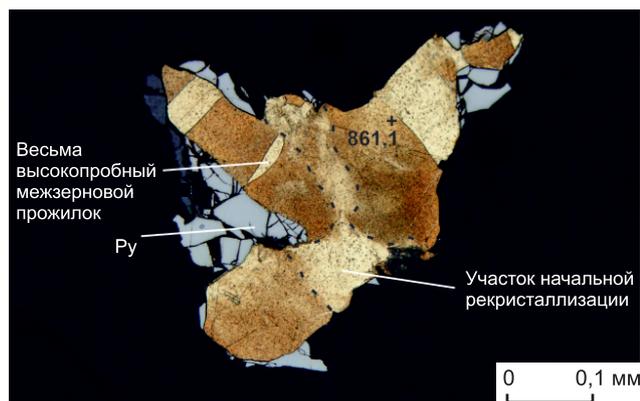


Рис. 6. Структура золоти́ны «рудного» облика в сростании с пиритом (Pb) из пласта россыпи, недавно высвободившееся из коренного источника со слабыми гипергенными преобразованиями: высокопробными прожилками и начальным разрушением (рекристаллизацией) зёрен, выраженная в размытости их контуров. Первомайско-Зверевское рудное поле Среднего Урала. Монтпр. полпр. шлиф, травление  $\text{CrO}_3 + \text{HCl}$

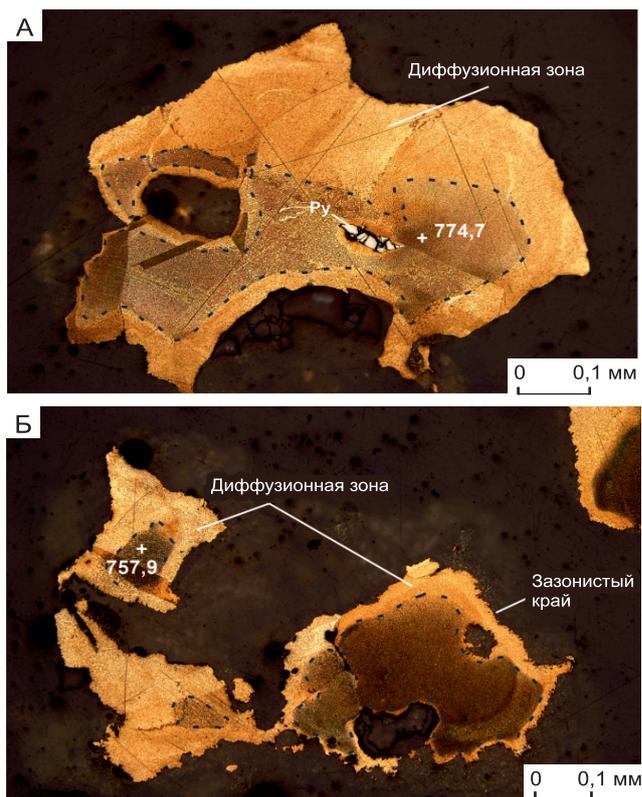


Рис. 7. Неяснозернистое внутреннее строение «рудного» золота с включениями рудных минералов (Pb) и следами пребывания в коре выветривания: А – широкая диффузионная зона, обеднённая Ag, Б – край золоти́ны мелкопористый, тонкозанозистый. Невьянско-Аятская площадь Среднего Урала. Монтпр. полпр. шлиф, травление  $\text{CrO}_3 + \text{HCl}$

мы, охристо-коричневого цвета с ямчато-бугорчатым микрорельефом.

В результате механических воздействий при просадке в щебнисто-глинистом материале коры выветривания возникают нарушения внутренней структуры золота – происходит деформация его двойников (рис. 8), а на поверхности частиц можно наблюдать единичные борозды и шрамы.

Пробность золота в коре выветривания увеличивается, её значения колеблются в диапазоне 868–998‰, в среднем составляя 936‰; в центральной (реликтовой) некорродированной части зёрен сохраняются элементы-примеси, характерные для рудного золота (Cu, Ag, Pb, W).

По мере удаления от коренного источника, в пролювиальных и делювиально-пролювиальных россыпях, золоти́ны уплощаются, незначительно окатываются (до полуокатанного класса), выступы обминаются (рис. 9). Золото нередко находится в сростании с кварцем. На его поверхности сохраняются примазки

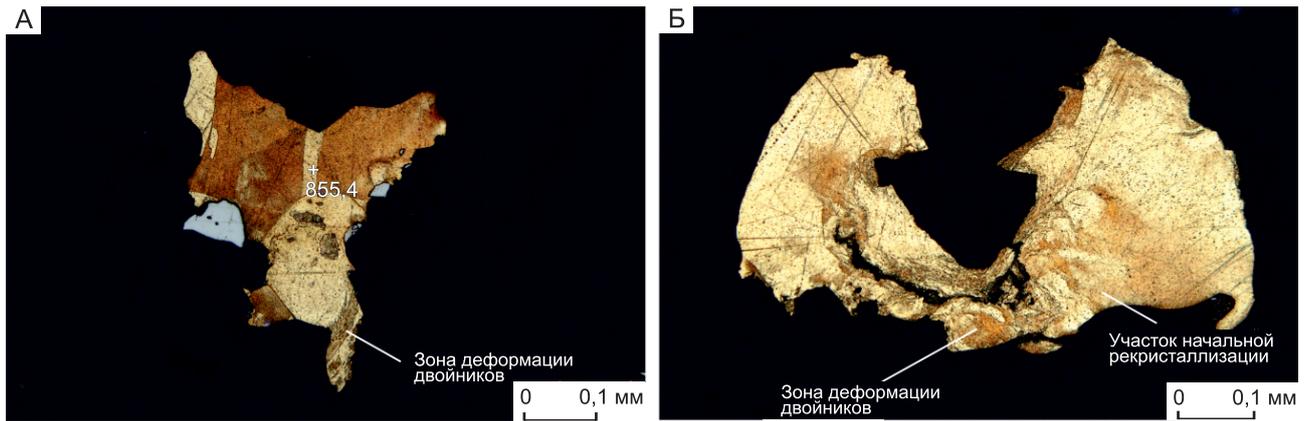


Рис. 8. Внутреннее строение золота из коры выветривания: А – деформация двойников в краевой части зерна за счёт просадки золотины в зоне дезинтеграции коренных пород, Б – более интенсивная деформация с зонами трансляций по периферии зерна – результат механических воздействий (просадки частиц) и признаки начальной рекристаллизации золотины – результат длительного пребывания частицы в глинистой коре выветривания. Первомайско-Зверевское рудное поле Среднего Урала. Монтир. полир. шлиф, травление  $\text{CrO}_3 + \text{HCl}$

гидроксидов железа, часто образуются борозды и шрамы волочения (рис. 10).

В россыпях ближнего сноса коррозионная оболочка (отражение пребывания в коре выветривания) неравномерно истирается за счёт слабых гидравлических перемещений (рис. 11). Изучение внутреннего строения золота при этом показывает, что границы двойников становятся нечёткими, происходит перекристаллизация коррозионного слоя. Пробность, как правило, выше 900 ‰. Это на 30–50 ‰ больше, чем

в реликтовом рудном золоте из-за гипергенных преобразований.

При значительном удалении от коренного источника в россыпях золото очищается от минеральных примесей, которые сохраняются только в углублениях, уплощается, ещё сильнее окатывается (до средне- и хорошо окатанного), поверхность его выравнивается и уплотняется (рис. 12). Дальнейшие преобразования остаточного самородного золота в россыпях также отражаются и в структуре золота.



Рис. 9. Полуокатанные уплощённые сростки кристаллов золота из россыпи ближнего сноса с примазками глинистых минералов и локальными плёнками гидроксидов железа, с ямчато-бугорчатой или выровненной поверхностью. Невьянско-Аятская площадь Среднего Урала

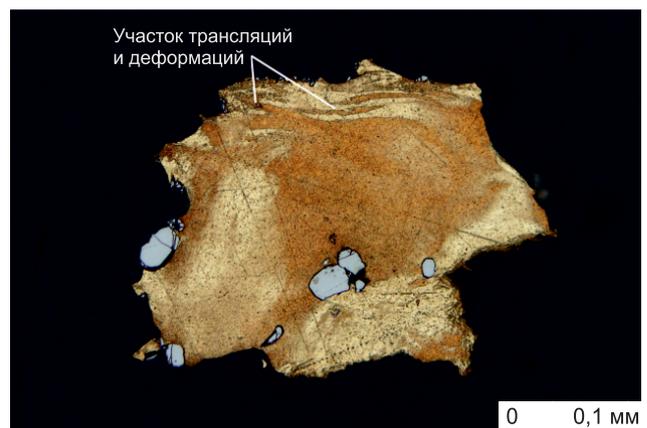


Рис. 10. Структура золота из россыпи ближнего сноса с участками трансляций и деформаций в периферических слоях частицы, с сохранившимся первичным неяснозернистым строением. Невьянско-Аятская площадь Среднего Урала. Монтир. полир. шлиф, травление  $\text{CrO}_3 + \text{HCl}$

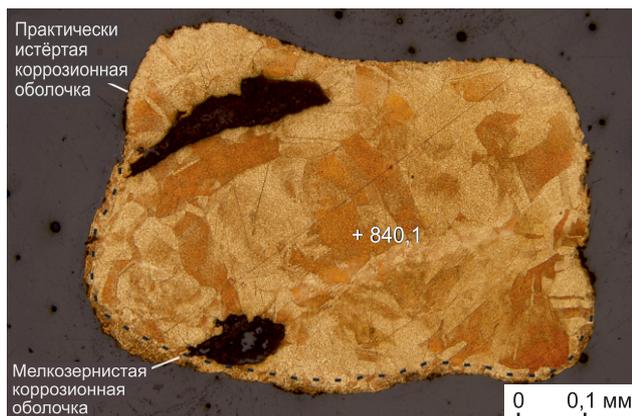


Рис. 11. Зернистая структура полуокатанного золота из россыпи ближнего сноса. Коррозионная оболочка неравномерно истёртая, перекристаллизованная, мелкозернистая. Невьянско-Аятская площадь Среднего Урала. Монтир. полир. шлиф, травление  $\text{CrO}_3 + \text{HCl}$

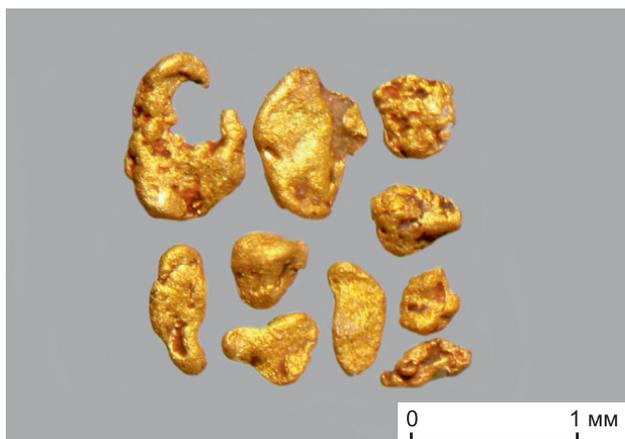


Рис. 12. Полу-, среднеокатанные уплощённые сростки кристаллов, гемиморфные и комковидные золотины. Края деформированные; поверхность уплотнённая, выровненная бугорчатая, частично истёртая; кварц, гидроксиды железа и глинистые минералы сохраняются только в углублениях. Невьянско-Аятская площадь Среднего Урала

**Заключение.** При изучении преобразований золото-полисульфидно-кварцевой минерализации в ряду «коренной источник – кора выветривания – россыпь» на примере месторождений Среднего и Северного Урала авторами выявлен комплекс признаков, который можно использовать для решения поисковых задач. Эти признаки с учётом материалов

других авторов обобщены в таблице. Особое внимание отводится изучению *типоморфизма самородного золота*.

Подводя итоги, можно сделать следующие выводы:

1. Для самородного золота золото-полисульфидно-кварцевой минерализации характерны гравитационные классы крупности. Морфология зёрен – кристаллическая, комковидная, реже дендритовидная и проволоковидная, иногда трещинная. Для золотинок характерно моно- и полизернистое внутреннее строение, нередко с двойниками, с чёткими границами между зёрнами.

В коре выветривания морфология сохраняется, но происходит обминание, притупление и сглаживание выступов и рёбер. В зависимости от зрелости коры выветривания, для остаточного золота характерны срастания его как с первичными минералами – кварцем и сульфидами, так и минералами, образующимися при окислении – оксидами и гидроксидами железа, и появление скоплений глинистых минералов в углублениях поверхности. О времени и интенсивности пребывания золота в коре выветривания свидетельствуют возникновение на его поверхности занозисто-губчатого, микропористого рельефа, появление и разрастание в структуре золотинок высокопробных обособлений, прожилков, зон промежуточного состава с пониженным содержанием Ag и коррозионных кайм. За счёт просадки золота на более низкие гипсометрические уровни в коре выветривания нарушается внутреннее строение золотинок, то есть происходит деформация его двойников с дальнейшей рекристаллизацией зёрен.

При переносе золота и перемыве коры выветривания на незначительные расстояния, при которых образуются делювиально-пролювиальные россыпи, происходят слабое окатывание, уплощение частиц, обмятие выступов золотинок, образование на поверхности частиц единичных борозд и шрамов волочения, неравномерное истирание коррозионного слоя, в золотишках границы двойников и зёрен структуры становятся нечёткими.

По мере удаления от коренного источника повышается окатанность золота, изменяется его морфология, что находит отражение и в преобразовании структуры частиц.

2. Признаки рудной минерализации отражаются в вещественном составе коры выветривания и связанных с ней россыпях. К ним можно отнести, кроме золота, присутствие сульфидов. Их преобладание над гидроксидами железа свидетельствует о незначительных преобразованиях рудной минерализации в зоне гипергенеза. Обилие гидроксидов железа, присутствие окисленного пирита, выветрелых обломков пород с признаками метасоматических изменений,

кварца «рудного» облика, но кавернозного и обохренного – признаки изменений золото-полисульфидно-кварцевой минерализации в коре выветривания. В делювиально-пролювиальных отложениях эти свойства сохраняются, но отдельные обломки пород и минералы могут иметь слабоокатанный об-

лик за счёт незначительного перемива верхних горизонтов коры выветривания. Как правило, эти отложения высокоглинистые.

3. В остаточной несмещённой коре выветривания «in situ» контрастность и морфология ореолов золота и его элементов-спутников аналогична рудной

**Минералого-геохимические поисковые признаки золото-полисульфидно-кварцевого оруденения в интрузивных массивах в ряду «коренной источник – кора выветривания – россыпь»**

Поисковые признаки	Рудное проявление, месторождение	Остаточная линейно-площадная золотоносная кора выветривания	Делювиально-пролювиальные (ближнего сноса) россыпи
Минералогические	Кварц-серицитовые, хлорит-карбонат-серицитовые изменения вокруг кварцевых жильно-прожилковых зон	Гидроксиды железа, марганца, много обохренного, кавернозного кварца «рудного» облика, остаточные – магнетит, хромит, окисленный пирит	Обломки пород разной степени окатанности, преобладают плохо окатанные и неокатанные, повышенное количество гидроксидов железа, кварц ожелезнённый
Геохимические	Комплексные ореолы Au, Cu, Ag, Bi, W, Mo, As, Hg, вокруг штокверковых зон золото-полисульфидно-кварцевой минерализации	В несмещённых корях выветривания сохраняются остаточные ореолы Au и его элементов-спутников, морфология которых повторяет морфологию минерализованных зон	Морфология ореолов Au и его элементов-спутников имеет плащеобразную форму, превышая размеры остаточных ореолов в коре выветривания
Типоморфизм самородного золота	Золото разных гранулометрических классов. Преобладают объёмные комковидные и кристаллические формы. Структура золота моно-, полизернистая, с двойниками. В штокверковых прожилково-вкрапленных зонах, оно более мелкое, часть заключена в сульфидах в виде микровключений. Пробность золота варьирует в пределах 784–980 ‰, в среднем – 919 ‰	Преобладает свободное золото гравитационных классов крупности (90 ‰), в сростании с кварцем. Оно слабо окатано, с обмятыми, притупленными выступами и рёбрами. Поверхность его ямчато-бугорчатая, с примазками гидроксидов железа и глинистых минералов, часто сглаженного вида со следами «растворения» (тонкозаноцистая) и механических просадок (борозды, шрамы, царапины). Структуры рекристаллизации золота, с широкими диффузионными зонами за счёт выноса Ag, с высокопробными межзерновыми прожилками; коррозионная оболочка разной мощности, край частиц пористый. Пробность золота близка к рудному или может повышаться за счёт глубоких гипергенных преобразований	Золото разной окатанности (от слабо- до полу-окатанного), сохраняются сростания с кварцем и примазки гидроксидов железа, формы его нередко уплощаются. На поверхности часто видны борозды и шрамы волочения. Благодаря перемещениям золотин коррозионная оболочка уплотняется, истирается, становится неравномерной мощности. Структура золота моно-, полизернистая, границы двойников деформированные и нечёткие, особенно в краевых зонах частиц. Пробность золота, как правило, на 30–50 ‰ больше, чем у реликтового рудного за счёт глубоких гипергенных преобразований

минерализации, с понижением их контрастности в перекрывающих покровных отложениях.

Использование этих признаков помогает при интерпретации результатов поисковых работ, особенно на начальной стадии: при проведении геологических маршрутов, опробовании водотоков, площадных шлихо-геохимических работах, проходке горно-бурильных выработок.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берзон Р. О., Левитан Т. М. Формационная классификация золоторудных месторождений Урала // Труды ЦНИГРИ. – 1986. – Вып. 201. – С. 75–82.
2. Букрин Г. А., Баранников А. Г., Шуб В. С., Кузнецов В. Н. О механизме накопления свободного золота в продуктах мезозойской коры выветривания // Рудоносные формации зоны гипергенеза. Тезисы докладов всесоюзного совещания, 3–5 октября. – Л., 1990. – С. 52–53.
3. Мурзин В. В. Состав самородного Урала и его типоморфное значение. – Свердловск, 1983. – 58 с. Препринт.
4. Сазонов В. Н. Главные и редкие золотопродуктивные метасоматические формации Урала // Уральский геологический журнал. – 1999. – № 6 (12). – С. 35–100.
5. Сазонов В. Н., Огородников В. Н., Коротеев В. А., Поленов Ю. А. Месторождения золота Урала. – Екатеринбург, 1999. – 569 с.
6. Риндзюнская Н. М., Берзон Р. О., Полякова Т. П., Матвеева Е. В. Геолого-генетические основы прогноза и поисков месторождений золота в корках выветривания. – М.: ЦНИГРИ, 1995. – 128 с.

### REFERENCES

1. Berzon R. O., Levitan T. M. Formatsionnaya klassifikatsiya zolotorudnykh mestorozhdeniy Urals [Formational classification of gold deposits in the Urals]. Trudy TSNIGRI, 1986, Is. 201, P. 75–82. (In Russ.)
2. Bukrin G. A., Barannikov A. G., Shub V. S., Kuznetsov V. N. O mekhanizme nakopleniya svobodnogo zolota v produktakh mezozoyskoy kory vyvetrivaniya [On the mechanism of accumulation of free gold in the products of the Mesozoic weathering crust]. Rudonosnyye formatsii zony gipergeneza. Tezisy dokladov vsesoyuznogo soveshcha-niya, 3–5 oktyabrya. Leningrad, 1990, P. 52–53. (In Russ.)
3. Murzin V. V. Sostav samorodnogo Urals i yego tipomorfnoye znachenije [Composition of the native Urals and its typomorphic significance]. Sverdlovsk, 1983, 58 p. Preprint. (In Russ.)
4. Sazonov V. N. Glavnnyye i redkiye zolotoproduktivnyye metasomaticheskiye formatsii Urals [The main and rare gold-bearing metasomatic formations of the Urals]. Uralskiy geologicheskij zhurnal, 1999, No. 6 (12), P. 35–100. (In Russ.)
5. Sazonov V. N., Ogorodnikov V. N., Koroteyev V. A., Polenov Yu. A. Mestorozhdeniya zolota Urals [Gold deposits of the Urals]. Yekaterinburg, 1999, 569 p. (In Russ.)
6. Rindzyunskaya N. M., Berzon R. O., Polyakova T. P., Matveyeva Ye. V. Geologo-geneticheskiye osnovy prognoza i poiskov mestorozhdeniy zolota v korakh vyvetrivaniya [Geological and genetic bases for forecasting and prospecting for gold deposits in weathering crusts]. Moscow, TSNIGRI publ., 1995, 128 p.

## Роль петролого-минералогических и геохимических исследований в оценке потенциальной алмазоносности кимберлитов

Большое внимание в статье уделено петролого-минералогическим характеристикам кимберлитовых пород с различной продуктивностью. Приведены примеры расчётов эволюции исходного субстрата и реконструкции мантийных разрезов, что позволило высказать предположения о зональности литосферной мантии кимберлитовой провинции и её алмазоносных территорий.

*Ключевые слова:* кимберлиты, петролого-минералогическая характеристика, геохимия, алмазоносные провинции.

ЗИНЧУК НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, nnzinchuk@rambler.ru

Западно-Якутский научный центр (ЗЯНЦ) Академии наук Республики Саха (Якутия), г. Мирный

## The role of petrological, mineralogical and geochemical studies in assessing the potential diamond grade of kimberlite

N. N. ZINCHUK

West-Yakutian Scientific Centre of the SR (Yakutia) Academy of Sciences, Mirni

The focus of this study is the determination of petrological and mineralogical characteristics of kimberlite pipes with various productivity. Here we provided some examples of the appraisal of the initial substrate evolution and reconstructions of mantle sections that allowed us to suggest a possible zonation of lithosphere mantle of a kimberlite province and its diamondiferous territories.

*Key words:* kimberlite, petrological and mineralogical characteristics, geochemistry, diamondiferous provinces.

Отличительной чертой алмазных месторождений коренного типа (трубок взрыва) является их глубинное происхождение и длительная генетическая связь с процессами тектономагматической деятельности в истории развития древних платформ мира [12–14, 17–21]. Существование глубинных (мантийных) очагов, взрывно-импульсный характер процесса становления кимберлитовых трубок, сопровождающийся выносом не только собственно алмазосодержащих пород (кимберлитов и лампроитов), но и (в своём объёме) большой массы химических веществ в виде газовой-жидкой фазы и газовых эманаций, выбросов летучих компонентов с участием примесных химических элементов, привели к формированию этих уникальных пород. По своему химическому составу и геохимическим особенностям кимберлиты существенно отличаются от пород окружающей (и вмещающих их) среды, представляя собой на региональном древнем и современном ландшафтном фоне своего рода природную геохимическую аномалию. Определяя геохимическое понятие «алмазное месторождение», заведомо подразумевается аномаль-

ное природное минералого-геохимическое и петрологическое явление в виде конкретного геологического тела (трубки, жилы, дайки, силлы или штоки), обладающего конкретной вещественно-продуктивной специализацией. Последняя находит своё отражение [1–11, 15–17] в повышенных значениях местного геохимического фона по тем химическим элементам, которые присущи данному конкретному алмазному месторождению кимберлитов или лампроитов, то есть их типоморфным (индикаторным) элементам, а также сопровождающим их эволюционным процессам от момента становления рудных тел до настоящего времени. Выделение типоморфных элементов кимберлитов (элементов-индикаторов) основано на сравнительном анализе петрохимического и геохимического состава магматических и осадочных образований. При этом особое внимание уделяется определённым группам элементов-индикаторов, свойственным не только для кимберлитов (лампроитов), но и для других типов магматитов, пространственно ассоциирующихся с потенциально алмазоносными породами. Денудация, размыв и рассеяние продуктов

кор выветривания (КВ) различного типа магматитов обычно сопровождается формированием в осадочных отложениях минералого-геохимических шлейфов. Отбраковка таких ореолов от кимберлитовых основана на знании эталонных геохимических характеристик как собственно кимберлитов, так и ассоциирующих с ними магматических пород основного и щелочно-ультраосновного состава [22–29].

**Фактический материал, методология исследований и обсуждение результатов.** Анализ химического и геохимического состава кимберлитовых и конвергентных им пород позволяет отметить [1–3, 12, 18–21] заметные вариации в содержании петрогенных компонентов, которые определяются как эндогенными, так и экзогенными факторами. К особенностям химизма кимберлитовых пород следует отнести высокую магнезиальность (MgO обычно более 30 мас.%) и очень высокую степень насыщенности летучими (CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O), примерно равные количества магнезии и кремнезёма (SiO<sub>2</sub>/MgO обычно в пределах 0,9–1,1), большой размах концентраций TiO<sub>2</sub> (от долей процента до 6 мас.%, иногда более) при обычном TiO<sub>2</sub>/K<sub>2</sub>O > 1 в кимберлитах первой группы и TiO<sub>2</sub>/K<sub>2</sub>O < 0,5 в кимберлитах второй группы, широко варьирующие значения Ti/Zr (20–200), Zr/Nb (2–3, в кимберлитах II группы менее 1). Петрогеохимические исследования позволяют конкретизировать диагностику пород, предположить их мантийные источники и сопоставить с кимберлитами первой и второй групп Южно-Африканской платформы (ЮАП), для чего используются диаграммы K<sub>2</sub>O–TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–CaO и некоторые другие. В целом по химическому составу породы всех полей как южной, так и северной частей провинции отвечают семейству ультраосновных пород, что подтверждается высоким содержанием магния и повышенными значениями отношения магния к железу. Эта тенденция сохраняется на Сибирской платформе (СП) как в выветрелых кимберлитах, так и в интенсивно карбонатизированных их разностях и пикритах. В последних, а также в карбонатитах Орто-Благинского поля фиксируются пониженные (по сравнению с кларками для ультраосновных пород) концентрации Si, Fe, Mg, Cr, Ni при повышении доли Ti, Al, K, P, Sr, Zr, Nb, Ta и других элементов, свойственных щелочным породам. Кроме проявлений отмеченного Орто-Благинского поля заметно обособляются по вещественному составу брекчиевые породы трубок и аномальных объектов трубочного типа Биригиндинского и частично Ары-Мастахского полей, которые обнаруживают карбонатитовые тенденции (их ведущие минералы: кальцит, сидерит, магнетит, апатит, пироксид, часто бадделит, циркон и др., высокое содержание CaO, CO<sub>2</sub>, MnO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, при пониженном ко-

личестве SiO<sub>2</sub> и TiO<sub>2</sub>); по указанным признакам они существенно отличаются от кимберлитов и не могут рассматриваться в качестве потенциальных коренных месторождений алмазов. Собственно кимберлитовые породы отличаются наряду с наиболее высокими содержаниями Mg, Cr и Ni наибольшими значениями Mg/Fe и Ni/Co. Последний параметр при величине более 12 наряду с повышенной долей тяжёлых редких элементов показывает, как правило, принадлежность кимберлитовых пород к алмазонасыщенным разновидностям.

Совместно с сотрудниками ИГЕМ РАН проведены исследования по выработке новых критериев диагностики алмазонасыщенных кимберлитов [7]. Для этой цели использована информация по петрологии и классификации кимберлитов, основанная на комплексном петрогеохимическом (ICP-MS, XRF, изотопия Pb, Nd, Sr) исследовании. По кимберлитовым полям Сибирской платформы подтверждена принадлежность пород (38 трубок 13 полей) к кимберлитам с учётом дискриминантных отношений (K<sub>2</sub>O/TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>/MgO, Ti/Zr, Nb/Zr и др.) и изотопного состава Nd, Sr в породах, составов породообразующих минералов (слюда и перовскит). Редкие отклонения отдельных параметров составов (Zr > 450 ppm в породах, каймы тетраферрифлогопита и др.) могут быть связаны с условиями кристаллизации расплавов или метасоматическими изменениями. Кимберлиты II (оранжиты) и лампроиты, сведения о которых появились в последние годы в литературе, среди изученных образцов не установлены. Выделены три петрогеохимические группы кимберлитов: низкотитанистые (TiO<sub>2</sub> < 1 мас.%, Zr 44–77 ppm, Ce 21–70 ppm) – Накыньское поле, а также трубка Надежная (Чомурдахское поле), умеренно-титанистые (TiO<sub>2</sub> 1,0–2,5 мас.%, Zr 50–280 ppm, Ce 58–240 ppm) – южные поля (Мирнинское, Алакит-Мархинское и др.), некоторые трубки северных полей (Дама, Дьянга, Мгришница и др.), высокотитанистые (TiO<sub>2</sub> > 2,5 мас.%, Zr 125–690 ppm, Ce 100–284 ppm) – большинство трубок северных полей провинции. Кимберлитам каждой группы свойственны также характерные величины отношений изотопов Nd, Sr, Pb, лёгких (Be, B, Li), а также REE и HFSE элементов [18]. Новый тип низкотитанистых алмазонасыщенных кимберлитов с характерными геохимическими особенностями (низкие содержания REE, HFSE, высокий – Be/Nd и др.) установлен в Накыньском поле (НКП) Средне-Мархинского алмазонасыщенного района (СМАР). Выявлены вариации составов мантийных источников, времени и режимов процессов кимберлитообразования. BSE или слабообогатённая мантия I типа – источник низкотитанистых кимберлитов трубки Нюрбинская (Nd около 0–0,2), для трубки Ботуобинская –

слабодеплементированная мантия. Источник умеренно- и высокотитанистых кимберлитов находился в области деплементированной мантии (Nd от +3 до +5). Судя по величинам отношений изотопов Pb, в кимберлитах трубки Нюрбинская и ряде других присутствует доля вещества коры, поступившего, по-видимому, при мантийном метасоматозе. Установлен ряд геохимических критериев диагностики алмазоносных объектов СП: а) устойчивое умеренное содержание  $\Sigma$  HREE (Накынское, Мирнинское и другие поля) в низко- и умереннотитанистых кимберлитах; б) «накынский» тип алмазоносных кимберлитов, который может быть эффективно идентифицирован с использованием статистических моделей (дискриминации, классификации с использованием порядковых переменных, множественной регрессии); в) особенности диаграммы Ni/Be–Y/Be (основанной на свойствах структуры геохимических связей), которая позволяет отделять [2–4, 17–20, 30–36] поля высоко- и среднеалмазоносных кимберлитов (Накынское, Мирнинское) от слабоалмазоносных проявлений (Куойкское и др.). Проведённые в последние годы петрологические и минералогические исследования пород кимберлитовых тел Куойского поля показали [23] существование локальной неоднородности литосферной мантии таких территорий северной части СП. В пределах Куойского поля выделяется восточная зона, включающая северо-восточную и восточную группы кимберлитовых тел, которые отличаются наличием высокохромистого граната с кноррингитовым миналом и доминированием на графиках  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ –CaO для гранатов аномального лерцолит-верлитового тренда. Во всех диаграммах с высокохромистым пиропом обнаружены и высокохромистые минералы алмазоносного парагенезиса [23]. Чёткие различия существуют и для граната между мезозойскими (Куойским и Молодинским) и палеозойскими (Чомурдахским, Огонер-Юряхским, Мерчимленским и Толупским) полями, которые также указывают на существование региональной неоднородности литосферной мантии на севере Сибирской платформы.

Определение редких элементов методом ICP MS, выполненное в аналитическом центре ОИГГМ СО РАН с использованием лазерной абляции (LAM ICP MS), позволило получить [8] существенную и интересную информацию о геохимических особенностях кимберлитов и их индикаторных минералах (ИМК). Проверка другими методами показала хорошую сходимость результатов [34]. Методами ICP MS изучены составы минералов из 11 кимберлитовых трубок более чем на 40 элементов. Из трубки Удачная изучено три выборки ИМК, представляющие перидотиты, эклогиты и пироксениты. Наибольшее разнообразие

спектров составов минералов обнаруживают перидотиты. Среди минералов выделяются клинопироксены, которым свойственно обогащение литофилами (LILE) и лёгкими редкими землями. Необходимо отметить, что анализ сканированием мелкозернистой основной массы кимберлитовых пород даёт некоторые преимущества, поскольку позволяет избежать влияния мега- и ксенокристов. Сравнение микроэлементного состава кимберлитов различной продуктивности, включая распределение редкоземельных элементов (рис. 1), показывает сходство спектров поведения лёгких редкоземельных элементов и различия по размаху концентраций тяжёлых редкоземельных элементов в промышленно алмазоносных кимберлитовых телах (Нюрбинская, Юбилейная и др.). Несколько отличается спайдеграмма кимберлитов трубки Зарница по пологому распределению лёгких РЗЭ (Eu, Gd, Dy, Ho, Y, Er, Yb и Lu). Заметно отличаются по снижению концентраций Rb, Th, U, Nb, Ta, Pb и других элементов породы из некоторых трубок Анабарской группы (аномалии 17/1, 71/63 и др.), а по увеличению Ba и Pb – 70/89. В целом можно отметить более пологие спектры распределения элементов в породах трубок Прианабарья по сравнению с кимберлитовыми телами промышленно алмазоносных районов. И ещё одна тенденция – серпентинизированные кимберлиты обеднены LILE-элементами. В ИМК распределение редких и редкоземельных элементов обнаруживает различные тенденции, что можно наблюдать на примере перидотитовых минералов из кимберлитовой трубки Удачная (рис. 2). Так, в моноклинных пироксенах распределение имеет обычно пологий характер спектров, которые для гранатов и других минералов характеризуются заметным размахом концентраций элементов, хотя в отдельных образцах могут проявляться обратные тенденции. Чаще пологие S-образные REE спектры характеризуют клинопиксены и гранаты из деформированных истощённых перидотитов (обр. UD-3), при слабом обогащении U и Sr, минимумы Zr более выражены для граната, левая часть мульткомпонентного спектра почти плоская. В клинопироксенах часто фиксируется небольшое обогащение литофилами (LILE) и лёгкими редкими землями. В спектре клинопироксена из порфирикластического перидотита UD-11 наблюдаются пики повышенных значений U, Ta и Nb. Клинопироксенам из лерцолитов на REE диаграмме свойственны спектры с одновременным уменьшением  $\text{La/Yb}_n$  и общим повышением уровня редких элементов. С уровнем редких земель коррелируют также минимум по концентрации Ba и небольшой пик Sr. У гранатов заметны положительные пики Pb и U (см. рис. 2).

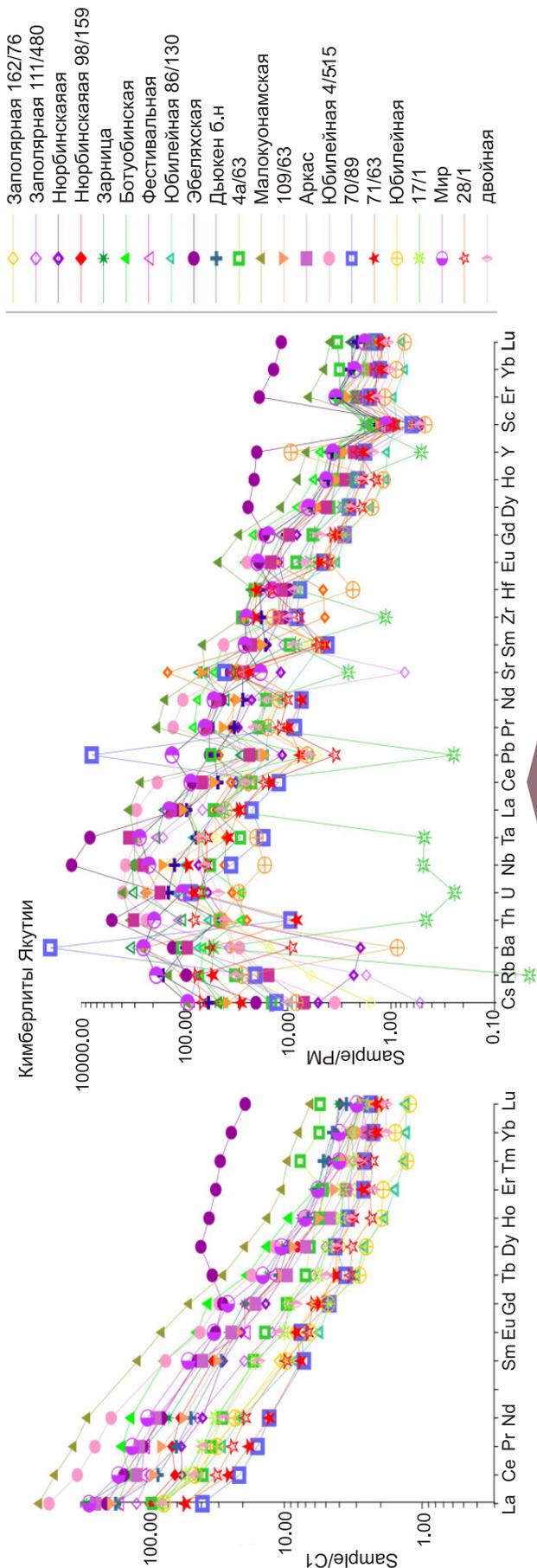


Рис. 1. Распределение редкоземельных элементов в кимберлитовых породах СП

Для трубок ряда полей СП построены *TR*-диаграммы на основе методов пироксеновой и гранатовой мономинеральной термобарометрии (рис. 3). Реконструированные по полученным данным мантийные разрезы под Далдынским кимберлитовым полем (ДКП) обнаруживают вариации в строении. Для трубки Удачная гранатовая термобарометрия подтверждает присутствие восьми горизонтов в мантийной колонне, под трубкой Зарница, при использовании для *PT*-реконструкций на основе одного минерала, получено три дискретных уровня, а с применением совмещённой гранат-пироксеновой термобарометрии – те же восемь дискретных горизонтов. Для трубки Долгожданная гранатовая термобарометрия даёт шесть горизонтов, а по клинопироксеновым построениям выделяется геотерма разогрева в нижней части разреза, который определяется также и для трубки Иреляхская. Наиболее детально построены *TR*-диаграммы и реконструированы мантийные разрезы под кимберлитовыми телами Алакит-Мархинского поля (см. рис. 3). Существенный разогрев (от 38 до 45 мвт/м<sup>2</sup>) установлен в нижней части в пределах интервала 8–10 кбар (горизонт гранатовых дунитов). Деление на 8–9 интервалов отчётливо заметно на диаграмме трубки Айхал. Близкую структуру имеет мантийная колонна под трубкой Юбилейная, литологически существенно лерцолитовая, за исключением уровня 4–5 кбар, отвечающего истощённым породам в основании разреза. Высокотемпературная гранатовая ветвь (~ 45 мвт/м<sup>2</sup>) до уровня 40 кбар, вероятно, соответствует пироксенитам или контактовым зонам вблизи системы подводящих каналов. Мантийная колонна под трубкой Комсомольская истощена гораздо меньше, чем под трубками из южной части поля. Отклонения в низкотемпературную область, обычно характерные для эклогитоподобных пород, соответствуют интервалу 58–50 кбар. Лерцолитовая мантия устанавливается вплоть до 40 кбар, выше вероятны гранатовые гарцбургиты. Под трубкой Сытыканская нижняя часть колонны сложена гранатовыми гарцбургитами и дунитами, выше возможны линзы эклогитоподобных пород. Пироксенитовая линза развита в интервале 45–35 кбар (см. рис. 3) под гарцбургитами.

Несмотря на различия в химических особенностях мантийных минералов из трубок Мир и Интернациональная Мирнинского кимберлитового поля (МКП), для них характерно приблизительно одинаковое строение мантийных разрезов. Под трубкой Мир истощённые перидотиты предполагаются вплоть до 45 кбар и лишь выше возможны линзы пироксенитов и эклогитов в существенно лерцолитовом со слюдой субстрате. Под трубкой Интернациональная разрез мантийной колонны близок таковому

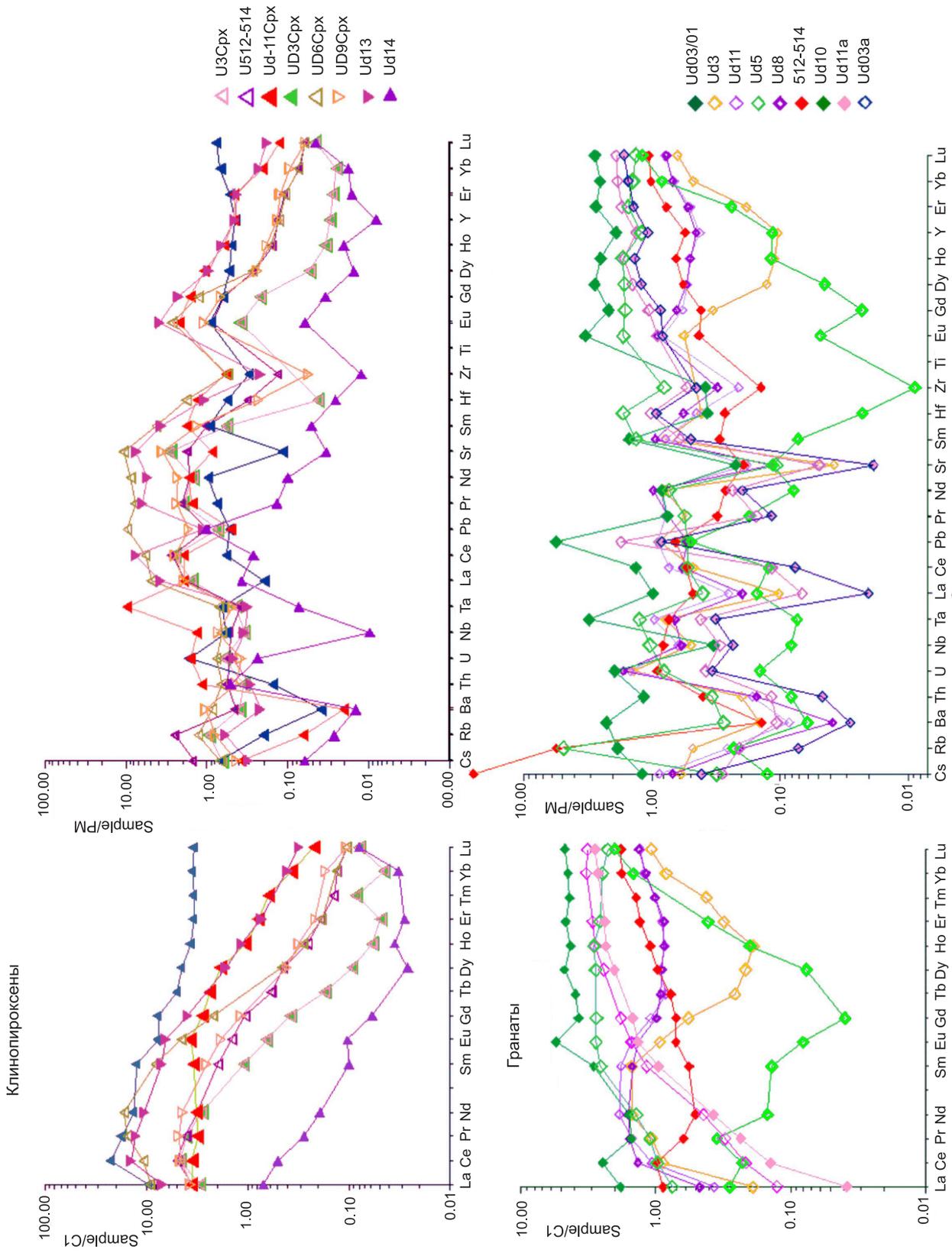


Рис. 2. Графики распределения редкоземельных элементов и мультикомпонентные спектры для перидотитовых минералов из кимберлитовой трубки Удачная

трубки Мир. На астеносферном уровне и выше – до 50 кбар – мантия разогрета, а в строении её разреза под трубками можно выделить четыре горизонта. Верхне-Мунское кимберлитовое поле (ВМКП) отличается тем, что в основании мантийных колонн предполагаются сравнительно неистощённые перидотиты, умеренно метасоматизированные. Эклогитовая линза, которая просматривается на уровне около 50 кбар под трубкой Заполярная и несколько менее выражена под трубкой Новинка, возможно, служила экраном для метасоматических компонентов, просачивавшихся снизу. Высокотемпературная ветвь по гранатовой термобарометрии характерна для трубки Новинка и ещё более свойственна для трубки Деймос, где пироксены сравнительно редки в концентрате, возможно, из-за высокой степени разогрева. Ещё более разогрета перидотитовая колонна под трубками Накынского поля. Характерной их особенностью является сравнительно большая доля глубинных гранатов и высокая степень разогрева. Возможно, эта причина привела к отсутствию типичных ильменитовых желваков и развитию пироксеновых мегакристаллов. Строение разреза под трубками Нюрбинская и Ботубинская имеет многоярусный характер: по данным гранатовой термобарометрии, под каждой из них прослеживается не менее шести горизонтов.

Изложенные выше материалы в целом подтверждают слоистое строение мантийных разрезов под трубками и конкретизируют обобщённый разрез литосферной мантии восточной части СП с вариациями состава в субмеридиональном направлении. По оценкам *PT*-параметров, для трубки Обнаженная (северная часть субпровинции) получены температуры от 800 до 1110 °С, давление от 30 до 40 кбар, что находится за пределами поля стабильности алмазов, при этом для эклогитов характерны температуры от 950 до 1110 °С, для перидотитов – 900–1050 °С, а для пироксенитов – 800–1100 °С. Мантия под центральной частью субпровинции (трубки Юбилейная и Удачная) отличается тем, что степень истощения растёт с глубиной, а тепловой поток соответствует 35–40 мВ/м<sup>2</sup>. Перидотитам свойственны метасоматические ассоциации с многими неравновесными минералами. Среди особенностей мантии под южной частью субпровинции (МКП) следует отметить присутствие высокомагнезиальных гранатовых перидотитов и пироксенитов из трубки, кристалломорфология и физические свойства алмазов [9, 13] дифференцированы на уровне субпровинции, поля и каждой трубки. Индивидуальные особенности состава и физических свойств индикаторных минералов трубок выявляются на статистическом уровне.

Анализ распределения несовместимых редких элементов в породах и минералах из зернистых перидотитов, не имеющих признаков модалного метасоматизма в виде новообразованных минералов, показал, что как по уровню содержаний, так и по характеру распределения элементов ксенолиты показывают последовательный переход от низких «первичных» концентраций к содержаниям и распределениям в метасоматизированных ксенолитах. Эта последовательность объясняется метасоматическим воздействием на мантийное вещество водно-углекислых флюидов, а также, возможно, карбонатитовых расплавов или расплавов, сформировавшихся в островодужной обстановке. Метасоматическая проработка мантийной литосферы происходила во время общего метаморфизма, соответствующего этапу кратонизации, и проявилась в большинстве случаев лишь в «скрытой» геохимической форме. В период тектономагматического кимберлитового цикла под континентальной литосферной плитой возникали очаги расплавов, давшие начало ассоциации мегакрист, а также преобразующие вещество астеносферы и нижних частей литосферной плиты. Поведение индикаторных несовместимых редких элементов (REE, Y, Nb, Hf, Zr, Ti) в гранатах и клинопироксенах из деформированных лерцолитов (астеносферное вещество) и из литосферных метасоматитов реакционного С-типа отражает геохимические различия мантийного метасоматизма в верхней части астеносферы и в низах литосферы и указывает на их возможную связь с единым глубинным источником. Различия в характере строения, минералогии и геохимии некоторых кимберлитовых трубок позволяют предположить, что в мантийной литосфере (даже в пределах куста трубок) могли существовать неоднородности и локальные зоны метасоматоза и просачивания.

**Заключение.** Таким образом, проведёнными исследованиями отмечены высокие концентрации СаО и СО<sub>2</sub> в вулканогенно-осадочных образованиях верхних частей диатрем СП, что вызвано повышенной ролью обломков вмещающих пород терригенно-карбонатного и карбонатного состава. В этих же частях диатрем отмечена пониженная концентрация TiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и ΣFe. В основании раструба трубок и в их вертикальных каналах, где преимущественно распространены эруптивные брекчии и массивные порфиновые кимберлиты, постепенно снижается содержание карбонатных компонентов, хотя их доля в кимберлитах СП даже на глубоких горизонтах диатрем всё же велика. За счёт уменьшения количества СаО и СО<sub>2</sub> на средних уровнях диатрем возрастает роль ряда других компонентов – SiO<sub>2</sub>, MgO и H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>. Содержания P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub> и K<sub>2</sub>O остаются примерно

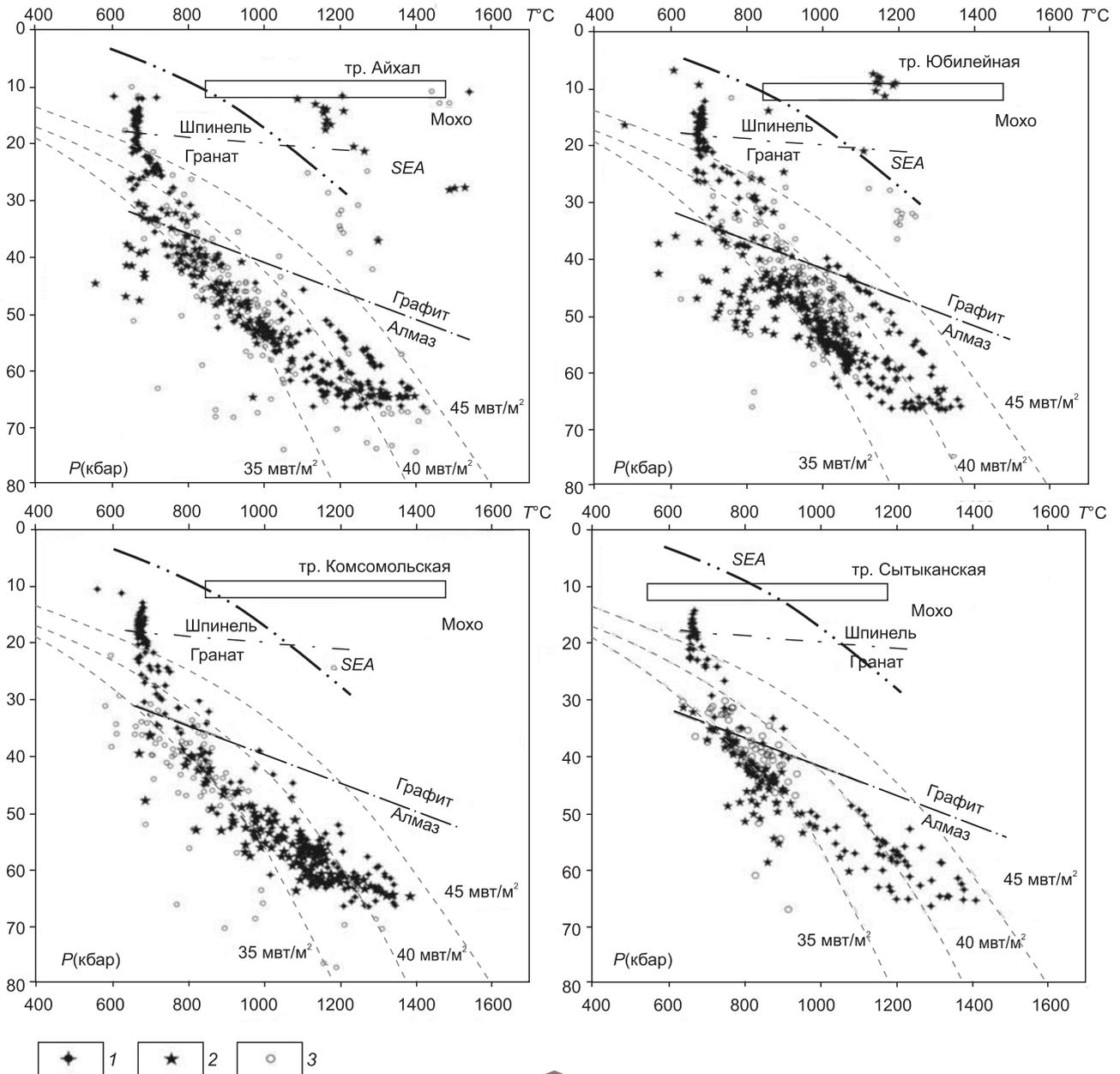


Рис. 3. *P*-*T*-диаграммы для мантийных пород под трубками Алакит-Мархинского кимберлитового поля:

Продуктивность кимберлитов: 1 – средне-, 2 – высоко-, 3 – низкоалмазоносные

одинаковыми по всему разрезу диатрем или изменяются несущественно, как и концентрации основных породообразующих оксидов. В большинстве изученных трубок СП с глубиной несколько увеличивается содержание  $K_2O$ , что обусловлено снижением степени хлоритизации флогопита. С воздействием на кимберлиты вмещающей среды связано возрастание с глубиной роли  $Na_2O$ ,  $Cl$  и  $SO_3$  в тех трубках, где вмещающими породами на глубоких

горизонтах являются галогенные и гипсоносные толщи. На глубоких горизонтах некоторых трубок повышается роль  $Fe_2O_3$ , что объясняется развитием здесь пироаурита или превращением амакинита в гидроксиды железа. В некоторых трубках (Интернациональная и др.) с глубиной снижается количество  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$ , а также возрастает концентрация  $MgO$  и  $H_2O^+$ , что обусловлено уменьшением в кимберлитах примеси терригенного материала.

По распределению сидерофильных элементов (Fe, Mg, V, Mn, Co, Cr и Ni) кимберлиты существенно отличаются от щелочных базальтов и близки к ультраосновным породам. По уровню концентрации сидерофильных элементов кимберлиты заметно отличаются от калиевых щелочных базальтов, щелочных оливиновых базальтов, а также от пикритовых порфиритов. В целом для кимберлитов выделены [3, 8, 17–20] две основные группы химических элементов. Первая группа – некогерентные (Na, K, Rb, Li, Cs, Sr, Ba, Th, U и TR), которыми кимберлитовая магма обогащена относительно ультраосновных мантийных пород. Вторая группа – когерентные (Ti, Zr, Nb, Ta, V, Mn, Pb, Zn, Sc, Au, Ag, Cr, Ni и Co) – подразделяется на подгруппу относительно легкоплавких элементов (Ti, Zr, Nb, Ta, V, Mn, Pb и Zn), которыми кимберлиты обогащены по сравнению с мантийными перидотитами; подгруппу индифферентных элементов (Sc, Au и Ag), содержание которых близко и в кимберлитах, и в перидотитах; подгруппу тугоплавких элементов (Cr, Ni и Co), которыми обеднена кимберлитовая магма. Сочетание этих геохимических признаков позволяет уверенно диагностировать кимберлиты алмазоносной провинции. Проявление признаков геохимической специализации находит своё продолжение и внутри кимберлитовых полей. Кимберлиты южной и центральной частей СП (МКП, АМКП, ДКП и ВМКП) отличаются от кимберлитов северных территорий более низкими концентрациями Ti, Al, Fe, K, P и по значениям различного рода петрохимических показателей (Si/Mg, Fe<sub>общ.</sub> и др.). По поведению ряда петрогенных компонентов и значениям петрохимических показателей, на примере ДКП и АМКП, установлены признаки латеральной зональности в распределении концентрации ведущих окислов и малых элементов в составе кимберлитов. Кроме того, в направлении от центра к периферии провинции (с юга на север от ДКП к Дюкенскому полю) установлены чётко выраженные вариации концентраций содержания микроэлементов кимберлитов. Многими исследователями отмечалось обогащение кимберлитов щелочами, железом и титаном при одновременном падении количества хрома и никеля, снижении магнетиальности и алмазоносности пород в направлении от центра к периферии провинции. Эти региональные выдержанные геохимические признаки указывают как на существование латеральной зональности в строении кимберлитовой провинции, так и на необходимость обязательного их учёта при определении групп элементов-индикаторов для конкретных перспективных участков. Внутри кимберлитовых полей для каждого кимберлитового тела отмечается их петрогеохимическая индивидуаль-

ность. Сложность и неоднократность процессов становления кимберлитовых диатрем и их геологические условия залегания приводят к формированию совокупности и в итоге дают петрологические и геохимические отличия каждой конкретной трубки. Отмечена также петрологическая и геохимическая индивидуальность кимберлитов интрузивной и эффузивной фаций кимберлитового процесса. Интрузивные кимберлиты выделяются более высокими концентрациями халькофильных элементов, в то время как для пород эксплозивных фаций (кимберлитовые брекчии) характерно преобладание элементов группы Fe и в первую очередь таких, как Cr, Co, Mn и Ti. Эти отличия обусловлены существующими вариациями микроэлементного состава основных петрологических типов кимберлитов.

Необходимо проводить сопоставление таких данных по различным группам мантийных пород, анализ условий их *P-T* равновесия на глубине, пространственного положения в верхней мантии под различными кимберлитовыми полями, соотношений с палеогеотермами. Большой интерес представляет оценка количественной роли различных мантийных парагенезисов в материнских кимберлитах с учётом избирательного захвата глубинного материала протокимберлитовыми расплавами, особенностей транспортировки захваченного материала к поверхности, устойчивости алмазов в глубинных выплавках и др. Иными словами, следует рассмотреть те параметры и процессы, анализ которых может помочь углубить понимание механизмов возникновения продуктивности кимберлитов. Предполагается, что на этой основе удастся усовершенствовать, особенно в количественном отношении по элементному составу, существующие критерии алмазоносности и, соответственно, методы прогнозирования и поисков новых месторождений. Геологоразведочные и прогнозно-поисковые работы на СП в условиях усложняющихся геолого-тектонических обстановок настоятельно требуют повышения степени информативности вещественных характеристик магматических источников алмазов для прогнозно-поисковых и оценочных целей. Изучение отдельных месторождений алмазов АМКП и ДКП в связи с их разведкой и вовлечением в ближайшее время в эксплуатацию и их дальнейшая эксплуатация (Комсомольская, Юбилейная, Удачная, Зарница, трубки НКП и ВМКП), а также пород трубочных и жильных тел и аномальных объектов северной части провинции (в связи с оценкой их потенциальной алмазоносности) вызывает необходимость и представляет возможность совершенствования принципов и критериев минералогическо-петрохимической диагностики промышленно-алмазоносных руд, выделения их основных типов (и фаз),

установления сходства и различия между высокопродуктивными кимберлитами и породами средне- и убогоалмазоносных диатрем.

Имеющийся массив информации по составу вещества верхней мантии под Сибирской алмазоносной провинцией требует переосмысления и анализа с позиций увязки современных представлений о строении и возрасте литосферы с продуктивностью кимберлитовых полей и отдельных трубок. С практической точки зрения, крайне важной выглядит задача разработки количественной модели корреляционных связей алмазоносности кимберлитов с составом глубинных зон, до сих пор не имеющая удовлетворительного решения, несмотря на усилия уже не одного поколения исследователей. В целом проблема взаимоотношений фрагментов мантийного вещества и вмещающих их кимберлитов остаётся в числе стержневых в современной петрологии, поскольку

может пролить дополнительный свет на процессы формирования разнообразных, особо глубинных, расплавов под древними платформами. Большой интерес представляет оценка количественной роли различных мантийных парагенезисов в материнских кимберлитах с учётом избирательного захвата глубинного материала протокимберлитовыми расплавами, особенностей транспортировки захваченного материала к поверхности, устойчивости алмазов в глубинных выплавках и др. Иными словами, следует рассмотреть те параметры и процессы, анализ которых может помочь углубить понимание механизмов возникновения продуктивности кимберлитов. Предполагается, что на этой основе удастся усовершенствовать, особенно в количественном отношении по элементному составу, существующие критерии алмазоносности и, соответственно, методы прогнозирования и поисков новых месторождений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасьев В. П., Елисейев А. П., Надолинный В. А., Зинчук Н. Н., Коптиль В. И., Рылов Г. М., Томиленко А. А., Горайнов С. В., Юрьева О. П., Сонин В. М., Чепуров А. И.* Минералогия и некоторые вопросы генезиса алмазов V и VII разновидностей (по классификации Ю. Л. Орлова) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия Геология. – 2000. – № 5. – С. 79–97.
2. *Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Логинова А. Н.* Особенности распределения россыпных алмазов, связанных с докембрийскими источниками // Записки Российского минералогического общества. – 2009. – Т. 138, № 2. – С. 1–13.
3. *Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Тычков С. А.* Проблема алмазоносности Сибирской платформы // Вестник Воронежского государственного университета. Геология. – 2002. – № 1. – С. 9–36.
4. *Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н.* Основные литодинамические типы ореолов индикаторных минералов кимберлитов и обстановки их формирования // Геология рудных месторождений. – 1999. – Т. 41, № 3. – С. 281–288.
5. *Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Коптиль В. И.* Полигенез алмазов в связи с проблемой коренных россыпей северо-востока Сибирской платформы // Доклады Академии наук. – 1998. – Т. 361, № 3. – С. 366–369.
6. *Афанасьев В. П., Похиленко Н. П., Логвинова А. М., Зинчук Н. Н., Ефимова Э. С., Сафьянников В. И., Красавчиков В. О., Подгорных М. М., Пругов В. П.* Особенности морфологии и состава некоторых хромшпинелидов алмазоносных площадей в связи с проблемой «ложных» индикаторов кимберлитов // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41, № 12. – С. 1729–1741.
7. *Богатилов О. А., Кононова В. А., Голубева Ю. Ю., Зинчук Н. Н., Илупин И. П., Ротман А. Я., Левский Л. К., Овчинникова Г. В., Кондрашов И. А.* Петрогеохимические и изотопные вариации состава кимберлитов Якутии и их причины // Геохимия. – 2004. – № 9. – С. 915–939.
8. *Василенко В. Б., Зинчук Н. Н., Кузнецова Л. Г.* Геодинамический контроль размещения кимберлитовых полей центральной и северной частей Якутской кимберлитовой провинции (петрохимический аспект) // Вестник Воронежского государственного университета. Геология. – 2000. – № 3 (9). – С. 37–55.
9. *Горшков А. И., Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д., Шлыков В. Г., Жухлистов А. П., Мохов А. В., Сивцов А. В.* Новый упорядоченный смешанослойный минерал лизардит-сапонит из кимберлитов Южной Африки // Доклады РАН. – 2002. – Т. 382, № 3. – С. 374–378.
10. *Егоров К. Н., Зинчук Н. Н., Мишенин С. Г., Серов В. П., Секерин А. П., Галенко В. П., Денисенко Е. П., Барышев А. С., Меньшагин Ю. В., Кошкарев Д. А.* Перспективы коренной и россыпной алмазоносности Юго-Западной части Сибирской платформы // Геологические аспекты минерально-сырьевой базы Акционерной компании «АЛРОСА»: современное состояние, перспективы, решения. Дополнительные материалы по итогам региональной научно-практической конференции «Актуальные проблемы геологической отрасли АК «АЛРОСА» и научно-методическое обеспечение их решений», посвящённой 35-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА». – Мирный: МГТ, 2003. – С. 50–84.
11. *Зинчук Н. Н.* Сравнительная характеристика вещественного состава коры выветривания кимберлитовых пород Сибирской и Восточно-Европейской платформ // Геология и геофизика. – 1992. – № 7. – С. 99–109.
12. *Зинчук Н. Н., Борис Е. И., Яныгин Ю. Б.* Особенности минерализации алмаза в древних осадочных толщах (на примере верхнепалеозойских отложений Сибирской платформы). – М.: МГТ, 2004. – 172 с.

13. *Зинчук Н. Н., Зинчук М. Н., Котельников Д. Д., Шлыков В. Г., Жухлистов А. П.* Структурно-кристаллохимические преобразования слоистых минералов на разных стадиях гипергенного изменения кимберлитов // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* – 2002. – № 1. – С. 47–60.
14. *Зинчук Н. Н., Зуев В. М., Коптиль В. И., Чёрный С. Д.* Стратегия ведения и результаты алмазописковых работ // *Горный вестник.* – 1997. – № 3. – С. 53–57.
15. *Зинчук Н. Н., Коптиль В. И., Борис Е. И., Липашова А. Н.* Типоморфизм алмазов из россыпей Сибирской платформы как основа поисков алмазных месторождений // *Руды и металлы.* – 1999. – № 3. – С. 18–33.
16. *Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д., Горшков А. И.* Идентификация и генезис лизардит-сапонитового смешанослойного образования в кимберлитах одной из трубок Южной Африки // *Литология и полезные ископаемые.* – 2003. – № 1. – С. 87–96.
17. *Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д., Соколов В. Н.* Изменение минерального состава и структурных особенностей кимберлитов Якутии в процессе выветривания // *Геология и геофизика.* – 1982. – № 2. – С. 42–53.
18. *Зинчук Н. Н., Мельник Ю. М., Серенко В. П.* Апокимберлитовые породы // *Геология и геофизика.* – 1987. – № 10. – С. 66–72.
19. *Зинчук Н. Н., Савко А. Д., Крайнов А. В.* Кимберлиты в истории Земли // *Труды НИИ геологии ВГУ.* – Воронеж: ВГУ, 2013. – Вып. 68. – 100 с.
20. *Зинчук Н. Н., Спеццус З. В., Зуенко В. В., Зуев В. М.* Кимберлитовая трубка Удачная. Вещественный состав и условия формирования. – Новосибирск: НГУ, 1993. – 147 с.
21. *Зинчук Н. Н., Борис Е. И., Стегницкий Ю. Б.* Структурно-формационное и минерагеническое районирование территорий развития погребенных кор выветривания и продуктов их переотложения в алмазоносных регионах (на примере Якутской кимберлитовой провинции) // *Геология и геофизика.* – 1998. – Т. 39, № 7. – С. 950–964.
22. *Квасница В. Н., Зинчук Н. Н., Коптиль В. И.* Типоморфизм микрокристаллов алмаза. – М.: Недра, 1999. – 224 с.
23. *Костровицкий С. И., Яковлев Д. А., Спеццус З. В.* Неоднородность литосферной мантии под северными полями Якутской провинции и алмазоносность кимберлитов // *Эффективность геологоразведочных работ на алмазы: прогнозно-ресурсные, методические, инновационно-технологические пути её повышения. Материалы V Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 50-летию Алмазной лаборатории ЦНИГРИ–НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО).* – Мирный: МГТ, 2018. – С. 114–118.
24. *Котельников Д. Д., Домбровская Ж. В., Зинчук Н. Н.* Основные закономерности выветривания силикатных пород различного химического и минералогического типа // *Литология и полезные ископаемые.* – 1995. – № 6. – С. 594–601.
25. *Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н.* Об аномалии общей схемы преобразования разбухающих глинистых минералов при погружении содержащих их отложений в стратисферу // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия Геология.* – 2003. – № 2. – С. 57–68.
26. *Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н.* Особенности глинистых минералов в отложениях различных осадочных формаций // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* – 1997. – № 2. – С. 53–63.
27. *Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н.* Типоморфные особенности и палеогеографическое значение слюдяных минералов // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* – 1996. – № 1. – С. 53–61.
28. *Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н.* Условия накопления и постседиментационного преобразования глинистых минералов в осадочном чехле земной коры // *Вестник Воронежского университета. Геология.* – 2001. – № 12. – С. 45–51.
29. *Мацюк С. С., Зинчук Н. Н.* Оптическая спектроскопия минералов верхней мантии. – М.: Недра, 2001. – 428 с.
30. *Савко А. Д., Зинчук Н. Н., Шевырёв Л. Т., Ильяш В. В., Афанасьев Н. С.* Алмазоносность Воронежской антеклизы // *Труды НИИГ Воронежского ун-та.* – 2003. – Т. 17. – 121 с.
31. *Симоненко В. И., Толстов А. В., Васильева В. И.* Новый подход к геохимическим поискам кимберлитов на закрытых территориях // *Разведка и охрана недр.* – 2008. – № 4–5. – С. 108–112.
32. *Харьков А. Д., Зуенко В. В., Зинчук Н. Н.* и др. Петрохимия кимберлитов. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
33. *Хитров В. Г., Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д.* Применение кластер-анализа для выяснения закономерностей выветривания пород различного состава // *Доклады АН СССР.* – 1987. – Т. 296, № 5. – С. 1228–1233.
34. *Grachanov S. A., Zinchuk N. N., Sobolev N. V.* The age of Predictable primary diamond sources in the Northeastern Siberian platform // *Doklady Earth Sciences.* – 2015. – V. 465, № 2. – P. 1297–1301.
35. *Serov I. V., Garanin V. K., Zinchuk N. N., Rotman A. Ya.* Mantle Sources of the kimberlite Volcanism of the Siberian Platform // *Petrology.* – 2001. – V. 9, № 6. – P. 576–588.
36. *Vasilenko V. B., Kuznetsova L. G., Volkova N. I. et al.* Diamond potential estimation based on Kimberlite major element chemistry // *Journal of Geochemical Exploration.* – 2002. – V. 76, № 2. – P. 93–112.

## REFERENCES

1. *Afanasyev V. P., Yeliseyev A. P., Nadolinnyu V. A., Zinchuk N. N.* et al. Mineralogiya i nekotoryye voprosy genezisaalmazov V i VII raznovidnostey (po klassifikatsii Yu. L. Orlova) [Mineralogy and some questions of the genesis of diamonds of V and VII varieties (according to the classification of Yu. L. Orlov)]. *Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta. Seriya Geologiya*, 2000, No. 5, P. 79–97. (In Russ.)
2. *Afanasyev V. P., Zinchuk N. N., Loginova A. N.* Osobennosti raspredeleniya rossypanykhalmazov, svyazannykh s dokembriyskimi istochnikami [Features of the distribution of placer diamonds associated with Precambrian sources].

- Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva, 2009, V. 138, No. 2, P. 1–13. (In Russ.)
3. *Afanasyev V.P., Zinchuk N.N., Tychkov S.A.* Problema almazonosnosti Sibirskoy platformy [The problem of diamond content of the Siberian platform]. Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta, Geologiya, 2002, No. 1, P. 19–36. (In Russ.)
  4. *Afanasyev V.P., Zinchuk N.N.* Osnovnyye litodinamicheskiye tipy oreolov indikatornykh mineralov kimberlitov i obstanovki ikh formirovaniya [The main lithodynamic types of halos of indicator minerals of kimberlites and the setting of their formation]. Geologiya rudnykh mestorozhdeniy, 1999, V. 41, No. 3, P. 281–288. (In Russ.)
  5. *Afanasyev V.P., Zinchuk N.N., Koptil V.I.* Poligenez almazov v svyazi s problemoy korennykh rossypey severovostoka Sibirskoy platformy [Polygenesis of diamonds in connection with the problem of bedrock placers in the northeastern Siberian platform]. Doklady Akademii nauk, 1998, V. 361, No. 3, P. 366–369. (In Russ.)
  6. *Afanasyev V.P., Pokhilenko N.P., Logvinova A.M., Zinchuk N.N., Yefimova E.S., Safyannikov V.I., Krasavchikov V.O., Podgornyykh M.M., Prugov V.P.* Osobennosti morfologii i sostava nekotorykh khromshpinelidov almazonosnykh ploshchadey v svyazi s problemoy “lozhnykh” indikatorov kimberlitov [Peculiarities of morphology and composition of some chrome-spinels of diamond-bearing areas in connection with the problem of “false” indicators of kimberlites]. Geologiya i geofizika, 2000, V. 41, No. 12, P. 1729–1741. (In Russ.)
  7. *Bogatikov O.A., Kononova V.A., Golubeva Yu. Yu., Zinchuk N.N.* et al. Petrogeokhimicheskiye i izotopnyye variatsii sostava kimberlitov Yakutii i ikh prichiny [Petrogeochemical and isotopic variations in the composition of kimberlites of Yakutia and their causes]. Geokhimiya, 2004, No. 9, P. 915–939. (In Russ.)
  8. *Vasilenko V.B., Zinchuk N.N., Kuznetsova L. G.* Geodinamicheskiy kontrol razmeshcheniya kimberlitovykh poley tsentralnoy i severnoy chastey Yakutskoy kimberlitovoy provintsii (petrokhimicheskiy aspekt) [Geodynamic control of the location of kimberlite fields in the central and northern parts of the Yakutsk kimberlite province (petrochemical aspect)]. Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta, Geologiya, 2000, No. 3 (9), P. 37–55. (In Russ.)
  9. *Gorshkov A.I., Zinchuk N.N., Kotelnikov D.D., Shlykov V.G., Zhukhlistov A.P., Mokhov A.V., Sivtsov A.V.* Novyy uporyadochennyy smeshanosloynny mineral lizardit-saponit iz kimberlitov Yuzhnoy Afriki [New ordered mixed-layer lizardite-saponite mineral from kimberlites South Africa]. Doklady RAN, 2002, V. 382, No. 3, P. 374–378. (In Russ.)
  10. *Yegorov K.N., Zinchuk N.N., Mishenin S.G., Serov V.P., Sekerin A.P., Galenko V.P., Denisenko Ye.P., Baryshev A.S., Menshagin Yu.V., Koshkarev D.A.* Perspektivy korennoy i rossypnoy almazonosnosti Yugo-Zapadnoy chasti Sibirskoy platformy [Prospects for the primary and alluvial diamond content of the Southwestern part of the Siberian platform]. Digest Geologicheskkiye aspekty mineralno-syr'yevoy bazy Aktsionernoy kompanii “ALROSA”: sovremennoye sostoyaniye, perspektivy, resheniya. Dopolnitelnyye materialy po itogam regionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktualnyye problemy geologicheskoy otrasli AK “ALROSA” i nauchno-metodicheskoye obespecheniye ikh resheniy», posvyashchennoy 35-letiyu YANIGP TSNIGRI AK «ALROSA». Mirnyy, MGT publ., 2003, P. 50–84. (In Russ.)
  11. *Zinchuk N.N.* Sravnitel'naya kharakteristika veshchestvennogo sostava kory vyvetrivaniya kimberlitovykh porod Sibirskoy i Vostochno-Yevropeyskoy platform [Comparative characteristics of the material composition of the weathering crust of kimberlite rocks of the Siberian and East European platforms]. Geologiya i geofizika, 1992, No. 7, P. 99–109. (In Russ.)
  12. *Zinchuk N.N., Boris Ye.I., Yanygin Yu. B.* Osobennosti mineragenii almaza v drevnikh osadochnykh tolshchakh (na primere verkhnepaleozoyskikh otlozheniy Sibirskoy platformy) [Peculiarities of diamond minerageny in ancient sedimentary strata (on the example of the Upper Paleozoic deposits of the Siberian platform)]. Moscow, MGT publ., 2004, 172 p. (In Russ.)
  13. *Zinchuk N.N., Zinchuk M.N., Kotelnikov D.D., Shlykov V.G., Zhukhlistov A.P.* Strukturno-kristallokhimicheskiye preobrazovaniya sloistyykh mineralov na raznykh stadiyakh gipergennogo izmeneniya kimberlitov [Structural-crystal-chemical transformations of layered minerals at different stages of hypergene alteration of kimberlites]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka, 2002, No. 1, P. 47–60. (In Russ.)
  14. *Zinchuk N.N., Zuyev V.M., Koptil V.I., Chornyy S.D.* Strategiya vedeniya i rezultaty almazoposkovykh rabot [Strategy of conducting and results of diamond prospecting works]. Gornyy vestnik, 1997, No. 3, P. 53–57. (In Russ.)
  15. *Zinchuk N.N., Koptil V.I., Boris Ye.I., Lipashova A.N.* Tipomorfizm almazov iz rossypey Sibirskoy platformy kak osnova poiskov almaznykh mestorozhdeniy [Typomorphism of diamonds from placers of the Siberian platform as a basis for prospecting for diamond deposits]. Rudy i metally, 1999, No. 3, P. 18–30. (In Russ.)
  16. *Zinchuk N.N., Kotelnikov D.D., Gorshkov A.I.* Identifikatsiya i genezis lizardit-saponitovogo smeshanosloynnogo obrazovaniya v kimberlitakh odnoy iz trubok Yuzhnoy Afriki [Identification and genesis of lizardite-saponite mixed-layer formation in kimberlites of one of the pipes of South Africa]. Litologiya i poleznyye iskopayemyye, 2003, No. 1, P. 87–96. (In Russ.)
  17. *Zinchuk N.N., Kotelnikov D.D., Sokolov V.N.* Izmeneniye mineralnogo sostava i strukturnykh osobennostey kimberlitov Yakutii v protsesse vyvetrivaniya [Change in the mineral composition and structural features of the kimberlites of Yakutia in the process of weathering]. Geologiya i geofizika, 1982, No. 2, P. 42–53. (In Russ.)
  18. *Zinchuk N.N., Melnik Yu.M., Serenko V.P.* Apokimberlitovyye porody [Apokimberlite rocks]. Geologiya i geofizika, 1987, No. 10, P. 66–72. (In Russ.)
  19. *Zinchuk N.N., Savko A.D., Kraynov A.V.* Kimberlity v istorii Zemli [Kimberlites in the history of the Earth]. Trudy NII geologii VGU, Is. 68, Voronezh, VGU publ., 2013, 99 p. (In Russ.)
  20. *Zinchuk N.N., Spetsius Z.V., Zuyenko V.V., Zuyev V.M.* Kimberlitovaya trubka Udachnaya. Veshchestvennyy sostav

- i usloviya formirovaniya [Udachnaya kimberlite pipe. Substance composition and conditions of formation]. Novosibirsk, NGU, 1993, 147 p. (In Russ.)
21. *Zinchuk N.N., Boris Ye. I., Stegnitskiy Yu. B.* Strukturno-formatsionnoye i mineragenicheskoye rayonirovaniye territoriy razvitiya pogrebennykh kor vyvetrivaniya i produktov ikh pereotlozheniya v almazonosnykh regionakh (na primere Yakutskoy kimberlitovoy provintsii) [Structural-formational and mineragenic zoning of the territories of development of buried weathering crusts and products of their redeposition in diamond-bearing regions (on the example of the Yakut kimberlite province)]. *Geologiya i geofizika*, 1998, V. 39, No. 7, P. 950–964. (In Russ.)
  22. *Kvasnitsa V.N., Zinchuk N.N., Koptil V.I.* Tipomorfizm mikrokrystallov almaza [Typomorphism of diamond microcrystals]. Moscow, Nedra publ., 1999, 224 p. (In Russ.)
  23. *Kostrovitskiy S.I., Yakovlev D.A., Spetsius Z.V.* Neodnorodnost litosfernoy mantii pod severnymi polyami Yakutskoy provintsii i almazonosnost kimberlitov [Heterogeneity of the lithospheric mantle under the northern fields of the Yakutsk province and the diamond content of kimberlites]. *Digest Effektivnost geologorazvedochnykh rabot na almazy: prognozno-resursnyye, metodicheskiye, innovatsionno-tehnologicheskiye puti yeyo povysheniya. Materialy V Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 50-letiyu Almaznoy laboratorii TSNIGRI-NIGP AK "ALROSA" (PAO).* Mirnyy, MGT publ., 2018, P. 114–118. (In Russ.)
  24. *Kotelnikov D.D., Dombrovskaya Zh. V., Zinchuk N.N.* Osnovnyye zakonomernosti vyvetrivaniya silikatnykh porod razlichnogo khimicheskogo i mineralogicheskogo tipa [Main regularities of weathering of silicate rocks of various chemical and mineralogical types]. *Litologiya i poleznyye iskopayemye*, 1995, No. 6, P. 594–601. (In Russ.)
  25. *Kotelnikov D.D., Zinchuk N.N.* Ob anomalii obshchey skhemy preobrazovaniya razbukhayushchikh glinistykh mineralov pri pogruzhenii sodержashchikh ikh otlozheniy v stratisferu [About the anomaly of the general scheme of the swelling clay minerals transformation during the immersion of sediments containing them into the stratisphere]. *Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta. Seriya geologiya*, 2003, No. 2, P. 57–68. (In Russ.)
  26. *Kotelnikov D.D., Zinchuk N.N.* Osobennosti glinistykh mineralov v otlozheniyakh razlichnykh osadochnykh formatsiy [Peculiarities of clay minerals in deposits of various sedimentary formations]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka*, 1997, No. 2, P. 53–63. (In Russ.)
  27. *Kotelnikov D.D., Zinchuk N.N.* Tipomorfnyye osobennosti i paleogeograficheskoye znachenije slyudistykh mineralov [Typomorphic features and paleogeographic significance of micaceous minerals]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka*, 1996, No. 1, P. 53–61. (In Russ.)
  28. *Kotelnikov D.D., Zinchuk N.N.* Usloviya nakopleniya i postsedimentatsionnogo preobrazovaniya glinistykh mineralov v osadochnom chekhle zemnoy kory [Conditions of accumulation and postsedimentary transformation of clay minerals in the sedimentary cover of the earths crust]. *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya*, 2001, No. 12, P. 45–51. (In Russ.)
  29. *Matsyuk S.S., Zinchuk N.N.* Opticheskaya spektroskopiya mineralov verkhney mantii [Optical spectroscopy of minerals of the upper mantle]. Moscow, Nedra publ., 2001, 428 p. (In Russ.)
  30. *Savko A.D., Zinchuk N.N., Shevyrov L.T., Ilyash V.V., Afanasyev N.S.* Almazonosnost Voronezhskoy anteklizy [Diamond potential of the Voronezh antecline]. *Trudy NIIG Voronezhskogo un-ta*, 2003, V. 17, 121 p. (In Russ.)
  31. *Simonenko V.I., Tolstov A.V., Vasilyeva V.I.* Novyy podkhod k geokhimicheskim poiskam kimberlitov na zakrytykh territoriyakh [A new approach to geochemical prospecting for kimberlites in closed areas]. *Razvedka i okhrana*, 2008, No. 4–5, P. 108–112. (In Russ.)
  32. *Kharkiv A.D., Zuyenko V.V., Zinchuk N.N. et al.* Petrokhimiya kimberlitov [Petrochemistry of kimberlites]. Moscow, Nedra publ., 1991, 304 p. (In Russ.)
  33. *Khitrov V.G., Zinchuk N.N., Kotelnikov D.D.* Primeniye klaster-analiza dlya vyyasneniya zakonomernostey vyvetrivaniya porod razlichnogo sostava [Application of cluster analysis to elucidate the regularities of weathering of rocks of different composition]. *Doklady AN SSSR*, 1987, V. 296, No. 5, P. 1228–1233. (In Russ.)
  34. *Grachanov S.A., Zinchuk N.N., Sobolev N.V.* The age of Predictable primary diamond sources in the Northeastern Siberian platform. *Doklady Earth Sciences*, 2015, V. 465, No. 2, P. 1297–1301.
  35. *Serov I.V., Garanin V.K., Zinchuk N.N., Rotman A. Ya.* Mantle Sources of the kimberlite Volcanism of the Siberian Platform. *Petrology*, 2001, V. 9, No. 6, P. 576–588.
  36. *Vasilenko V.B., Kuznetsova L.G., Volkova N.I. et al.* Diamond potential estimation based on Kimberlite major element chemistry. *Journal of Geochemical Exploration*, 2002, V. 76, No. 2, P. 93–112.

## Состав гранатов из кимберлитов Архангельской области как один из признаков алмазоносности

Показана эффективность применения различных существующих методов определения потенциальной алмазоносности кимберлитовых трубок по составам гранатов на примере высокоалмазоносных кимберлитовых трубок им. В. Гриба и Архангельская и слабоалмазоносной кимберлитовой трубки ЦНИГРИ-Архангельская, расположенных в Архангельской алмазоносной провинции. Выявлены причины слабой алмазоносности трубки ЦНИГРИ-Архангельская. Результаты работы позволили определить комплекс обязательных методов при изучении зёрен гранатов, извлечённых из шлиховых проб и магматических тел с целью оценки потенциальной промышленной алмазоносности объектов, выявленных в ходе поисков для планирования последующих поисково-оценочных работ на территории Архангельской области.

*Ключевые слова:* разведка алмазов, пироп, литосферная мантия, Архангельская алмазоносная провинция, мантийный метасоматоз, алмаз, геохимия.

АГАШЕВА ЕЛЕНА ВЛАДИМИРОВНА, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник<sup>1</sup>, helenashchukina@gmail.com, shchukinalena@igm.nsc.ru

АГАШЕВ АЛЕКСЕЙ МИХАЙЛОВИЧ, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник<sup>1</sup>

ГУДИМОВА АЛЁНА ИВАНОВНА, инженер<sup>1</sup>

МАЛЫГИНА ЕЛЕНА ВЕНИАМИНОВНА, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник<sup>1</sup>

ЧЕРВЯКОВСКИЙ ВАСИЛИЙ СТАНИСЛАВОВИЧ, заведующий группой пробоподготовки<sup>2</sup>

ПРУСАКОВА НАТАЛЬЯ АЛЕКСАНДРОВНА, кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией<sup>3</sup>, prusakova@tsnigri.ru

ЩУКИН ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ, кандидат геолого-минералогических наук, главный геолог<sup>4</sup>

ГОЛУБЕВ ЮРИЙ КОНКОРДЬЕВИЧ, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий отделом<sup>3</sup>, diamond@tsnigri.ru

ПОХИЛЕНКО НИКОЛАЙ ПЕТРОВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, научный руководитель<sup>1</sup>, главный научный сотрудник, академик РАН

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии имени В. С. Соболева Сибирского отделения Российской Академии Наук (ИГМ СО РАН), г. Новосибирск

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого Уральского отделения РАН (ИГГ УрО РАН), г. Екатеринбург

<sup>3</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геолого-разведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»), г. Москва

<sup>4</sup> ООО «Арктикгеопоиск», г. Архангельск

## Garnet composition from kimberlites of the Arkhangelsk region as a proxy for diamond prospectivity

E. V. AGASHEVA<sup>1</sup>, A. M. AGASHEV<sup>1</sup>, A. I. GUDIMOVA<sup>1</sup>, E. V. MALYGINA<sup>1</sup>, V. S. CHERVYAKOVSKY<sup>2</sup>, N. A. PRUSAKOVA<sup>3</sup>, V. S. SHCHUKIN<sup>4</sup>, Yu. K. GOLUBEV<sup>3</sup>, N. P. POKHILENKO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk

<sup>2</sup> A. N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg

<sup>3</sup> Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow

<sup>4</sup> LLC «Arktikgeopoisk», Arkhangelsk

We showed the effectiveness of the various existing methods applied for the determination of the diamond prospectivity of kimberlite pipes based on the composition of garnets on the examples of high-grade diamond-bearing kimberlite pipes V. Grib and Arkhangelsk and low-grade kimberlite pipe TsNIGRI-Arkhangelsk, located in the Arkhangelsk diamondiferous province. The reasons for the low diamond grade of the TsNIGRI-Arkhangelskaya pipe are revealed. The results of this work allowed us to determine the analytical procedure for studying the garnet grains extracted from panned samples and magmatic bodies in order to assess the potential diamond grade of prospected areas in order to plan subsequent exploration and appraisal work in the Arkhangelsk region.

*Key words:* diamond exploration, pyrope, lithospheric mantle, Arkhangelsk diamondiferous province, mantle metasomatism, diamond, geochemistry.

Определяющим фактором степени алмазоносности кимберлитовых трубок является состав литосферной мантии, вещество которой присутствует в кимберлите в виде ксенолитов мантийных пород и их фрагментов. Изучение мантийных ксенолитов и ксенокристов, извлечённых из кимберлита, позволяет определить основные характеристики литосферной мантии, такие как: 1) соотношение типов пород, участвующих в её строении; 2) температурный режим; 3) глубину нижней границы и мощность «алмазного окна»; 4) типы и последовательность метасоматических преобразований мантийных пород и оценку влияния этих процессов на возможность образования и сохранения алмазов в породах литосферной мантии до этапа кимберлитового магматизма. Получение этих данных по мантийным образцам из кимберлитовых трубок с разной степенью алмазоносности позволяет, с одной стороны, определять эталонные характеристики высокоалмазоносной литосферной мантии, а с другой стороны, выявлять причины её слабой (не) алмазоносности. Эта информация впоследствии может использоваться при интерпретации составов минералов тяжёлой фракции из проб осадочных пород, полученных при геологоразведочных работах на алмазы на стадии выделения перспективных с точки зрения обнаружения коренных источников алмазов площадей. Изучение проб осадочных пород включает в себя

несколько этапов: 1) идентификация минералов-индикаторов кимберлита в пробах; 2) изучение особенностей морфологии зёрен; 3) выявление доли тех минералов-индикаторов, составы которых соответствуют минералам «алмазной ассоциации». Совокупность полученной информации позволяет делать выводы о возможном присутствии в пределах изучаемой территории коренных источников алмазов кимберлитового типа и их потенциальной алмазоносности. Гранат пиропового состава, вероятно, является самым информативным из всех минералов-индикаторов кимберлита, разносторонняя интерпретация состава которого позволяет получать комплексную характеристику литосферной мантии и делать выводы о перспективах потенциальной алмазоносности площади или объекта. В настоящей работе мы приводим первые данные по составам гранатов из слабоалмазоносной кимберлитовой трубки ЦНИГРИ-Архангельская, а также методом сравнения с опубликованными ранее данными по составу пиропов из высокоалмазоносных трубок Архангельская и им. В. Гриба показываем эффективность применения различных существующих методов определения потенциальной алмазоносности объектов Архангельской алмазоносной провинции. Результатом настоящей работы является выявление обязательных методов изучения гранатов, которые могут быть использованы при поисково-оценочных работах на алмазы в регионе.

**Общая информация об образцах исследования и кимберлитовых объектах.** В настоящей работе приведены данные по концентрациям главных элементов и Ni в 450 зёрнах гранатов, отобранных из концентрата минералов тяжёлой фракции кимберлита трубки ЦНИГРИ-Архангельская; для 165 зёрен определены концентрации редких элементов. Также мы приводим данные по содержанию главных элементов и Ni в 1100 зёрнах гранатов из кимберлитовой трубки им. В. Гриба. Для сравнения используются обработанные авторами настоящей статьи исходные аналитические данные по концентрациям главных (311 зёрен) и редких элементов (58 зёрен) в гранатах из кимберлитовой трубки Архангельская, опубликованные в работе [43], и данные по содержанию главных и редких элементов в 150 зёрнах гранатов из кимберлитовой трубки им. В. Гриба, представленные в работе [54]. Необходимо отметить, что к настоящему времени опубликован разнообразный материал по составу мантийных пород из кимберлитовых объектов Архангельской алмазоносной провинции (ААП), большая часть которого посвящена изучению образцов из кимберлитовой трубки им. В. Гриба [9, 21, 26, 51, 52]. В некоторых работах приводятся результаты комплексных исследований минералов-индикаторов кимберлита из нескольких магматических объектов ААП, но, к сожалению, исходные аналитические данные авторами или не предоставляются [15, 22, 35, 49], или ограничиваются информацией о концентрациях главных элементов [16], что делает невозможным их полноценное использование в рамках настоящей работы.

Слабоалмазоносная (0,056 кар/т, [6]) кимберлитовая трубка ЦНИГРИ-Архангельская расположена в пределах Кепинской площади ААП. Валовый состав кимберлитов трубки ЦНИГРИ-Архангельская соответствует кимберлитам умеренно-, высокотитанистой серии ААП [6, 7] и близок к кимберлитам I группы Южной Африки [56]. Кимберлитовая трубка Архангельская расположена в пределах Золотицкого кимберлитового поля и является одной из шести трубок месторождения им. М. В. Ломоносова с содержаниями алмазов 0,5–1,6 кар/т [55]. По валовому составу кимберлиты трубки Архангельская относятся к низкотитанистым кимберлитам Al-Mg серии ААП, а по изотопному составу близки к кимберлитам II группы Южной Африки [4, 10]. Кимберлитовая трубка им. В. Гриба расположена в пределах Верхотинского поля и является крупнейшим месторождением алмазов ААП. Для трубки установлены значительные вариации содержания алмазов: от 0,3 кар/т в кратерной части до 0,93–1,27 кар/т в диатремовой части. В целом по месторождению в размерном классе +1 мм содержания алмазов составляют 0,76 кар/т

[19]. По изотопному составу эти кимберлиты близки кимберлитам I группы Южной Африки; валовый состав свидетельствует об их принадлежности к кимберлитам среднетитанистой серии ААП [10].

**Аналитические методы исследования.** Концентрации главных элементов в гранатах определялись с помощью электронно-зондового микроанализатора JEOL JXA-8100 в Аналитическом центре ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе 50 нА с размером пучка 1 мкм. Время подсчёта составляло 20 с для пиков сигнала и 10 с для фона; был применён метод коррекции ZAF. Пределы обнаружения составляли < 0,05 мас.% для всех анализируемых элементов, в том числе 0,01 мас.% для Cr и Mn, 0,02 мас.% для Ti и Na и 0,05 мас.% для K. Для определения концентраций Ni было использовано ускоряющее напряжение 25 кВ и ток 300 нА, для пиков сигнала и фона время подсчёта составляло 400 с. Подробная информация о методике представлена в работах [11, 12]. Концентрации редких элементов в гранатах определялись с использованием квадрупольного масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой NexION 300S (Perkin Elmer) (ICP-MS), оборудованного системой лазерной абляции NWR 213 (ESI) в Центре коллективного пользования «Геоаналитик» УрО РАН (г. Екатеринбург). Лазерная абляция проводилась при частоте следования импульсов 10 Гц, плотности энергии 10–11 Дж/см<sup>2</sup> и диаметром пучка 50 мкм. Результаты обрабатывались с использованием программы GLITTER V4.4 для получения окончательных данных. Контрольные измерения NIST SRM 610 и NIST SRM 612 использовались в качестве внешнего стандарта. Два анализа стандарта NIST SRM 612 проводились до и после 10 определений. Концентрации Ca, определённые методом электронно-зондового анализа, использовались в качестве внутреннего стандарта. Соответствие данных по концентрациям Ni в гранатах, определённых методами EMPA и ICP-MS находится в пределах 90–100 %.

**Методы определения критериев алмазоносности на основании составов мантийных гранатов.**

### 1. Концентрации главных элементов в гранатах.

*1.1. Содержания CaO и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в пиропсах.* Использование данных по концентрациям CaO и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в гранатах позволяет определить соотношение типов пород, участвующих в строении литосферной мантии, и выявить количество зёрен, по составу соответствующих полю «алмазной ассоциации» [38, 58]. Полю «алмазной ассоциации» традиционно считается область составов низкокальциевых высокохромистых пиропов дунит-гарцбургитового парагенезиса [58], обозначаемых также группой «G10D» [38]. Этот тип пиропов указывает на наличие деплетированных и минимально (не) затронутых процессами мантийного

метасоматоза пород в строении литосферной мантии, которые до момента захвата их кимберлитом могли находиться в условиях, благоприятных для образования и сохранения алмазов [59]. Ранние работы по изучению включений в алмазах [40, 58] показали, что именно низкокальциевые высокохромистые пиропы являются наиболее распространённым типом гранатов перидотитового парагенезиса, обнаруженных в виде включений в алмазах (до 85 % [40]). Тем не менее количество «G10D» пиропов не всегда коррелирует с алмазоносностью кимберлитов: например, высокоалмазоносные трубки Премьер, Орапа, Джваненг, Де Бирс, Буффало Хилс, Слоан содержат мало или вовсе не содержат «G10D» пиропов [36, 59]. К настоящему времени не существует конкретного значения, определяющего какое процентное количество пиропов «G10D» может указывать на высокую или низкую алмазоносность объекта. В высокоалмазоносных трубках мира количество пиропов «G10D» различно: до 15 % в трубках кратона Каапвааль [39], от 2 до 13 % в трубках района Лунды в Анголе [65], от 1,5 до 17 % в трубках Якутской алмазоносной провинции (ЯАП) [3]. На рис. 1 показано соотношение различных парагенезисов пиропов из высокоалмазоносных кимберлитовых трубок Архангельская и им. В. Гриба и убогоалмазоносной трубки ЦНИГРИ-Архангельская. Наибольшее количество пиропов «G10D» зафиксировано для кимберлитовой трубки им. В. Гриба (4 %), что сопоставимо с полученными ранее данными по этому объекту (6 % [54], 4,9 % [5]). Для кимберлитовых трубок Архангельская и ЦНИГРИ-Архангельская доля пиропов «G10D» составляет < 2 % и < 1 % соответственно. Полученные значения указывают на то, что, во-первых, данные по количеству пиропов «G10D» из объектов ААП не могут быть определённо решающим критерием для оценки их потенциальной алмазоносности ввиду того, что в высокоалмазоносных кимберлитовых трубках ААП количество пиропов «G10D» может быть незначительно, и, во-вторых, наличие даже минимального количества пиропов «G10D» не исключает алмазоносность объекта.

*1.2. Содержания NaO и TiO<sub>2</sub> в гранатах эклогитового парагенезиса.* Данные по концентрациям Na<sub>2</sub>O и TiO<sub>2</sub> в гранатах эклогитового парагенезиса используются для определения количества зёрен, которые могут генетически относиться к алмазодержащим эклогитам. Выделение этой группы гранатов особенно актуально при условии, что алмазоносность опробуемой кимберлитом литосферной мантии связана преимущественно с эклогитами, имеющими субдукционный генезис, как например, для трубок Орапа, Джериго, Джваненг и Робертс Виктор [30]. Гранаты эклогитового парагенезиса, обнаруженные в виде включений

в алмазах, как правило, содержат Na<sub>2</sub>O > 0,07 мас.% (рис. 2, [57]). Концентрации Na<sub>2</sub>O и TiO<sub>2</sub> в эклогитовых гранатах из изученных кимберлитовых трубок ААП (см. рис. 2) указывают на то, что > 70 % эклогитовых гранатов из трубки им. В. Гриба могут быть связаны с алмазоносными породами; эта принадлежность исключается для гранатов из трубки Архангельская и неочевидна для таковых из трубки ЦНИГРИ-Архангельская, конечно, учитывая при этом неравное количество гранатов эклогитовой ассоциации из трёх трубок (см. рис. 2). Результаты изучения включений в алмазах из кимберлитов ААП [18] показали, что 85 % включений соответствуют перидотитовому парагенезису, и только 15 % – эклогитовому. Это, в свою очередь, может свидетельствовать о том, что алмазоносность литосферной мантии ААП связана преимущественно с перидотитами при подчинённом значении эклогитов. Тем не менее результаты изучения алмазов из кимберлитовых трубок Архангельская, Поморская и Карпинского-1 месторождения им. М. В. Ломоносова [20] предполагают преимущественно их эклогитовый парагенезис. Отсутствие представительного количества опубликованных данных по составам гранатов эклогитовой ассоциации из магматических объектов ААП, в том числе для включений в алмазах, затрудняет использование граната этого типа в качестве информативного показателя алмазоносности. Поэтому данные по содержанию Na<sub>2</sub>O и TiO<sub>2</sub> в эклогитовых гранатах могут быть использованы только как второстепенный условный критерий при составлении прогноза потенциальной алмазоносности площади или объекта на территории ААП. Этот метод можно рассматривать как первостепенный только при условии, что в изучаемых объектах гранаты эклогитовой ассоциации систематически и существенно преобладают над перидотитовыми. Но результаты исследования гранатов как из кимберлитовых объектов ААП [22, 43], так и из шлиховых проб Архангельской области [50, 53] показали, что гранаты перидотитовой ассоциации всегда доминируют.

*1.3. Количество пиропов мегакристиной ассоциации.* Низкохромистые (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> < 4 мас.% [38]) высокотитанистые (TiO<sub>2</sub> > 0,7 мас.%) пиропы мегакристиной ассоциации типичны для всех кимберлитов мира [1] и также рассматриваются как информативный минерал-индикатор кимберлита при поисково-разведочных работах на алмазы [46]. Генезис этого типа гранатов является дискуссионным: кристаллизация непосредственно из кимберлитовой магмы или из астеносферной магмы, близкой по содержаниям элементов-примесей к базальтам океанических островов типа HIMU или пикритами, при высоких *PT*-параметрах в нижних горизонтах литосферной мантии [1].

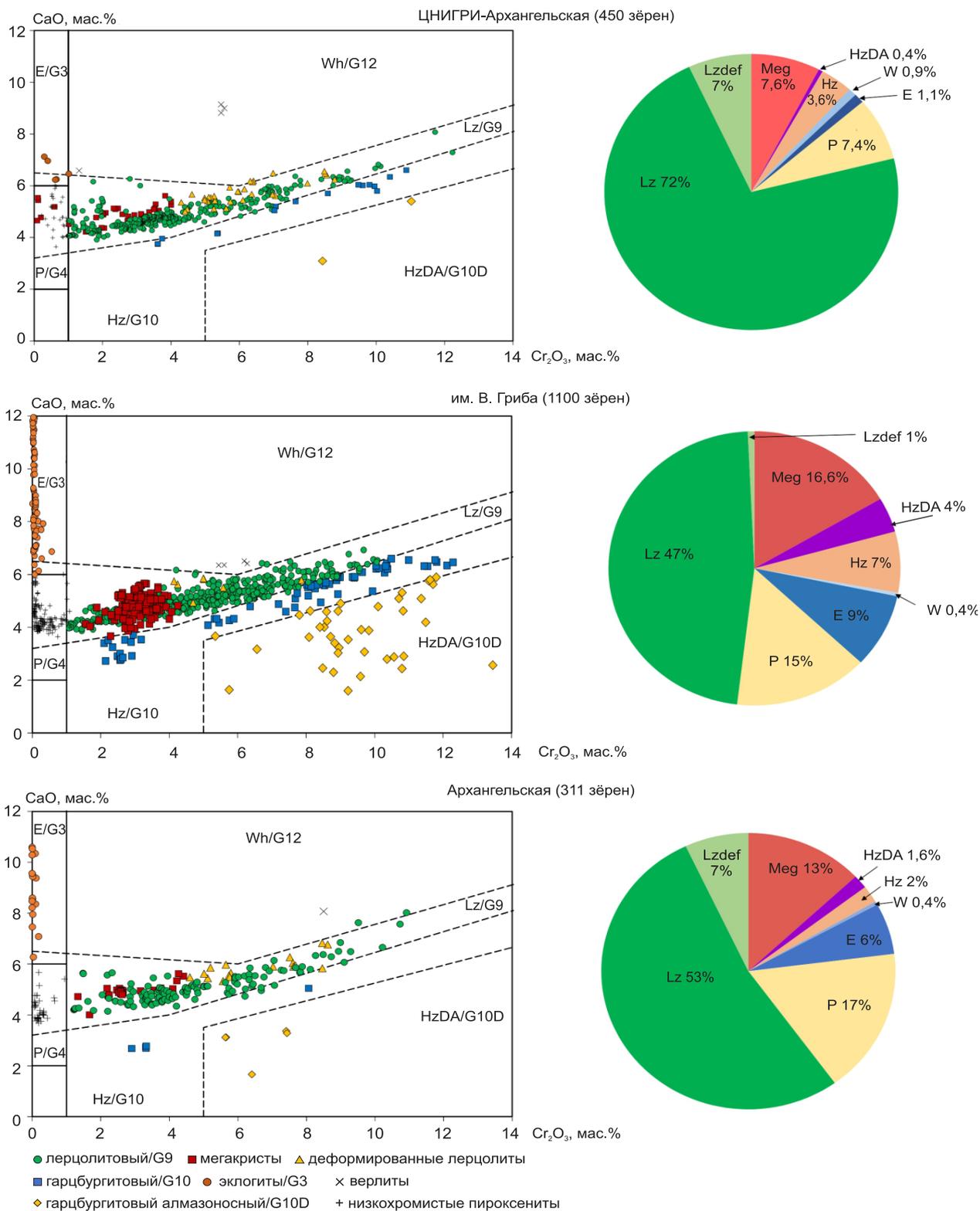


Рис. 1. Распределение  $\text{CaO}/\text{Cr}_2\text{O}_3$  в гранатах из кимберлитовых трубок ЦНИГРИ-Архангельская, им. В. Гриба и Архангельская. Диаграмма [58] с полями для эклогитов и низкохромистых пироксенов из [38]:

парагенезисы гранатов: Lz – лерцолитовый (G9), Lzdef – деформированные лерцолиты, Meg – мегакристы, HzDA – гарцбургитовый алмазной ассоциации (G10D), Hz – гарцбургитовый, W – верлитовый, E – эклогитовый, P – низкохромистый пироксеновый

Тем не менее установлено, что образование мегакристов гранатов происходит при более высоких параметрах  $T$  относительно гранатов из зернистых перидотитов и может быть генетически и пространственно связано с деформированными лерцолитами и эволюцией состава протокимберлитовой магмы [1]. Высокие концентрации  $Y$  и  $Zr$  в гранатах мегакристной ассоциации и их приуроченность к глубинным частям литосферной мантии свидетельствуют о мощной проработке этих участков высокотемпературными силикатными расплавами [37, 54], абсолютно губительно влияющими на сохранность алмазов в период предкимберлитового (кимберлитового) событий. В работе [24] показано, что количество гранатов мегакристной ассоциации отрицательно коррелирует с алмазноностью кимберлитовых трубок Мирнинского поля ЯАП, что позволяет использовать эти данные как дополнительный критерий определения потенциальной алмазноности объектов. Тем не менее, как отмечено в работе [24], крупные по размеру кимберлитовые объекты, такие как трубка Мир, могут выпадать из общего тренда ввиду того, что они были сформированы несколькими порциями кимберлитовой магмы, которые в свою очередь могли опробовать разные по алмазноности и степени метасоматической проработки участки литосферной мантии. Метасоматически обогащённые мантийные породы могут содержать в десять раз больше зёрен гранатов на единицу объёма породы по сравнению с деплетированными. Это приводит к тому, что процентное соотношение гранатов различных парагенезисов может не отражать реального соотношения типов пород литосферной мантии, что и наблюдается в высокоалмазноной трубке Мир, где содержания гранатов алмазной ассоциации составляют только 4 %, а доля мегакристных гранатов достигает 10 % [2, 24].

Для высокоалмазноных кимберлитовых трубок Архангельская и им. В. Гриба ААП установлен высокий процент мегакристов гранатов – 13 и 16,6 % соответственно; это выше, чем для слабоалмазноной трубки Амакинская ЯАП. В слабоалмазноной трубке ЦНИГРИ-Архангельская количество гранатов мегакристной ассоциации составляет 7,6 %, сопоставимое с таковыми для среднеалмазноной трубки Дачная ЯАП [24]. Таким образом, в настоящее время нельзя чётко резюмировать о результативности применения данного метода при оценке потенциальной алмазноности объектов ААП. Более того, положительная корреляция между процентным содержанием мегакристов гранатов и алмазноностью изученных кимберлитов ААП не может быть воспринята как истинная из-за того, что итоговое количество гранатов мегакристной ассоциации для объекта будет напря-

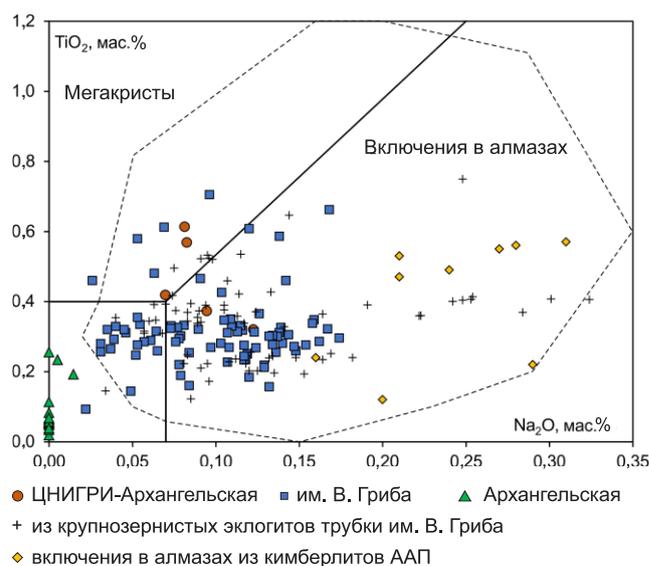


Рис. 2. Распределение  $TiO_2/Na_2O$  в гранатах эклогитовой ассоциации из кимберлитовых трубок ЦНИГРИ-Архангельская, им. В. Гриба и Архангельская. Пунктирная линия – область составов гранатов эклогитового парагенезиса из включений в алмазах мира [30]. Крупнозернистые эклогиты из трубки им. В. Гриба [51]. Включения в алмазах эклогитовой ассоциации из кимберлитов ААП [18]

мую зависеть от выборки зёрен, а именно, от исходного соотношения гранатов различных цветовых групп. Данные по гранатам из кимберлитовой трубки им. В. Гриба [8] показали, что мегакристная ассоциация присутствует только в группах гранатов красного (50 % от общего количества зёрен этого цвета) и красно-оранжевого (39 %) цветов, и отсутствует среди гранатов фиолетового цвета. В любом случае, присутствие значительного количества гранатов мегакристной ассоциации не исключает алмазноность кимберлитовых объектов ААП.

**2. Определение параметров температуры и давления для гранатов.** Определение параметров температуры ( $T$ ) и давления ( $P$ ) для индивидуальных зёрен минералов-индикаторов кимберлита является неотъемлемой методикой при интерпретации потенциальной алмазноности площади или объекта. Эти данные позволяют получить информацию о тепловом режиме литосферной мантии, глубине её нижней границы и мощности «алмазного окна». Хромдиопсид является наиболее информативным в этом плане минералом-индикатором кимберлита, так как существующие термобарометрические методики позволяют определить одновременно параметры  $P$  и  $T$  [45]. Тем не менее критерии этого термобарометра [64] существенно ограничивают количество используемых

зёрен для получения корректных значений. Например, из 800 зёрен ксенокристов хромдиопсида из кимберлита трубки им. В. Гриба составы только 55 зёрен пригодны для использования  $P$ - $T$  расчёта [8]. Для расчёта параметра  $T$  для гранатов используются данные по содержанию Ni, концентрации которого в гранатах зависят от температуры его равновесия с сосуществующим оливином [28, 48]. Параметр  $P$  для гранатов может быть получен путём проецирования полученных значений  $T$  на известную геотерму для литосферной мантии в районе площади или объекта. Если тепловой поток литосферной мантии неизвестен, то для определения  $P$  могут быть использованы барометры, расчёт которых основан на использовании данных по концентрациям Cr в гранате при условии его равновесия с хроми-том [28, 39]. Гистограммы распределения параметра  $T_{Ni}$  для гранатов перидотитовой ассоциации из трубок им. В. Гриба и ЦНИГРИ-Архангельская показаны на рис. 3. Данные для гранатов из трубки Архангельская не показаны из-за критически малого количества ана-

лизов по Ni (50 определений), представленных в работе [43], которые графически несопоставимы с данными для трубок им. В. Гриба (720 анализов) и ЦНИГРИ-Архангельская (400 анализов). Большинство гранатов лерцолитового и гарцбургитового парагенезисов из трубки им. В. Гриба (72 %) соответствует диапазону температур от 850–900 до 1100 °C (интервалу, традиционно считающемуся полем температур, при которых стабилен алмаз [31]), а из трубки ЦНИГРИ-Архангельская – интервалам температур 1100–1200 °C (68 %) и 1200–1300 °C (30 %). Практически все (94 %) гранаты ассоциаций деформированных перидотитов и мегакристов из трубки им. В. Гриба характеризуются параметром  $T$  от 1000 до 1200 °C, из трубки ЦНИГРИ-Архангельская – 1100–1300 °C (89 %), в последнем случае полностью соответствуя интервалу  $T$  для гранатов лерцолитового и гарцбургитового парагенезисов. Мощность теплового потока литосферной мантии в районе трубок Архангельская и им. В. Гриба определена как 35–37 мВ/м<sup>2</sup> [8, 21, 43], зона перехода графит–алмаз предполагается при параметре  $T \sim 900$  °C, что соответствует глубине от 130 км; нижняя граница литосферной мантии может находиться в интервале 210–240 км; мощность «алмазного окна» – от 70 до 110 км (рис. 4). Проецирование значений  $T$  для гранатов из трубки им. В. Гриба на геотерму 37 мВ/м<sup>2</sup> показывает, что 100 % гранатов «алмазной ассоциации» «G10D», 95 % гранатов неалмазносной гарцбургитовой ассоциации «G10» и 90 % гранатов лерцолитового парагенезиса соответствуют полю стабильности алмаза и интервалу глубин 150–210 км. Гранаты лерцолитовой и гарцбургитовой ассоциаций, имеющие значения  $T_{Ni}$  в диапазоне 900–1100 °C, составляют ~ 30–40 % для трубки Архангельская, ~ 50 % для трубки Ломоносова и ~ 70 % для трубки Пионерская [43]. Гранаты абсолютно всех парагенезисов из трубки ЦНИГРИ-Архангельская характеризуются постоянными повышенными концентрациями Ni относительно гранатов из трубок месторождений им. В. Гриба и им. М. В. Ломоносова. Только 1,5 % гранатов лерцолитовой и гарцбургитовой ассоциаций из трубки ЦНИГРИ-Архангельская характеризуются значениями  $T$  в интервале 900–1100 °C, и для 98,5 % зёрен параметры  $T$  варьируют от 1100 до 1300 °C. Такие же высокие значения  $T_{Ni}$  отмечены для некоторых трубок Пачугской группы Кепинского поля ААП [35, 43, 49]. Так как тепловой режим литосферной мантии в районе трубки ЦНИГРИ-Архангельская неизвестен, для определения значений  $P$  для гранатов был использован барометр [39]. Результаты расчёта (рис. 5) показали, что только 4 зерна гранатов имеют параметры  $P$ - $T$ , соответствующие кратонным геотермам; мощность теплового потока

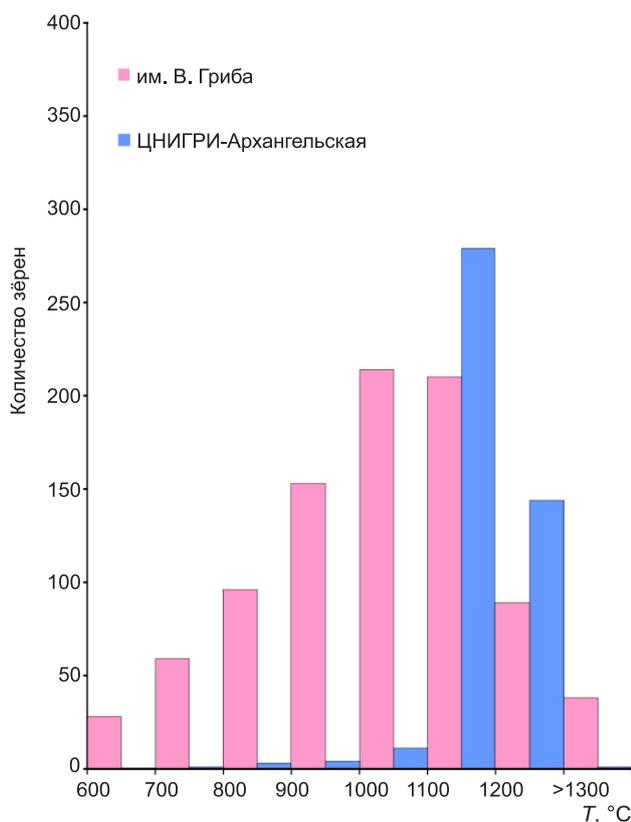


Рис. 3. Гистограммы распределения  $T_{Ni}$  [45] для гранатов перидотитовой ассоциации из кимберлитовых трубок ЦНИГРИ-Архангельская и им. В. Гриба.

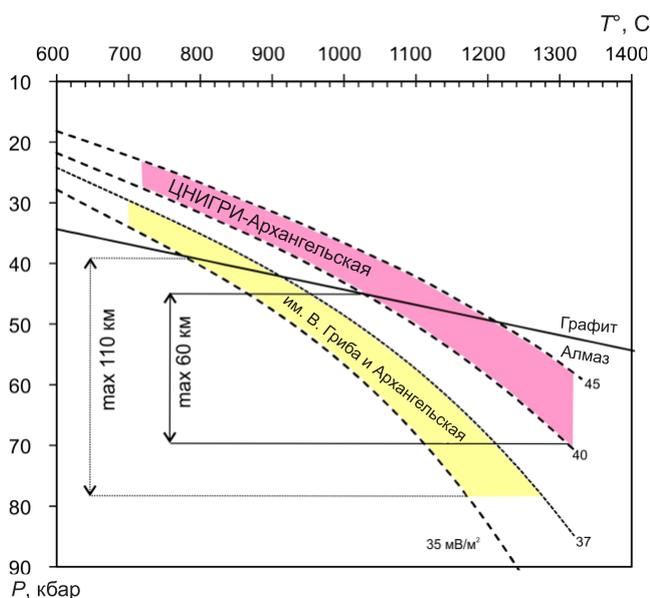


Рис. 4. Предполагаемые зоны опробования участков литосферной мантии в районе кимберлитовых трубок ЦНИГРИ-Архангельская, им. В. Гриба и Архангельская на основании проецирования значений  $T_{Ni}$  [28] на геотермы 35–37 мВ/м<sup>2</sup> для трубок им. В. Гриба и Архангельская и 40–45 мВ/м<sup>2</sup> для трубки ЦНИГРИ-Архангельская:

max – максимально возможные значения для мощности «алмазного окна»

может быть от 40 до 45 мВ/м<sup>2</sup>. Ввиду того, что значения  $P$ , полученные методом [39], должны рассматриваться с крайней осторожностью (пример  $P$ - $T$  расчётов для гранатов из трубки им. В. Гриба, см. рис. 5), для определения возможной мощности теплового потока литосферной мантии в районе трубки ЦНИГРИ-Архангельская может быть использован следующий подход. Если тепловой режим литосферной мантии в районе трубки ЦНИГРИ-Архангельская идентичен таковому в районе трубок месторождений им. В. Гриба и им. М. В. Ломоносова, то проецирование на геотерму 37 мВ/м<sup>2</sup> значений  $T_{Ni}$  для гранатов перидотитовой ассоциации указывает на то, что абсолютно все изученные гранаты соответствуют участку литосферной мантии от 150 до 210 км, то есть полю стабильности алмаза. Так как оливин содержит слабо-варьирующие концентрации Ni [28, 48], повышение содержания Ni в сосуществующих гранатах и как следствие увеличение параметров  $T$  их равновесия должны быть каким-то образом объяснены. Влияние высокотемпературных мантийных расплавов на породы нижней части литосферной мантии может рассматриваться в этом случае как наиболее вероятное событие, особенно учитывая тот факт, что значения

$T_{Ni}$  для гранатов мегакристов идентичны таковым для ассоциации перидотитов. При этом положительные корреляции между содержанием Ni и показателями мантийного метасоматоза на уровне главных элементов, такие как TiO<sub>2</sub>, FeO, или отрицательная корреляция в распределении Ni/mg#, могут ожидать. Однако подобных корреляций не наблюдается: абсолютно все гранаты всех ассоциации при разных составах содержат повышенные концентрации Ni. Таким образом, при проецировании значений  $T_{Ni}$  на геотерму 37 мВ/м<sup>2</sup> ожидается, что все гранаты трубки ЦНИГРИ-Архангельская представляют исключительно шестидесятикилометровый интервал потенциально алмазосной литосферной мантии, породы которой, предположительно, не испытали воздействия высокотемпературного мантийного метасоматоза. В таком случае эти выводы абсолютно не согласуются с фактом низкого содержания алмазов в этой трубке и характеризуются отсутствием объяснения высоких концентраций Ni в гранатах. Более того, достаточно представительное количество изученных гранатов из трубки теоретически предполагает опробование более широкого интервала литосферной мантии. Учитывая более высокие значения  $T_{Ni}$  для гранатов всех ассоциаций, максимальные полученные значения  $P$ , предполагаемый представительный опробованный участок литосферной мантии, низкую алмазосность трубки и отсутствие свидетельств на уровне главных элементов обширного влияния мантийного метасоматоза, мы предполагаем более высокий температурный режим опробованной литосферной мантии от 40 до 45 мВ/м<sup>2</sup>. В этом случае зона перехода графит-алмаз предполагается при параметре  $T \sim 1050$ – $1200$  °C, что соответствует глубине от 140–147 км, а максимальная глубина нижней границы литосферной мантии может находиться в интервале 170–200 км (см. рис. 4). В этом случае изученные гранаты перидотитовой ассоциации могут представлять интервал литосферной мантии от 60–80 до 170–200 км; мощность «алмазного окна» может варьировать от минимальной 22 до максимальной 60 км.

Результаты использования методик определения  $P$ - $T$  параметров для гранатов из кимберлитов ААП показали, что значения  $T_{Ni}$  и определение процентов гранатов, имеющих параметры  $T$  от 900 до 1100 °C, даже без учёта получения данных по  $P$ , согласуются с фактической алмазосностью кимберлитовых трубок. При этом высокие значения  $T_{Ni}$  от 1100 до 1200 °C для большинства гранатов из кимберлитового объекта полностью не исключают алмазосность трубки, но могут быть свидетельством её низкой алмазосности. В любом случае подтверждение алмазосности объекта ААП, даже с учётом

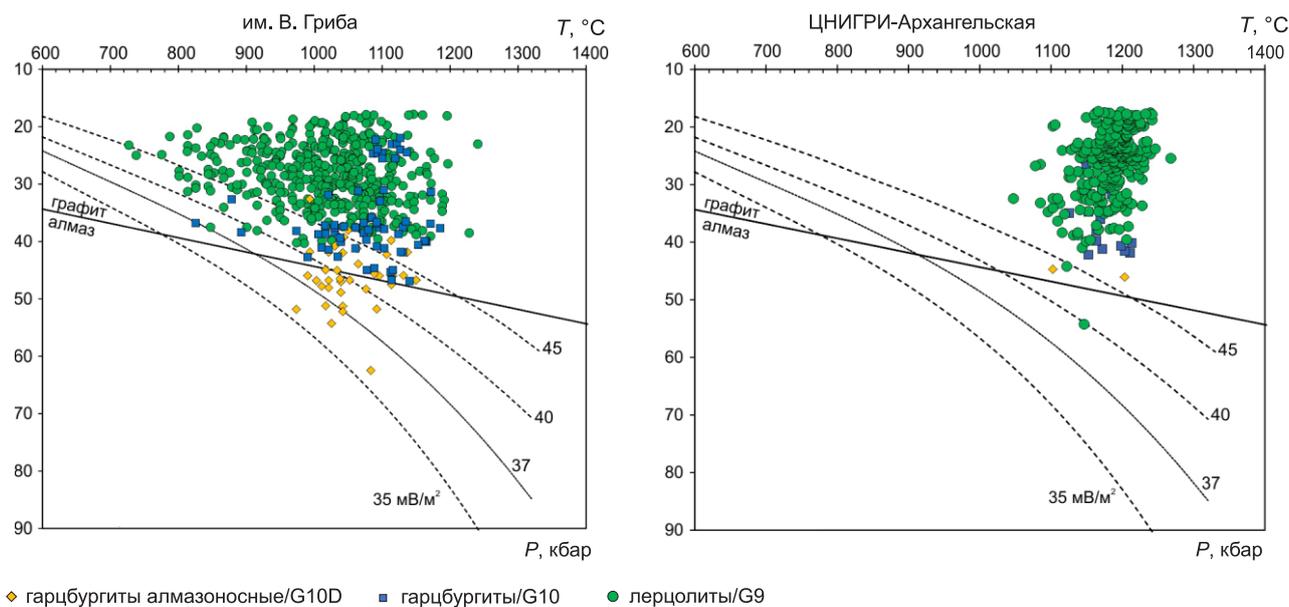


Рис. 5. Результаты расчёта  $P$ - $T$  параметров [39] для пиропов лерцолитового и гарцбургитового парагенезисов для кимберлитовых трубок им. В. Гриба и ЦНИГРИ-Архангельская. Полученные значения указывают на неравновесие пиропов с хромитами для большинства зёрен. Мощности теплового потока [41]

высокого процента гранатов, имеющих параметры  $T_{Ni}$ , соответствующие условиям стабильности алмаза, не может быть окончательным без интерпретации данных по концентрациям редких элементов.

**3. Концентрации Y, Zr и Ti в гранатах.** Данные по концентрациям Y, Zr и Ti в гранатах рекомендуются использовать для определения степени воздействия мантийного метасоматоза на породы литосферной мантии [36, 37]. Считается, что одновременное повышение концентраций Y, Zr и Ti в гранатах является свидетельством высокотемпературного «расплавного» метасоматоза [36, 37]. Увеличение концентраций Zr при слабаварирующихся содержаниях Y – признаком низкотемпературного «флогопитового» [36, 37] или «флюидного» [1, 2, 60] метасоматоза. Ранние работы по изучению включений гранатов в алмазах показали, что эти гранаты преимущественно содержат очень низкие концентрации Y, Zr и Ti [37], соответствующая полю деплетированных пород, не затронутых процессами мантийного метасоматоза. Как правило, составы гранатов ассоциаций мегакристов и деформированных лерцолитов, образование которых происходит в нижних частях литосферной мантии незадолго до этапа кимберлитового магматизма, почти всегда соответствуют тренду высокотемпературного расплавного метасоматоза; эти гранаты также содержат более высокие концентрации Ni [1, 23, 54]. Данный тип метасоматоза

губительно влияет на сохранность алмазов в литосферной мантии, поэтому увеличение его степени воздействия должно отрицательно коррелировать с алмазоносностью [24]. Влияние «флогопитового» метасоматоза идентифицируется в ксенолитах флогопитсодержащих перидотитов, гранаты которых приобретают зональное строение: составы центральных частей гранатов соответствуют гарцбургитовым «G10», а краевые части обогащены CaO, Zr, Y и Ti и соответствуют лерцолитовым «G9» [36, 37]. Влияние этого типа метасоматоза на сохранность алмазов в литосферной мантии точно не установлено [36], но некоторые исследователи полагают, что он также имеет губительное воздействие на них [17]. Использование данных по концентрациям Y, Zr и Ti в гранатах из проб, отобранных с объектов и территорий ААП при поисково-разведочных работах на алмазы, и определения доли гранатов, соответствующих полю стабильности алмаза и не имеющих признаков воздействия «расплавного» и (или) «флогопитового» («флюидного») метасоматоза, предлагается использовать как первостепенный метод при прогнозе потенциальной алмазоносности объектов и выделении приоритетных площадей в регионе [17]. Это предложение обусловлено выводами о том, что породы литосферной мантии в районе слабо- или неалмазоносных объектов ААП были гораздо сильнее подвержены процессам «расплавного» мантийного метасоматоза,

чем в районе высокоалмазоносных трубок [15, 35]. При этом повышение концентраций Zr в гранатах более 70 ppm явно свидетельствует о воздействии процессов мантийного метасоматоза, разрушающих алмазы [17].

На рис. 6, А–В показано распределение Y/Zr в гранатах из кимберлитовых трубок Архангельская, им. В. Гриба и ЦНИГРИ-Архангельская с обозначенными полями, согласно [36, 37]. Полю гранатов из пород, не подвергшихся мантийному метасоматозу, соответствуют 44 % гранатов из трубки Архангельская, 31 % из трубки им. В. Гриба и 65 % из трубки ЦНИГРИ-Архангельская. Доля гранатов с концентрацией Zr > 70 ppm составляет 15 % для трубки Архангельская, 0,8 % – для трубки им. В. Гриба и 8 % – из трубки ЦНИГРИ-Архангельская; при этом от 70 до 100 % гранатов этой категории составляют гранаты ассоциаций мегакристов и деформированных перидотитов. Приведённые данные показывают, что методика выделения доли гранатов, не подвергшихся мантийному метасоматозу, на основании концентраций Y, Zr и Ti и диаграммы, предложенной в работах [36, 37], не может быть использована как приоритетная при оценке потенциальной алмазоносности площади или объекта ААП, так как процентное соотношение гранатов такого типа не коррелирует с реальной алмазоносностью кимберлитов ААП. Это связано с тем, что полю «деплетированных» пород, по классификации [36, 37], могут соответствовать гранаты как с чёткими геохимическими признаками метасоматического обогащения [2, 14, 54], так и гранаты из мантийных пород, образование которых однозначно связано с процессами мантийного метасоматоза. Например, 50 % гранатов из деформированных перидотитов трубки Удачная [23] соответствуют полю «деплетированных» пород, по [36, 37]. Критерий по содержанию Zr > 70 ppm в гранатах для их разделения на подвергшиеся мантийному метасоматозу и не испытавшие его, как предложено в работе [17], также не может быть использован при интерпретации потенциальной алмазоносности, так как такие концентрации идентифицируются в крайне низком и непоказательном количестве гранатов от общей выборки, практически все из которых принадлежат ассоциациям мегакристов и деформированных перидотитов, образование которых априори никак не может быть связано с процессами алмазообразования [24]. Мы, безусловно, согласны с тем, что концентрации Y и Zr в гранатах имеют важное значение при интерпретации потенциальной алмазоносности литосферной мантии и являются индикаторами метасоматических процессов, воздействовавших на её породы, но считаем, что правильная интерпретация этих данных и, как

следствие, корректность выводов о потенциальной алмазоносности площади или объекта могут быть выполнены только с учётом данных по содержанию редкоземельных элементов (РЗЭ) в гранатах и в особенности по соотношению концентраций лёгких (Л) и тяжёлых (Т) РЗЭ и характеру их распределения.

**4. Концентрации и характер распределения редкоземельных элементов в гранатах.** Накопление данных по составам гранатов, представленных в виде включений в алмазах [59, 61], показало, что наряду с низкокальциевыми высокохромистыми пиропами гарцбургитового парагенезиса «G10» пиропы лерцолитовой ассоциации «G9» с содержанием  $Cr_2O_3$  в среднем от 5 до 12 мас.%, реже от 12 до 18 мас.% [61], также являются распространённым типом включений в алмазах. Для некоторых алмазоносных объектов установлено, что категория пиропов «G9» является доминирующей среди гранатов-включений в алмазах, как, например, в кимберлитах Буффало Хиллс, Виктор и Снэп Лэйк в Канаде, трубке № 50 в Китае, и оливиновом лампроите Эллендаль в Австралии [60]. Распределение Y и Zr в пиропе из изученных к настоящему времени включений в алмазах мира [60, 62] показало, что значительная часть (до 20 %) пиропов имеет признаки воздействия высоко- или низкотемпературного мантийного метасоматоза, а в некоторых кимберлитах [60] такие пиропы могут преобладать. Эти данные указывают на то, что процессы алмазообразования в литосферной мантии могут быть связаны не только с сильно-деплетированными породами типа дунит-гарцбургит, но и с менее деплетированными породами лерцолитового типа. Сопоставление данных по концентрациям главных и редких элементов и характеру распределения РЗЭ в пиропе из различных кимберлитовых трубок и шлиховых проб показало наличие закономерности в их составах, интерпретация которых позволила выявлять группы пиропов, образование которых ассоциирует с определёнными процессами в литосферной мантии, связанными в свою очередь с алмазообразованием.

1. Низкокальциевые высокохромистые пиропы гарцбургитового парагенезиса с синусоидальным спектром распределения РЗЭ (Hz) являются типичным типом граната из включений в алмазах [61]. Несмотря на то, что образование таких гранатов до сих пор является дискуссионным, считается, что их обогащение ЛРЗЭ связано с влиянием C–H–O расплава/флюида с высоким значением отношения ЛРЗЭ к ТРЗЭ, состав которого может быть близким к карбонатиту [13, 29, 42, 61, 62]. Доля таких гранатов (рис. 7; здесь и далее по тексту представлен % гранатов от общего количества зёрен перидотитового парагенезиса и ассоциации мегакристов,

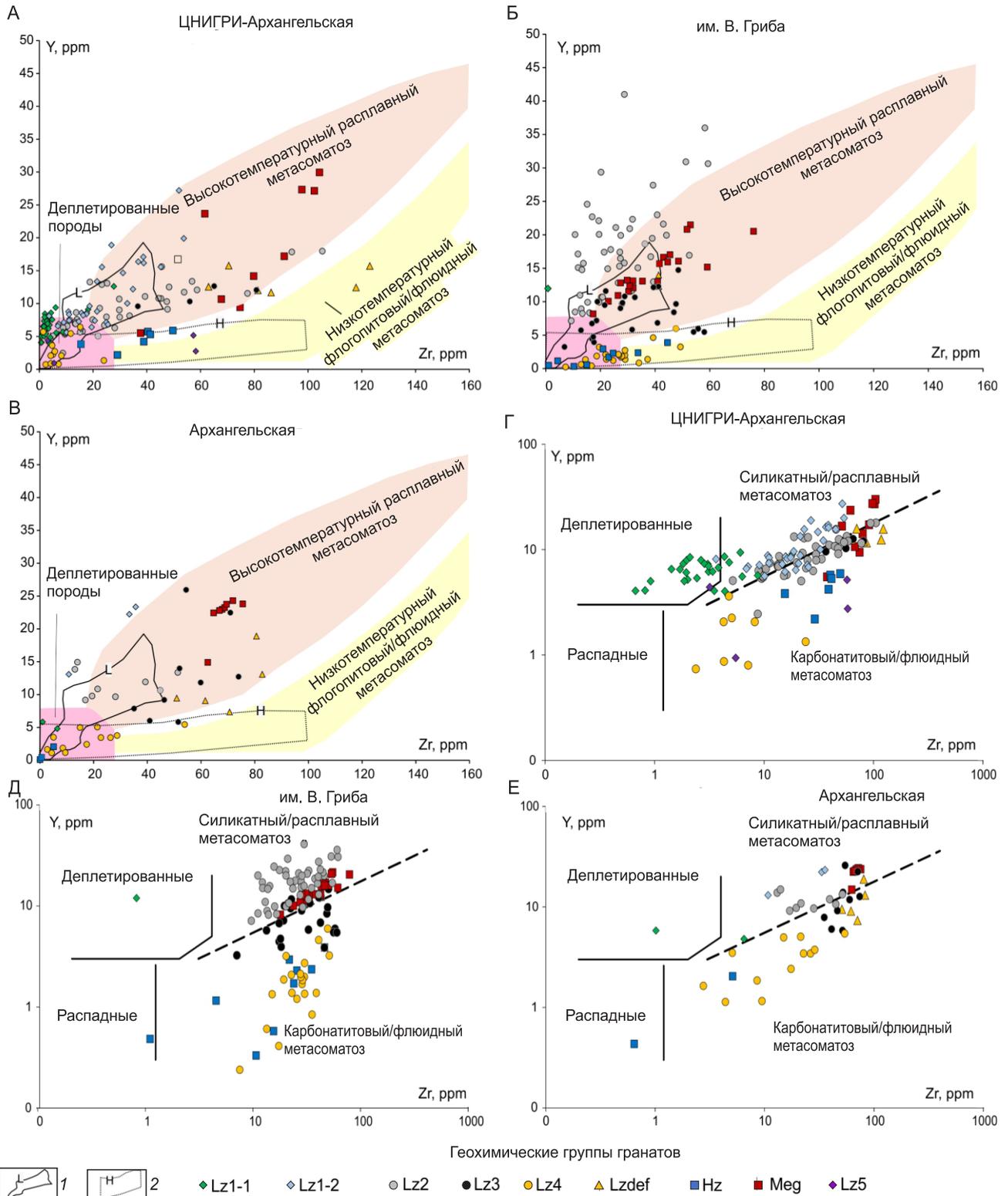


Рис. 6. Концентрации Y и Zr в гранатах ассоциаций перидотитов и мегакристов из кимберлитовых трубок ЦНИГРИ-Архангельская, им. В. Гриба и Архангельская. Данные по включениям в алмазах [60, 61]:

A–B – диаграмма W. L. Griffin et al., 1999 [37], Г–Е – диаграмма А. М. Агашева и др., 2018 [2]; пиропы из включений в алмазах мира: 1 – лерцолитового и 2 – гарцбургитового парагенезисов

проанализированных методом LA-ICP-MS) составляет 4 % для трубки ЦНИГРИ-Архангельская, 7 % для трубки им. В. Гриба [54], 6 % для трубки Архангельская [43].

2. Высокохромистые гранаты лерцолитового парагенезиса с синусоидальным спектром распределения P3Э (Lz4, см. рис. 7) также являются распространённым типом граната из включений в алмазах. Наличие гранатов этого типа свидетельствует о процессах рефертилизации литосферной мантии, выраженных в обогащении гарцбургитовых гранатов СаО при сохранении синусоидального типа распределения P3Э, которые могут происходить под влиянием карбонатитового расплава [13, 42, 54]. Доля гранатов этого типа составляет 8 % для трубки ЦНИГРИ-Архангельская, 16 % для трубки им. В. Гриба, 24 % для трубки Архангельская.

По концентрациям Y и Zr высокохромистые гранаты лерцолитового и гарцбургитового парагенезисов с синусоидальными спектрами распределения P3Э из всех трёх трубок соответствуют по большей части полю деплетированных пород или тренду низкотемпературного метасоматоза по [36, 37] и идентичны таковым из включений в алмазах (см. рис. 6, А–В).

3. Средне-, высокохромистые гранаты лерцолитового парагенезиса с «горбатым» спектром распределения P3Э (Lz3, см. рис. 7) часто встречаются в ксенолитах лерцолитов из кимберлитов мира [2, 32]. Образование таких гранатов связывается с влиянием силикатного расплава, обогащённого LP3Э, состав которого определён как близкий к кимберлиту для трубки Удачная [32] и пикриту для трубки им. В. Гриба [54]. Согласно опубликованным данным, гранаты этого типа не являются широко распространённым типом включения в алмазах, но тем не менее они всё же встречаются [60]. Доля таких гранатов составляет 3 % для трубки ЦНИГРИ-Архангельская, 20 % для трубки им. В. Гриба, 18 % для трубки Архангельская. По распределению Y и Zr (см. рис. 6, А–В) гранаты этой группы соответствуют тренду высокотемпературного мантийного метасоматоза для трубок ЦНИГРИ-Архангельская и Архангельская и перекрывают области деплетированных пород и трендов низко- и высокотемпературного мантийного метасоматоза для трубки им. В. Гриба.

4. Низко-, среднехромистые гранаты лерцолитового парагенезиса с плоским спектром распределения CP3Э-TP3Э (Lz2, см. рис. 7) являются самым распространённым типом граната в ксенолитах лерцолитов из кимберлитов мира и ассоциируют в породах с хромдиоксидом [23, 42]. Такие гранаты могли формироваться под воздействием высокотемпературного силикатного расплава, редкоэлементный

состав которого мог быть близок к базальту [21, 23, 42, 54]. Этот тип мантийного метасоматоза продуцирует самые многочисленные изменения в минералогии и геохимии перидотитов, выраженные в обогащении пород модалным гранатом и клинопироксеном, CP3Э и TP3Э, Y и Zr [23] и губительно влияет на сохранность алмазов [27, 47]. Доля таких гранатов составляет 29 % для трубки ЦНИГРИ-Архангельская, 39 % для трубки им. В. Гриба, 18 % для трубки Архангельская. В гранатах этой группы из всех трёх трубок наблюдается положительная корреляция между Y и Zr в той или иной степени (см. рис. 6, А–В), но Zr/Y отношение в целом выше у гранатов из трубки ЦНИГРИ-Архангельская (Zr/Y = 1–7) по сравнению с таковыми из трубок им. В. Гриба (Zr/Y = 0,5–3) и Архангельская (Zr/Y = 0,9–4). Как правило, в распределении Y/Zr гранаты этого типа соответствуют трендам высокотемпературного метасоматоза [23]. Тем не менее полю деплетированных пород соответствуют 50 % гранатов этой группы из трубки ЦНИГРИ-Архангельская, но лишь единичные зёрна из трубок им. В. Гриба и Архангельская.

5. Низко-, среднехромистые гранаты лерцолитового парагенезиса с фракционированным спектром от CP3Э до TP3Э (Lz1). По концентрациям CP3Э гранаты этого типа представлены двумя подгруппами: с концентрациями CP3Э на уровне хондрита (Lz1–1) и с обогащением в области CP3Э до 2–8 хондритовых единиц (Lz1–2, см. рис. 7). К настоящему времени гранаты этой группы редко задокументированы как составляющие мантийных лерцолитов, а также в виде ксенокристов в кимберлитах и включениях в алмазах. Они обнаружены: в шести лерцолитах из кимберлита им. В. Гриба, в том числе в одном алмазодержащем [21], в мегакристаллах ортопироксена из кимберлитовой трубки Джагерсфонтейн кратона Каапвааль [33], в виде ксенокристов в кимберлите трубки Мир [2] и включения в алмазе из кимберлита Виктор, Канада [60], состав которых эквивалентен гранатам Lz1–1, в виде включения в алмазе из трубки Джагерсфонтейн [63] и в лерцолитах трубки Премьер кратона Каапвааль [34], состав которых эквивалентен гранатам Lz1–2. Гранаты этого типа были также идентифицированы в большом количестве в шлиховых пробах, отобранных на южных территориях Архангельской области [50] и в породах кратерной части магматического объекта KL-01, недавно обнаруженного в пределах ААП и интерпретированного как новая кимберлитовая трубка, алмазность которой не исключена [25]. Гранаты первой подгруппы составляют 19 % для трубки ЦНИГРИ-Архангельская, < 1 % для трубки им. В. Гриба, 4 % для трубки Архангельская. По концентрациям Y и Zr гранаты первой подгруппы соответствуют полю

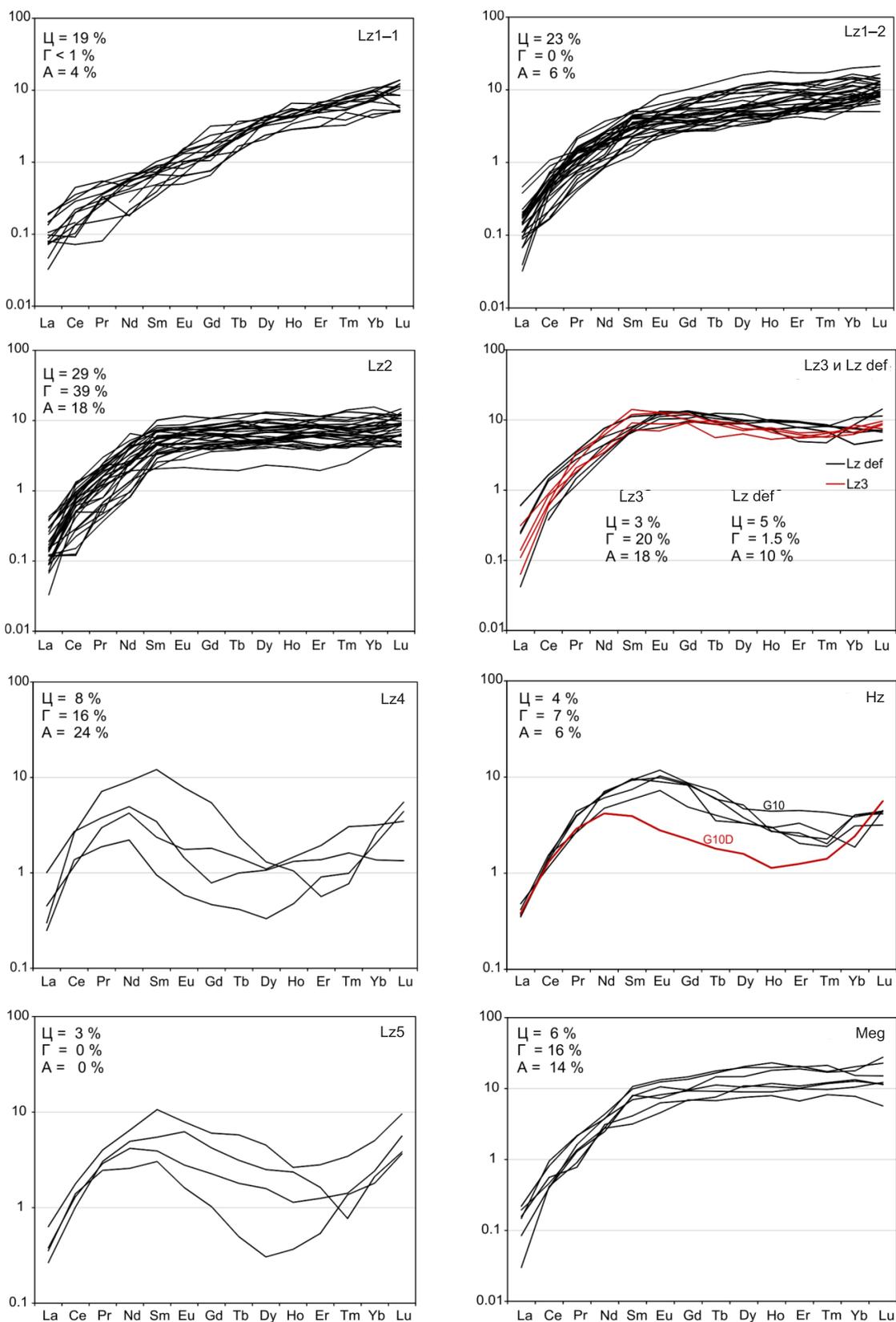


Рис. 7. Нормированные к хондриту [44] концентрации РЗЭ в гранатах из кимберлитовой трубки ЦНИГРИ-Архангельская: на графиках показано процентное количество зёрен каждой геохимической группы от общей суммы зёрен гранатов ассоциаций перидотитов и мегакристов для трубок ЦНИГРИ-Архангельская (Ц), им. В. Гриба (Г) и Архангельская (А)

деплетированных пород (см. рис. 6, А–В); спектры распределения РЗЭ также свидетельствуют о том, что эти гранаты могут представлять собой реститы частичного плавления, но повышенные концентрации  $TiO_2$  (0,07–0,2 мас.%) по сравнению с гранатами, рассматриваемыми как истинно деплетированными ( $TiO_2 < 0,04$  мас.%, по [61]), могут указывать на минимальное воздействие мантийного метасоматоза. Концентрации  $TiO_2$  ( $< 0,25$  мас.%) в этих гранатах соответствуют таковым в гранатах гарцбургитового парагенезиса из включений в алмазах мира [61]. Гранаты второй подгруппы обогащены  $TiO_2$  (0,1–0,5 мас.%), Zr (до 50 ppm) и Y (до 30 ppm). Тем не менее 64 % гранатов этой группы из трубки ЦНИГРИ-Архангельская в распределении Y/Zr соответствуют полю деплетированных пород; 26 % гранатов из трубки ЦНИГРИ-Архангельская и все гранаты из трубки Архангельская характеризуются одновременным увеличением концентраций Y и Zr и соответствуют полю высокотемпературного метасоматоза. В целом гранаты второй подгруппы имеют составы, промежуточные между гранатами первой подгруппы и гранатами с плоским спектром распределения РЗЭ, и могут отражать эволюцию смены составов от деплетированных гранатов с минимальными признаками воздействия мантийного метасоматоза до гранатов, составы которых свидетельствуют об их образовании под воздействием высокотемпературных силикатных расплавов. Доля гранатов второй подгруппы составляет 23 % для трубки ЦНИГРИ-Архангельская и 6 % для трубки Архангельская, в трубке им. В. Гриба такие гранаты не идентифицированы.

6. Низкохромистые гранаты лерцолитового парагенезиса с синусоидальным спектром распределения РЗЭ (Lz5, см. рис. 7) идентифицированы только в трубке ЦНИГРИ-Архангельская в количестве 3 % от общей выборки. Согласно опубликованным данным, такой тип гранатов не был ранее задокументирован для мантийных ксенолитов и ксенокристов для какого-либо кимберлитового объекта, но они обнаружены в большом количестве (19 %) в шлиховых пробах, отобранных с южных территорий Архангельской области [50]. По аналогии с высокохромистыми гранатами лерцолитовой ассоциации с синусоидальными спектрами распределения РЗЭ составы этих гранатов могут также отображать процесс рефертилизации низкохромистой гарцбургит-дунитовой литосферной мантии под влиянием расплава/флюида, обогащённого CaO и ЛРЗЭ [50]. Гранаты этой группы содержат  $TiO_2 < 0,1$  мас.% и в распределении Y/Zr соответствуют полю деплетированных пород или тренду низкотемпературного метасоматоза, соответствуя гранатам группы Lz4 (рис. 6, А–В).

Сопоставление данных по концентрациям главных и редких элементов в гранатах и особенностей спектров распределения РЗЭ позволяет определить для каждой трубки процентное количество гранатов, составы которых указывают на определённые процессы в литосферной мантии, которые могли ассоциировать или нет процессам алмазообразования. Доля гранатов групп Hz + Lz4, составы которых абсолютно соответствуют таковым из включений в алмазах, составляет 12 % для трубки ЦНИГРИ-Архангельская, 23 % для трубки им. В. Гриба, 30 % для трубки Архангельская. Сопоставление этих данных с полученными P-T параметрами для зёрен указывает на то, что 100 % гранатов этой категории из всех трёх трубок соответствуют полю устойчивости алмаза, а полученные значения могут быть интерпретированы как минимальный процентный показатель алмазоносности для данных кимберлитовых объектов. Доля гранатов групп Hz + Lz4 + Lz3 составляет 15 % для трубки ЦНИГРИ-Архангельская, 43 % для трубки им. В. Гриба, 48 % для трубки Архангельская. Полю устойчивости алмаза соответствуют 100 % зёрен из трубок ЦНИГРИ-Архангельская и Архангельская и 94 % зёрен из трубки им. В. Гриба. Таким образом, максимальные значения процентного показателя алмазоносности могут приниматься как 15, 41 и 48 % для трубок ЦНИГРИ-Архангельская, им. В. Гриба и Архангельская соответственно. Гранаты группы Lz1–1 на данном этапе работ не могут рассматриваться как показатели алмазоносности, несмотря на то, что такой тип гранатов обнаружен и в качестве породообразующего минерала алмазоносного лерцолита, и в виде включений в алмазе, а также является представительной популяцией ксенокристов в высокоалмазоносной трубке Мир, так как неизвестно насколько он типичен как включение в алмазах конкретно из объектов ААП из-за отсутствия опубликованных результатов исследований в этом направлении.

В работе [2] была предложена новая генетическая классификация мантийных гранатов, основанная на концентрациях Y и Zr, но одновременно учитывающая и содержания РЗЭ, и особенности их распределения. Согласно [2], процентное количество гранатов, по составу соответствующих полям карбонатного/флюидного метасоматоза и распадного генезиса (рис. 6, Г–Е), можно принимать как усреднённый показатель алмазоносности объекта. Данным полям соответствует 29 % зёрен из трубки ЦНИГРИ-Архангельская, 35 % из трубки им. В. Гриба и 47 % из трубки Архангельская. Полученные значения в целом сопоставимы с таковыми, определёнными методом подсчёта Hz + Lz4 + Lz3 без учёта данных по Y и Zr, для трубок им. В. Гриба и Архангельская,

но, безусловно, завышены для трубки ЦНИГРИ-Архангельская. Это завышение связано прежде всего с тем, что гранаты групп Lz1–2 и Lz2 из трубки ЦНИГРИ-Архангельская систематически менее обогащены Y по сравнению с таковыми из трубки им. В. Гриба. И все же предложенный вариант модифицированной Y-Zr диаграммы для мантийных гранатов может быть использован как дополнительный критерий при оценке потенциальной алмазности площади или объектов ААП.

**Заключение.** Обсуждение различных существующих методов для определения потенциальной алмазности кимберлитовых трубок на основании составов гранатов показало, что сопоставление данных по концентрациям главных элементов, значениям  $T$  и характеру распределению PЗЭ в гранатах перидотитового парагенезиса является наиболее эффективным и достоверным способом определения потенциальной алмазности площади или объекта на территории ААП.

Использование исключительно только данных по процентному содержанию высокохромистых пиропов ассоциации дунит-гарцбургитов («G10D») от общей выборки гранатов приводит к недостоверной оценке потенциальной алмазности объектов ААП, так как, во-первых, процентное содержание гранатов этой категории может не коррелировать с реальной алмазностью кимберлитов ААП, и, во-вторых, алмазность литосферной мантии ААП может быть связана не только с деплетированными породами дунит-гарцбургитового типа, но и с менее деплетированными породами лерцолитового типа, составы гранатов которых соответствуют полю высокохромистых пиропов лерцолитового парагенезиса («G9»).

Отсутствие данных по концентрациям PЭ и характеру распределения спектров PЗЭ в гранатах перидотитовой ассоциации для изучаемого объекта может привести к появлению некорректных выводов о типах метасоматического обогащения пород литосферной мантии, масштабности проявления этих процессов и, как следствие, к неверной идентификации причин слабой (не) алмазности кимберлитовых трубок. Результаты настоящей работы позволили установить, что характер метасоматических преобразований в литосферной мантии в районе высоко- и низкоалмазных кимберлитовых трубок ААП может быть идентичен, а низкая алмазность трубки ЦНИГРИ-Архангельская не связана с масштабным проявлением высокотемпературного расплавленного метасоматоза в подстилающей литосферной мантии, как ранее было определено для некоторых низко (не) алмазных объектов ААП [15, 17, 35, 49]. Породы литосферной мантии в районе трубки ЦНИГРИ-Архангельская находились при более вы-

соких  $T$  параметрах на всём участке литосферной мантии. При этом в нижней части литосферной мантии сохранились потенциально алмазоносные деплетированные породы дунит-гарцбургитового типа с минимальными признаками метасоматического обогащения и породы высокохромистой лерцолитовой ассоциации, образование которых связано с процессами рефертилизации литосферной мантии под влиянием C–H–O расплава/флюида с высоким значением отношения LPЗЭ к TPЗЭ, обогащённого CaO. Но мощность «алмазного окна» под трубкой ЦНИГРИ-Архангельская может варьировать от минимальной 22 км до максимальной 60 км, что гораздо меньше по сравнению с таковой в районах высокоалмазных трубок им. В. Гриба и Архангельская.

Результаты изучения ксенокристов гранатов из кимберлитовых трубок Архангельская и им. В. Гриба позволили установить основные характеристики высокоалмазоносной литосферной мантии ААП, которые в целом типичны и для других объектов, алмазность которых связана с породами перидотитовой ассоциации: 1) «холодный» режим литосферной мантии с мощностью теплового потока 35–37 мВ/м<sup>2</sup>; 2) мощность «алмазного окна» более 60 км; 3) наличие в строении литосферной мантии деплетированных пород гарцбургит-дунитового типа с минимальными признаками метасоматического обогащения и высокохромистых лерцолитов в признаках воздействия C–H–O расплава/флюида с высоким значением отношения LPЗЭ к TPЗЭ, при  $P$ - $T$  параметрах, соответствующих условиям стабильности алмаза. Указателями потенциальной алмазности объекта, которые могут быть получены при интерпретации составов ксенокристов гранатов, являются: 1) преобладающее количество пиропов перидотитовой ассоциации, характеризующихся параметрами  $T_{Ni}$  в диапазоне 900–1100 °С (предварительно, > 60–70 % для кимберлитов Fe-Ti серии и > 30 % для кимберлитов Al-Mg серии); 2) наличие > 20 % (от общего количества зёрен гранатов перидотитовой ассоциации и мегакристов) пиропов групп гарцбургит-дунитов и высокохромистых лерцолитов с синусоидальными спектрами распределения PЗЭ (Hz + Lz4), имеющие  $T_{Ni}$  от 900 до 1100 °С; 3) наличие существенного количества пиропов групп Hz + Lz4 + Lz3 (предварительно, > 40 % от общего количества зёрен гранатов ассоциаций перидотитов и мегакристов).

Результаты изучения ксенокристов гранатов из кимберлита трубки ЦНИГРИ-Архангельская позволяют выделить признаки низкой алмазности объектов ААП, которые могут быть идентифицированы в составах гранатов: 1) практически полное отсутствие (< 2 %) пиропов с параметрами  $T_{Ni} = 900–1100$  °С и преобладание (> 90 %) пиропов, имеющих

значения  $T_{Ni} > 1110$  °С; 2) наличие пиропов, генетически относящихся к гарцбургит-дунитам и высокохромистым лерцолитам с синусоидальными спектрами распределения РЗЭ (Hz + Lz4) в количестве от ~ 10 до 20 % от общего количества зёрен гранатов ассоциаций перидотитов и мегакристов; 3) < 20 % гранатов групп Hz + Lz4 + Lz3. Эти признаки указывают на опробование слабоалмазоносной более прогретой литосферной мантии, мощность потенциально алмазоносных пород которой («алмазного окна») может варьировать от 20 до 60 км.

Полученные данные позволяют предполагать особенности составов пиропов, указывающих на опробование неалмазоносной литосферной мантии ААП: 1) преобладание пиропов с параметрами  $T_{Ni} > 1110$  °С при одновременном отсутствии пиропов групп Hz + Lz4 + Lz3 или существенном преобладании пиропов группы Lz2 при  $T$ , соответствующих полю стабильности алмаза; 2) наличие пиропов с параметрами  $T_{Ni} = 900$ – $1100$  °С, но отсутствие среди них групп Hz + Lz4 + Lz3 или существенном преобладании пиропов группы Lz2.

Результаты настоящего исследования позволяют обозначить комплекс обязательных работ при изучении ксенокристов гранатов, извлечённых из шлиховых проб и магматических объектов, на этапах поисково-разведочных и поисково-оценочных работ на территории Архангельской области:

1) определение концентраций главных элементов методом электронно-зондового анализа и выделение парагенезисов гранатов на основании концентраций CaO и  $Cr_2O_3$  с использованием классификаций [38, 58];

2) определение концентраций Ni в гранатах ассоциаций перидотитов и мегакристов методом электронно-зондового анализа и/или масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой с лазерной абляцией, а также расчёт параметра  $T$  с использованием термометра [28]; определение процентного количества гранатов перидотитовой ассоциации с параметрами  $T$  от 900 до 1100 °С;

3) определение концентраций редких элементов методом масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой с лазерной абляцией в гранатах ассоциаций перидотитов и мегакристов и выделение геохимических групп гранатов Lz1-1, Lz1-2, Lz2, Lz3, Lz4, Lz5, Hz и Meg;

4) определение процентного количества гранатов групп Hz + Lz4 и Hz + Lz4 + Lz3, в том числе количества гранатов этих групп с параметрами  $T$  от 900 до 1100 °С; получение минимальных и максимальных значений показателей алмазоносности.

Использование предложенной методики позволит, с одной стороны, получать адекватную оценку потенциальной алмазоносности интересующих терри-

торий поисков и, с другой стороны, оценивать потенциальную алмазоносность уже обнаруженных объектов для принятия решения на проведение поисково-оценочных работ, что в свою очередь повысит эффективность и результативность геологоразведочных работ на алмазы на территории Архангельской области. Предложенный метод оценки потенциальной алмазоносности может быть также использован при проведении поисковых работ в пределах других алмазоперспективных территорий Российской Федерации.

*Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант № 20–77–10018. Отбор образцов осуществлялся в рамках базового проекта ИГМ СО РАН.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агашев А. М.* Геохимия мегакристаллов граната из кимберлитовой трубки Мир (Якутия) и природа протокимберлитового расплава // Доклады Академии Наук. – 2019. – Т. 486, № 5. – С. 583–587.
2. *Агашев А. М., Серов И. В., Толстов А. В., Щукина Е. В., Рагозин А. Л., Похиленко Н. П.* Новая генетическая классификация гранатов литосферной мантии // Материалы 5-й Всероссийской научно-практической конференции «Эффективность геологоразведочных работ на алмазы: прогнозно-ресурсные, методические и инновационно-технологические направления ее повышения». – Мирный, 2018. – С. 338–342.
3. *Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Похиленко Н. П.* Поисковая минералогия алмазов. – Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2010. – 650 с.
4. *Богатиков О. А., Кононова В. А., Носова А. А., Кондрашов И. А.* Кимберлиты и лампроиты Восточно-Европейской платформы: петрология и геохимия // Петрология. – 2007. – Т. 16, № 4. – С. 339–360.
5. *Васильева Е. Р., Веричев Е. М., Гаранин В. К.* и др. Особенности состава важнейших минералов-индикаторов тяжелой фракции из месторождения алмазов им. В. Гриба (Архангельская алмазоносная провинция) // Известия вузов. Геология и разведка. – 2005. – № 3. – С. 33–41.
6. *Голубев Ю. К., Прусакова Н. А., Голубева Ю. Ю.* Кемпинские кимберлиты, Архангельская область // Руды и металлы. – 2010. – № 1. – С. 38–45.
7. *Голубева Ю. Ю., Щербакова Т. Е., Колесникова Т. И., Хачатрян Г. К.* Особенности вещественного состава кимберлитов трубки ЦНИГРИ-Архангельская (Зимнебережное поле) // Сборник публикаций по результатам I и II ежегодных научных чтений им. Г. П. Кудрявцевой. – 2008. – С. 66–75.
8. *Гудимова А. И., Агашева Е. В.* Состав, строение и термальный режим литосферной мантии в районе высокоалмазоносной кимберлитовой трубки им. В. Гриба

- (Архангельская алмазоносная провинция): на основании данных по химическому составу гранатов и хромдиопсидов // *Материалы 30-й научной конференции Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН «Структура, вещество, история литосферы Тимано-Северорусского сегмента»*. – Сыктывкар, 2021. – С. 49–54.
9. *Каргин А. В.* Полистадийность мантийного метасоматоза при формировании кимберлитовых магм: на примере кимберлитов трубки им. В. Гриба, Архангельская алмазоносная провинция // *Петрология*. – 2021. – Т. 29, № 3. – С. 227–255.
  10. *Кононова В. А., Голубева Ю. Ю., Богатиков О. А., Каргин А. В.* Алмазоносность кимберлитов Зимнебережного поля (Архангельская область) // *Геология рудных месторождений*. – 2007. – Т. 49, № 6. – С. 483–505.
  11. *Королюк В. Н., Лаврентьев Ю. Г., Усова Л. В., Нигматулина Е. Н.* О точности электронно-зондового анализа породообразующих минералов на микроанализаторе JXA-8100 // *Геология и геофизика*. – 2008. – Т. 49 (3). – С. 221–225.
  12. *Лаврентьев Ю. Г., Королюк В. Н., Усова Л. В., Логвинова А. М.* Электронно-зондовое определение примеси никеля в пиропсах для целей геотермометрии перидотитов // *Геология и геофизика*. – 2006. – Т. 47 (10). – С. 1090–1093.
  13. *Похиленко Н. П., Агашев А. М., Литасов К. Д., Похиленко Л. Н.* Взаимоотношение карбонатитового метасоматоза деплетированных перидотитов литосферной мантии с алмазообразованием и карбонатит-кимберлитовым магматизмом // *Геология и геофизика*. – 2015. – Т. 56, № 1–2. – С. 361–383.
  14. *Рагозин А. Л., Агашев А. М., Зедгенизов Д. А., Денисенко А. А.* Эволюция литосферной мантии в районе Накынского кимберлитового поля по данным изучения гранатов из ксенолитов мантийных перидотитов трубок Нюрбинская и Ботубинская // *Геохимия*. – 2021. – Т. 66, № 8. – С. 694–708.
  15. *Саблуков С. М., Саблукова Л. И., Гриффин В. Л.* Распределение редких элементов в глубинных минералах кимберлитов как признак плюмовых процессов на Севере Русской платформы // *Труды IX Международного семинара «Глубинный магматизм, его источники и плюмы»*. – Миасс, Иркутск, 2009. – С. 134–167.
  16. *Саблуков С. М., Саблукова Л. И., Шавырина М. В.* Мантийные ксенолиты из кимберлитовых месторождений округлых алмазов Зимнебережного района, Архангельская алмазоносная провинция // *Петрология*. – 2000. – Т. 8, № 5. – С. 518–548.
  17. *Саблуков С. М., Стегницкий Ю. Б.* Способ выделения приоритетных ореолов рассеяния минералов-спутников алмазоносных кимберлитов // *Роспатент № 2723628*. – 2020.
  18. *Соболев Н. В., Ефимова Э. С., Реймерс Л. Ф., Захарченко О. Д., Махин А. И., Усова Л. В.* Минеральные включения в алмазах Архангельской кимберлитовой провинции // *Геология и геофизика*. – 1997. – Т. 38, № 2. – С. 358–370.
  19. *Устинов В. Н., Неручев С. С., Загайный А. К., Антасук М. Г., Лобкова Л. П., Микоев И. И., Николаева Э. В., О'Брайан Х., Пелтонен П., Пенделяк Р. Н.* Алмазоносность Севера Восточно-Европейской платформы. – Санкт-Петербург: Наука, 2021. – 409 с.
  20. *Хачатрян Г. К.* Азот и водород в кристаллах алмаза в аспекте геолого-генетических и прогнозно-поисковых проблем алмазных месторождений // *Отечественная геология*. – 2013. – № 2. – С. 29–42.
  21. *Щукина Е. В., Агашев А. М., Костровицкий С. И., Похиленко Н. П.* Метасоматические изменения литосферной мантии в районе кимберлитовой трубки им. В. Гриба, Архангельская алмазоносная провинция // *Геология и геофизика*. – 2015. – № 12. – С. 2153–2172.
  22. *Afanasiev V. P., Ashchepkov I. V., Verzhak V. V., O'Brien H. O., Palessky S. V.* PT conditions and trace element variations of picroilmenites and pyropes from placers and kimberlites in the Arkhangelsk region, NW Russia // *J. Asian Earth Sci.* – 2013. – № 70–71. – P. 45–63.
  23. *Agashev A. M., Ionov D. A., Pokhilenko N. P., Golovin A. V., Cherepanova Yu., Sharygin I. S.* Metasomatism in the lithospheric mantle roots: Constraints from WR and minerals chemical composition of deformed peridotite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe // *Lithos.* – 2013. – № 160–161. – P. 201–215.
  24. *Agashev A. M., Nakai S., Serov I. V., Tolstov A. V., Garanin K. V., Kovalchuk O. E.* Geochemistry and origin of the Mirny field kimberlites, Siberia // *Mineralogy and Petrology*. – 2018. – № 112 (Suppl 2). – P. 597–608.
  25. *Agasheva E. V.* Magmatic material in sandstone shows prospects for new diamond deposits within the Northern East European platform // *Minerals*. – 2021. – № 11 (4). – Art. 339.
  26. *Agasheva E. V., Kolesnichenko M. V., Malygina E. V., Agashev A. M., Zedgenizov D. A.* Origin of water in mantle eclogites from the V. Grib kimberlite pipe, NW Russia // *Lithosphere*. – 2021. – 18 p.
  27. *Bataleva Y. V., Palyanov Y. N., Sokol A. G., Borzdov Y. M., Palyanova G. A.* Conditions for the origin of oxidized carbonate-silicate melts: Implications for mantle metasomatism and diamond formation // *Lithos.* – 2012. – № 128–131. – P. 113–125.
  28. *Canil D.* The Ni-in-garnet geothermometer: calibration at natural abundances // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1999. – № 136. – P. 240–246.
  29. *Chepurov A. A., Faryad S. W., Agashev A. M., Strnad L., Jedlicka R., Turkin A. I., Mihajevic M., Lin V. V.* Experimental crystallization of a subcalcic Cr-rich pyrope in the presence of REE-bearing carbonatite // *Chemical Geology*. – 2019. – № 509. – P. 103–114.
  30. *Cookerboo H. O., Grutter H. S.* Mantle-derived indicator mineral compositions as applied to diamond exploration // *Geochemistry exploration environment analyses*. – 2010. – № 10 (1). – P. 81–95.
  31. *Day H. W.* A revised diamond-graphite transition curve // *American Mineralogist*. – 2012. – № 97. – P. 52–62.
  32. *Doucet L. S., Ionov D. A., Golovin A. V.* The origin of coarse garnet peridotites in cratonic lithosphere: New data on xenoliths from the Udachnaya kimberlite, central Siberia // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2013. – № 165. – P. 1225–1242.
  33. *Gibson S. A.* On the nature and origin of garnet in high-refractory Archean lithospheric mantle: Constraints from

- the garnet exsolved in Kaapvaal craton orthopyroxene // *Mineralogical Magazine*. – 2017. – № 81. – P. 781–809.
34. *Gregoire M., Bell D. R., Le Roex A. P.* Garnet Iherzolites from the Kaapvaal craton (South Africa): Trace element evidence for a metasomatic history // *Journal of Petrology*. – 2003. – № 44. – P. 629–657.
  35. *Griffin W. L., O'Reilly S. Y.* Upper mantle composition: tools for smarter diamond exploration // *Mineral deposit research: meeting the global challenge*. – 2005. – P. 7–10.
  36. *Griffin W. L., Ryan C. G.* Trace elements in indicator minerals: area selection and target evaluation in diamond exploration // *Journal of geochemical Exploration*. – 1995. – № 53. – P. 311–337.
  37. *Griffin W. L., Shee S. R., Ryan C. G., Win T. T., Wyatt B. A.* Harzburgite to Iherzolite and back again: metasomatic processes in ultramafic xenoliths from the Wesselton kimberlite, Kimberly, South Africa // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1999. – № 134. – P. 232–250.
  38. *Grütter H. S., Gurney J. J., Menzies A. H., Winter F.* An updated classification scheme for mantle-derived garnet, for use by diamond explorers // *Lithos*. – 2004. – № 77. – P. 841–857.
  39. *Grütter H., Latti D., Menzies A.* Cr-saturation arrays in concentrate from kimberlite and their use in mantle barometry // *Journal of Petrology*. – 2006. – V. 47. – P. 801–820.
  40. *Gurney J. J.* A correlation between garnets and diamonds in kimberlites // *Publications of the Geology Department and University Extension*. – Perth: University of Western Australia, 1984. – P. 143–166.
  41. *Hasterok D., Chapman D. S.* Heat production and geotherms for the continental lithosphere // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2011. – № 307. – P. 59–70.
  42. *Howarth G. H., Barry P. H., Pernet-Fisher J. F., Baziotis I. P., Pokhilenko N. P., Pokhilenko L. N., Bodnar R. J., Taylor L. A., Agashev A. M.* Superplume metasomatism: Evidence from Siberian mantle xenoliths // *Lithos*. – 2014. – № 184–187. – P. 209–224.
  43. *Lehtonen M., O'Brien H., Peltonen P., Kukkonen I., Ustinov V., Verzhak V.* Mantle xenocrysts from the Arkhangelskaya kimberlite (Lomonosov mine, NW Russia): Constraints on the composition and thermal state of the diamondiferous lithospheric mantle // *Lithos*. – 2009. – № 112. – P. 924–933.
  44. *McDonough W. F., Sun S. S.* The composition of the Earth // *Chemical Geology*. – 1995. – № 120. – P. 223–253.
  45. *Nimis P., Taylor W. R.* Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part I. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2000. – № 139. – P. 541–554.
  46. *Nowicki T. E., Moore R. O., Gurney J., Baumgartner M. C.* Diamonds and associated heavy minerals in kimberlite: A review of key concepts and applications // *In Developments in Sedimentology*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. – 2007. – № 58. – P. 1235–1267.
  47. *Rorbach A., Schmidt M. W.* Redox freezing and melting in the Earth's deep mantle resulting from carbon-iron redox coupling // *Nature*. – 2011. – № 472. – P. 209–212.
  48. *Ryan C. G., Griffin W. L., Pearson N. J.* Garnet geotherms: A technique for derivation of *P-T* data from Cr-pyrope garnets // *J. Geophys. Res.* – 1996. – № 101. – P. 5611–5625.
  49. *Sablukova L., Sablukov S., Griffin W. L., O'Reilly S. Y., Win T. T., Grib V.* Lithosphere evolution in the Arkhangelsk kimberlite province. Sixth International Kimberlite Conference Extended Abstracts, 1995. – P. 487–489.
  50. *Shchukina E. V., Agashev A. M., Shchukin V. S.* Diamond-bearing root beneath the northern East European Platform (Arkhangelsk region, Russia): Evidence from Cr-pyrope trace-element geochemistry // *Minerals*. – 2019. – № 9. – Art. 261.
  51. *Shchukina E. V., Agashev A. M., Soloshenko N. G., Streletskaya M. V., Zedgenizov D. A.* Origin of V. Grib pipe eclogites (Arkhangelsk region, NW Russia): Geochemistry, Sm-Nd and Rb-Sr isotopes and relation to regional Precambrian tectonics // *Mineral. Petrol.* – 2019. – № 113. – P. 593–612.
  52. *Shchukina E. V., Agashev A. M., Zedgenizov D. A.* Origin of zircon bearing mantle eclogites entrained in the V. Grib kimberlite (Arkhangelsk region, NW Russia): evidence from mineral geochemistry and the U-Pb and Lu-Hf isotope compositions of zircon // *Mineral Petrol.* – 2018. – № 112 (1). – P. 85–100.
  53. *Shchukina E. V., Shchukin V. S.* Diamond exploration potential of the northern East European Platform // *Minerals*. – 2018. – № 8 (5). – Art. 189.
  54. *Shchukina E. V., Agashev A. M., Pokhilenko N. P.* Metasomatic origin of garnet xenocrysts from the V. Grib kimberlite pipe, Arkhangelsk region, NW Russia // *Geosci. Front.* – 2017. – № 8. – P. 641–651.
  55. *Smit K. V., Shor R.* Geology and development of the Lomonosov diamond deposit, Northwestern Russia // *Gems Gemol.* – 2017. – № 53. – P. 144–167.
  56. *Smith C. B., Gurney J. J., Skinner E. M. W., Clement C. R., Ebrahim N.* Geochemical character of Southern African kimberlites: A new approach on isotopic constraints // *Trans. Geol. Soc. S. Afr.* – 1985. – № 88. – P. 267–280.
  57. *Sobolev N. V., Lavrentev Y. G.* Isomorphic sodium admixture in garnets formed at high pressure // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1971. – № 31. – P. 1–12.
  58. *Sobolev N. V., Lavrentyev Y. G., Pokhilenko N. P., Usova L. V.* Chrome-rich garnets from the kimberlites of Yakutia and their parageneses // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1973. – № 40. – P. 39–52.
  59. *Stachel T., Aulbach S., Brey G. P., Harris J. W., Leost I., Tapper R., Viljoen K. S.* The trace element composition of silicate inclusions in diamonds: a review // *Lithos*. – 2004. – № 77. – P. 1–19.
  60. *Stachel T., Banas A., Aulbach S., Smit K. V., Wescott, P., Chinn I. L., Kong J.* The Victor Mine (Superior Craton, Canada): Neoproterozoic Iherzolitic diamonds from a thermally-modified cratonic root // *Mineral. Petrol.* – 2018. – P. 112 (Suppl. 1). – P. 325–326.
  61. *Stachel T., Harris J. W.* The origin of cratonic diamonds – constraints from mineral inclusions // *Ore Geology Reviews*. – 2008. – V. 34. – P. 5–32.
  62. *Stachel T., Viljoen K. S., Brey G., Harris J. W.* Metasomatic processes in Iherzolitic and harzburgitic domains of diamondiferous lithospheric mantle // *Earth and Planetary Science Letters*. – 1998. – № 159. – P. 1–12.

63. *Tappert R., Stachel T., Harris J. W., Muehlenbachs K., Ludwig T., Brey G. P.* Diamonds from Jagersfontein (South Africa): Messengers from the sublithospheric mantle // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2005. – № 150. – P. 505–522.
64. *Ziberna L., Nimis P., Kuzmin D., Malkovets V. G.* Error sources in single-clinopyroxene thermobarometry and a mantle geotherm for the Novinka kimberlite, Yakutia // *Am. Mineral.* – 2016. – № 101. – P. 2222–2232.
65. *Zinchenko V., Ivanov A., Félix J.* Assessment of kimberlite diamond grade by the indicator minerals chemical composition in Lunda region of Angola // *EGU General Assembly 2021, EGU21-3282*.

## REFERENCES

1. *Agashev A. M.* Geokhimiya megakristallov granata iz kimberlitovoy trubki Mir (Yakutiya) i priroda protokimberlitovogo rasplava [Geochemistry of garnet megacrystals from the Mir kimberlite pipe (Yakutia) and the nature of protokimberlite melt]. *Doklady Akademii Nauk*, 2019, V. 486, No. 5, P. 583–587. (In Russ.)
2. *Agashev A. M., Serov I. V., Tolstov A. V., Shchukina Ye. V., Ragozin A. L., Pokhilenko N. P.* Novaya geneticheskaya klassifikatsiya granatov litosfernoy mantii [New genetic classification of garnets in the lithospheric mantle]. *Materialy 5-y Vserossiyskoy nauchno-prakticheskaya konferentsii “Effektivnost geologorazvedochnykh rabot na almazy: prognozno-resursnyye, metodicheskiye i innovatsionno-tekhnologicheskkiye napravleniya yeye povysheniya”*, Mirnyy, 2018, P. 338–342. (In Russ.)
3. *Afanasyev V. P., Zinchuk N. N., Pokhilenko N. P.* Poiskovaya mineralogiya almazov [Prospecting mineralogy of diamonds]. Novosibirsk, Akademicheskoye izdatelstvo “Geo” publ., 2010, 650 p. (In Russ.)
4. *Bogatikov O. A., Kononova V. A., Nosova A. A., Kondrashov I. A.* Kimberlity i lamproity Vostochno-Yevropeyskoy platformy: petrologiya i geokhimiya [Kimberlites and lamproites of the East European platform: petrology and geochemistry]. *Petrologiya*, 2007, V. 6, No. 4, P. 339–360. (In Russ.)
5. *Vasilyeva Ye. R., Verichev Ye. M., Garanin V. K.* et al. Osobnosti sostava vazhneyshikh mineralov-indikatorov tyazhelyy fraktsii iz mestorozhdeniya almazov im. V. Griba (Arkhangel'skaya almazonosnaya provintsiya) [Features of the composition of the most important minerals-indicators of the heavy fraction from the diamond deposit named after V. Griba (Arkhangelsk diamondiferous province)]. *Izv. vuzov. Geologiya i razvedka*, 2005, No. 3, P. 33–41. (In Russ.)
6. *Golubev Yu. K., Prusakova N. A., Golubeva Yu. Yu.* Kepingimberlity, Arkhangel'skaya oblast [Keping kimberlites, Arkhangelsk region]. *Rudy i metally*, 2010, No. 1, P. 38–45. (In Russ.)
7. *Golubeva Yu. Yu., Shcherbakova T. Ye., Kolesnikova T. I., Khachatryan G. K.* Osobnosti veshchestvennogo sostava kimberlitov trubki Tsnigri-Arkhangel'skaya (Zimnerezhnoye pole) [Features of the material composition of kimberlites of the Tsnigri-Arkhangelskaya pipe (Zimnerezhnoye field)]. *Sbornik publikatsiy po rezultatam I i II yezhegodnykh nauchnykh chteniy im. G. P. Kudryavtsevo*, 2008, P. 66–75. (In Russ.)
8. *Gudimova A. I., Agasheva Ye. V.* Sostav, stroyeniye i termal'nyy rezhim litosfernoy mantii v rayone vysokomalazonosnoy kimberlitovoy trubki im. V. Griba (Arkhangel'skaya almazonosnaya provintsiya): na osnovanii dannykh po khimicheskomu sostavu granatov i khromdiopsidov [Composition, structure and thermal regime of the lithospheric mantle in the area of the highly diamond-bearing kimberlite pipe im. V. Griba (Arkhangelsk diamondiferous province): based on data on the chemical composition of garnets and chromium diopsides]. *Materialy 30-y nauchnoy konferentsii Instituta geologii FITS Komi NTS UrO RAN “Struktura, veshchestvo, istoriya litosfery Timano-Severouralskogo segmenta”*, Syktyvkar, 2021, P. 49–54. (In Russ.)
9. *Kargin A. V.* Polistadiynost mantiynogo metasomatoza pri formirovaniy kimberlitovykh magm: na primere kimberlitov trubki im. V. Griba, Arkhangel'skaya almazonosnaya provintsiya [Multi-stage mantle metasomatism during the formation of kimberlite magmas: on the example of kimberlites of the pipe im. V. Griba, Arkhangelsk diamond province]. *Petrologiya*, 2021, V. 29, No. 3, P. 227–255. (In Russ.)
10. *Kononova V. A., Golubeva Yu. Yu., Bogatikov O. A., Kargin A. V.* Almazonosnost kimberlitov Zimnerezhnogo polya (Arkhangel'skaya oblast) [Diamond potential of kimberlites of the Zimnerezhnoye field (Arkhangelsk region)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 2007, V. 49, No. 6, P. 483–505. (In Russ.)
11. *Korolyuk V. N., Lavrentyev Yu. G., Usova L. V., Nigmatulina Ye. N.* O tochnosti elektronno-zondovogo analiza porodoobrazuyushchikh mineralov na mikroanalizatore JXA-8100 [On the accuracy of electron probe analysis of rock-forming minerals on a JXA-8100 microanalyzer]. *Geologiya i geofizika*, 2008, V. 49 (3), P. 221–225. (In Russ.)
12. *Lavrentyev Yu. G., Korolyuk V. N., Usova L. V., Logvinova A. M.* Elektronno-zondovoye opredeleniye primesi nikelya v piropakh dlya tseyey geotermometrii peridotitov [Electron probe determination of nickel impurity in pyropes for the purpose of peridotite geothermometry]. *Geologiya i geofizika*, 2006, V. 47 (10), P. 1090–1093. (In Russ.)
13. *Pokhilenko N. P., Agashev A. M., Litasov K. D., Pokhilenko L. N.* Vzaimootnosheniye karbonatitovogo metasomatoza depletirovannykh peridotitov litosfernoy mantii s almazobrazovaniyem i karbonatit-kimberlitovym magmatizmom [Relationship of carbonatite metasomatism of depleted peridotites of the lithospheric mantle with diamond formation and carbonatite-kimberlite magmatism]. *Geologiya i geofizika*, 2015, V. 56, No. 1–2, P. 361–383. (In Russ.)
14. *Ragozin A. L., Agashev A. M., Zedgenizov D. A., Denisenko A. G.* Evolyutsiya litosfernoy mantii v rayone Nanykskogo kimberlitovogo polya po dannym izucheniya granatov iz ksenolitov mantiynykh peridotitov trubok

- Nyurbinskaya i Botuobinskaya [Evolution of the lithospheric mantle in the area of the Nakyn kimberlite field according to the study of garnets from xenoliths of mantle peridotites of the Nyurbinskaya and Botuobinskaya pipes]. *Geokhimiya*, 2021, V. 66, No. 8, P. 694–708. (In Russ.)
15. *Sablukov S. M., Sablukova L. I., Griffin V. L.* Raspredele-niye redkikh elementov v glubinykh mineralakh kimberlitov kak priznak pdyumovykh protsessov na Severe Russkoy platformy [Distribution of rare elements in deep-seated kimberlite minerals as a sign of sub-dyom processes in the North of the Russian Platform]. *Trudy IX Mezhdunarodnogo seminar "Glubinnyy magmatizm, yego istochniki i plyumy"*, Miass, Irkutsk, 2009, P. 134–167. (In Russ.)
  16. *Sablukov S. M., Sablukova L. I., Shavyrina M. V.* Mantinyye ksenolity iz kimberlitovykh mestorozhdeniy okruglykhalmazov Zimniberezhnogo rayona, Arkhangel'skaya almazonosnaya provintsiya [Mantle xenoliths from kimberlite deposits of rounded diamonds in the Zimniberezhny region, Arkhangel'sk diamondiferous province] *Petrologiya*, 2000, V. 8, No. 5, P. 518–548. (In Russ.)
  17. *Sablukov S. M., Stegnitskiy Yu. B.* Sposob vydeleniya prioritnykh oreolov rasseyaniya mineralov-sputnikov almazonosnykh kimberlitov [A method for identifying priority dispersion halos of satellite minerals of diamond-bearing kimberlites]. *Rospatent No. 2723628*, 2020. (In Russ.)
  18. *Sobolev N. V., Yefimova E. S., Reymers L. F., Zakharchenko O. D., Makhin A. I., Usova L. V.* Mineralnyye vkluyeniya v almazakh Arkhangel'skoy kimberlitovoy provintsiy [Mineral inclusions in diamonds of the Arkhangel'sk kimberlite province]. *Geologiya i geofizika*, 1997, V. 38, No. 2, P. 358–370. (In Russ.)
  19. *Ustinov V. N., Neruchev S. S., Zagaynyy A. K.* et al. Almazonosnost Severa Vostochno-Yevropeyskoy platformy [Diamond potential in the North of the East European Platform]. *St. Petersburg, Nauka publ.*, 2021, 409 p. (In Russ.)
  20. *Khachatryan G. K.* Azot i vodorod v kristallakh almaza v aspekte geologo-geneticheskikh i prognozno-poiskovykh problem almaznykh mestorozhdeniy [Nitrogen and hydrogen in diamond crystals in the aspect of geological, genetic and forecasting problems of diamond deposits]. *Otechestvennaya geologiya*, 2013, No. 2, P. 29–42. (In Russ.)
  21. *Shchukina Ye. V., Agashev A. M., Kostrovitskiy S. I., Pokhilenko N. P.* Metasomaticheskiye izmeneniya litosfernoy mantii v rayone kimberlitovoy trubki im. V. Griba, Arkhangel'skaya almazonosnaya provintsiya [Metasomatic changes in the lithospheric mantle in the area of the kimberlite pipe im. V. Griba, Arkhangel'sk diamondiferous province]. *Geologiya i geofizika*, 2015, No. 12, P. 2153–2172. (In Russ.)
  22. *Afanasiev V. P., Ashchepkov I. V., Verzhak V. V., O'Brien H. O., Palesky S. V.* PT conditions and trace element variations of picroilmenites and pyropes from placers and kimberlites in the Arkhangel'sk region, NW Russia. *J. Asian Earth Sci.*, 2013, No. 70–71, P. 45–63.
  23. *Agashev A. M., Ionov D. A., Pokhilenko N. P., Golovin A. V., Cherepanova Yu., Sharygin I. S.* Metasomatism in the lithospheric mantle roots: Constraints from WR and minerals chemical composition of deformed peridotite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe. *Lithos*, 2013, No. 160–161, P. 201–215.
  24. *Agashev A. M., Nakai S., Serov I. V., Tolstov A. V., Gararin K. V., Kovalchuk O. E.* Geochemistry and origin of the Mirny field kimberlites, Siberia. *Mineralogy and Petrology*, 2018, No. 112 (Suppl 2), P. 597–608.
  25. *Agasheva E. V.* Magmatic material in sandstone shows prospects for new diamond deposits within the Northern East European platform. *Minerals*, 2021, No. 11 (4), Art. 339.
  26. *Agasheva E. V., Kolesnichenko M. V., Malygina E. V., Agashev A. M., Zedgenizov D. A.* Origin of water in mantle eclogites from the V. Grib kimberlite pipe, NW Russia. *Lithosphere*, 2021, 18 p.
  27. *Bataleva Y. V., Palyanov Y. N., Sokol A. G., Borzdov Y. M., Palyanova G. A.* Conditions for the origin of oxidized carbonate–silicate melts: Implications for mantle metasomatism and diamond formation. *Lithos*, 2012, No. 128–131, P. 113–125.
  28. *Canil D.* The Ni-in-garnet geothermometer: calibration at natural abundances. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1999, No. 136, P. 240–246.
  29. *Chepurov A. A., Faryad S. W., Agashev A. M., Strnad L., Jedlicka R., Turkin A. I., Mihaljevic M., Lin V. V.* Experimental crystallization of a subcalcic Cr-rich pyrope in the presence of REE-bearing carbonatite. *Chem. Geol.*, 2019, No. 509, P. 103–114.
  30. *Cookerboo H. O., Grutter H. S.* Mantle-derived indicator mineral compositions as applied to diamond exploration. *Geochemistry exploration environment analyses*, 2010, No. 10 (1), P. 81–95.
  31. *Day H. W.* A revised diamond-graphite transition curve. *American Mineralogist*, 2012, No. 97, P. 52–62.
  32. *Doucet L. S., Ionov D. A., Golovin A. V.* The origin of coarse garnet peridotites in cratonic lithosphere: New data on xenoliths from the Udachnaya kimberlite, central Siberia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2013, No. 165, P. 1225–1242.
  33. *Gibson S. A.* On the nature and origin of garnet in high-refractory Archean lithospheric mantle: Constraints from the garnet exsolved in Kaapvaal craton orthopyroxene. *Mineralogical Magazine*, 2017, No. 81, P. 781–809.
  34. *Gregoire M., Bell D. R., Le Roex A. P.* Garnet lherzolites from the Kaapvaal craton (South Africa): Trace element evidence for a metasomatic history. *J. Petrol.*, 2003, № 44, P. 629–657.
  35. *Griffin W. L., O'Reilly S. Y.* Upper mantle composition: tools for smarter diamond exploration. *Mineral deposit research: meeting the global challenge*, 2005, P. 7–10.
  36. *Griffin W. L., Ryan C. G.* Trace elements in indicator minerals: area selection and target evaluation in diamond exploration. *Journal of geochemical Exploration*, 1995, No. 53, P. 311–337.
  37. *Griffin W. L., Shee S. R., Ryan C. G., Win T. T., Wyatt B. A.* Harzburgite to lherzolite and back again: metasomatic processes in ultramafic xenoliths from the Wesselton kimberlite, Kimberly, South Africa. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1999, No. 134, P. 232–250.
  38. *Grütter H. S., Gurney J. J., Menzies A. H., Winter F.* An updated classification scheme for mantle-derived garnet,

- for use by diamond explorers. *Lithos*, 2004, No. 77, P. 841–857.
39. *Grutter H., Latti D., Menzies A.* Cr-saturation arrays in concentrate from kimberlite and their use in mantle barometry. *Journal of Petrology*, 2006, V. 47, P. 801–820.
  40. *Gurney J. J.* A correlation between garnets and diamonds in kimberlites. Publications of the Geology Department and University Extension, Perth: University of Western Australia, 1984, P. 143–166.
  41. *Hasterok D., Chapman D. S.* Heat production and geotherms for the continental lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2011, No. 307, P. 59–70.
  42. *Howarth G. H., Barry P. H., Pernet-Fisher J. F., Baziotis I. P., Pokhilenko N. P., Pokhilenko L. N., Bodnar R. J., Taylor L. A., Agashev A. M.* Superplume metasomatism: Evidence from Siberian mantle xenoliths. *Lithos*, 2014, No. 184–187, P. 209–224.
  43. *Lehtonen M., O'Brien H., Peltonen P., Kukkonen I., Ustinov V., Verzhak V.* Mantle xenocrysts from the Arkhangel'skaya kimberlite (Lomonosov mine, NW Russia): Constraints on the composition and thermal state of the diamondiferous lithospheric mantle. *Lithos*, 2009, No. 112, P. 924–933.
  44. *McDonough W. F., Sun S. S.* The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, 1995, No. 120, P. 223–253.
  45. *Nimis P., Taylor W. R.* Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part I. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2000, No. 139, P. 541–554.
  46. *Nowicki T. E., Moore R. O., Gurney J., Baumgartner M. C.* Diamonds and associated heavy minerals in kimberlite: A review of key concepts and applications. In *Developments in Sedimentology*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2007, No. 58, P. 1235–1267.
  47. *Rorbach A., Schmidt M. W.* Redox freezing and melting in the Earth's deep mantle resulting from carbon-iron redox coupling. *Nature*, 2011, No. 472, P. 209–212.
  48. *Ryan C. G., Griffin W. L., Pearson N. J.* Garnet geotherms: A technique for derivation of P-T data from Cr-pyrope garnets. *J. Geophys. Res.*, 1996, No. 101, P. 5611–5625.
  49. *Sablukova L., Sablukov S., Griffin W. L., O'Reilly S. Y., Win T. T., Grib V.* Lithosphere evolution in the Arkhangel'sk kimberlite province. Sixth International Kimberlite Conference Extended Abstracts, 1995, P. 487–489.
  50. *Shchukina E. V., Agashev A. M., Shchukin V. S.* Diamond-bearing root beneath the northern East European Platform (Arkhangel'sk region, Russia): Evidence from Cr-pyrope trace-element geochemistry. *Minerals*, 2019, No. 9, Art. 261.
  51. *Shchukina E. V., Agashev A. M., Soloshenko N. G., Streletskaia M. V., Zedgenizov D. A.* Origin of V. Grib pipe eclogites (Arkhangel'sk region, NW Russia): Geochemistry, Sm-Nd and Rb-Sr isotopes and relation to regional Precambrian tectonics. *Mineral. Petrol.*, 2019, No. 113, P. 593–612.
  52. *Shchukina E. V., Agashev A. M., Zedgenizov D. A.* Origin of zircon bearing mantle eclogites entrained in the V. Grib kimberlite (Arkhangel'sk region, NW Russia): evidence from mineral geochemistry and the U-Pb and Lu-Hf isotope compositions of zircon. *Mineral. Petrol.*, 2018, No. 112 (1), P. 85–100.
  53. *Shchukina E. V., Shchukin V. S.* Diamond exploration potential of the northern East European Platform. *Minerals*, 2018, No. 8 (5), Art. 189.
  54. *Shchukina E. V., Agashev A. M., Pokhilenko N. P.* Metasomatic origin of garnet xenocrysts from the V. Grib kimberlite pipe, Arkhangel'sk region, NW Russia. *Geosci. Front.*, 2017, No. 8, P. 641–651.
  55. *Smit K. V., Shor R.* Geology and development of the Lomonosov diamond deposit, Northwestern Russia. *Gems Gemol.*, 2017, No. 53, P. 144–167.
  56. *Smith C. B., Gurney J. J., Skinner E. M. W., Clement C. R., Ebrahim N.* Geochemical character of Southern African kimberlites: A new approach on isotopic constraints. *Trans. Geol. Soc. S. Afr.*, 1985, No. 88, P. 267–280.
  57. *Sobolev N. V., Lavrentev Y. G.* Isomorphic sodium admixture in garnets formed at high pressure. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1971, No. 31, P. 1–12.
  58. *Sobolev N. V., Lavrentyev Y. G., Pokhilenko N. P., Usova L. V.* Chrome-rich garnets from the kimberlites of Yakutia and their parageneses. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1973, No. 40, P. 39–52.
  59. *Stachel T., Aulbach S., Brey G. P., Harris J. W., Leost I., Tapper R., Viljoen K. S.* The trace element composition of silicate inclusions in diamonds: a review. *Lithos*, 2004, No. 77, P. 1–19.
  60. *Stachel T., Banas A., Aulbach S., Smit K. V., Wescott, P., Chinn I. L., Kong J.* The Victor Mine (Superior Craton, Canada): Neoproterozoic Iherzolitic diamonds from a thermally-modified cratonic root. *Mineral. Petrol.*, 2018, P. 112 (Suppl. 1), P. 325–326.
  61. *Stachel T., Harris J. W.* The origin of cratonic diamonds – constraints from mineral inclusions. *Ore Geology Reviews*, 2008, V. 34, P. 5–32.
  62. *Stachel T., Viljoen K. S., Brey G., Harris J. W.* Metasomatic processes in Iherzolitic and harzburgitic domains of diamondiferous lithospheric mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, No. 159, P. 1–12.
  63. *Tappert R., Stachel T., Harris J. W., Muehlenbachs K., Ludwig T., Brey G. P.* Diamonds from Jagersfontein (South Africa): Messengers from the sublithospheric mantle. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2005, No. 150, P. 505–522.
  64. *Ziberna L., Nimis P., Kuzmin D., Malkovets V. G.* Error sources in single-clinopyroxene thermobarometry and a mantle geotherm for the Novinka kimberlite, Yakutia. *Am. Mineral.*, 2016, No. 101, P. 2222–2232.
  65. *Zinchenko V., Ivanov A., Félix J.* Assessment of kimberlite diamond grade by the indicator minerals chemical composition in Lunda region of Angola. EGU General Assembly 2021, EGU21-3282.

## 90-летие Светланы Васильевны Яблоковой



25 января 2022 года исполнилось 90 лет выдающемуся исследователю самородного золота, лауреату премии Правительства РФ в области науки и техники, ветерану ЦНИГРИ, кандидату геолого-минералогических наук Светлане Васильевне Яблоковой.

Светлана Васильевна принадлежит к когорте пионеров изучения типоморфизма самородного золота в нашей стране, её исследования вслед за классическими работами докторов геолого-минералогических наук Нины Васильевны Петровской и Лидии Александровны Николаевой позволили расширить возможности использования типоморфных признаков в прогнозировании, поисках и оценке коренных и россыпных месторождений золота. Светлана Васильевна Яблокова – уникальный специалист, один из ведущих в своей области, автор и соавтор более 170 работ, в том числе пяти монографий, ряда методических руководств и рекомендаций по проведению минералогических исследований при геолого-разведочных и криминалистических работах.

В далёком 1953 году студентка-дипломница географического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова Светлана Яблокова в составе Ленской экспедиции Научно-исследовательского геологоразведочного института золота (ныне ФГБУ «Центральный научно-исследовательский институт цветных и благородных металлов»)

приняла участие в геоморфологической съёмке долины реки Лены в обрамлении Патомского нагорья. Эта работа в Ленском золотоносном районе, связанная с преодолением многочисленных трудностей, но полная романтики и интереснейших открытий, увлекла её, и Светлана Васильевна связала свою судьбу с институтом НИГРИЗолото – ЦНИГРИ, где работала 65 лет.

Светлана Васильевна Яблокова изучала условия локализации и строения ильменит-циркониевых и золотых россыпей, исследовала рудные и россыпные месторождения многих регионов России, Казахстана, Средней Азии, Америки, Африки. Участвовала в комплексных металлогенических исследованиях, отраслевых программах по прогнозированию, оценке и подсчёту запасов месторождений золота, составлении банков данных по типоморфизму самородного золота и разработке моделей золоторудных месторождений разных типов.

Занимаясь тончайшими исследованиями самородного золота, Светлана Васильевна открыла новый минерал – куранахит. Полученные ею данные о золоте кор выветривания Олимпиадинского и Куранахского месторождений использованы при подсчёте запасов этих всемирно известных золоторудных гигантов.

Почётный разведчик недр Светлана Васильевна Яблокова стала первым исследователем месторождения Глухариный в Магаданской области, открытого благодаря её профессионализму и усилиям. По существу, она – первооткрыватель названного месторождения, хотя этот факт, подтверждённый рядом документов, не закреплён официальным присвоением ей соответствующего почётного звания.

Под её руководством и при её непосредственном участии созданы уникальные банки данных по самородному золоту коренных и россыпных месторождений России и ближнего зарубежья. С. В. Яблоковой совместно с коллегами А. Н. Некрасовой, А. М. Гавриловым и С. А. Миляевым заложено новое научное направление – использование геохимических особенностей золота как прогнозно-поисковых критериев. За участие в составлении Карты экзогенной золото- и платиноносности России С. В. Яблокова удостоена звания лауреата премии Правительства РФ за 2000 г.

Светлана Васильевна Яблокова – один из авторов фундаментального труда «Самородное золото рудных и россыпных месторождений России: атлас». В 2015 году в связи с высокой востребованностью

монографии она была переиздана, но в настоящее время вновь стала библиографической редкостью. Располагая возможностью изучать состав самородного золота с применением современных методов анализа, С. В. Яблокова и её коллеги в последнем издании представили новые данные об элементах-примесях в составе золота.

Светлана Васильевна не останавливается на достигнутом: в 2021 году она совместно с коллегами подготовила к печати уже третье (!) издание Методических рекомендаций для геологоразведочных работ «Типоморфные признаки самородного золота». В настоящее время Светлана Васильевна готовит новые публикации в соавторстве, консультирует коллег в вопросах анализа типоморфных признаков самородного золота, придавая огромное значение сохранению преемственности в этих уникальных исследованиях. Она внесла огромный вклад в воспитание целой плеяды исследователей самородного золота – её ученики работают в России и во многих других странах мира.

Жизнь Светланы Васильевны наполнена интересной разноплановой работой, которая связана не только с развитием науки о рудных и россыпных ме-

сторождениях, но и с сохранением памяти о геологах, трудившихся в 1930–1980-е годы во имя укрепления минерально-сырьевого фундамента страны. В этом отношении её роль бесценна – она вдохновитель и организатор ряда общественно-значимых проектов в её родном институте ЦНИГРИ. Уважение к людям и открытость миру, доброта, отзывчивость, способность к сопереживанию, готовность прийти на помощь ближнему – удивительные качества Светланы Васильевны Яблоковой. Она несёт в себе энергию созидания.

Московская межрегиональная организация «Ветеран-геологоразведчик» присвоила Светлане Васильевне Яблоковой почётное звание «Человек года: ветеран-геологоразведчик России – 2021 г.». А в стенах родного института накануне юбилея состоялась церемония награждения Светланы Васильевны нагрудным знаком «Почётный сотрудник ЦНИГРИ».

*Редколлегия и редакция журнала сердечно поздравляют Светлану Васильевну с юбилеем и желают ей крепкого здоровья, радостного мироощущения, удовлетворения от работы с коллегами и учениками!*

## 80-летие Алексея Гордеевича Волчкова



13 февраля 2022 года отмечает юбилей Заслуженный геолог России, заведующий отделом научно-методического сопровождения геологоразведочных работ ЦНИГРИ Алексей Гордеевич Волчков.

Алексей Гордеевич работает в ЦНИГРИ со времени окончания геологического факультета МГУ в 1966 году. Около пятнадцати лет вёл исследования в областях древнего вулканизма на Южном Урале. В 1976 году защитил диссертацию на звание кандидата геолого-минералогических наук «Палеовулканизм Баймакского района и структурная позиция и золото-колчеданных месторождений (Южный Урал)». В 1982 году возглавил в ЦНИГРИ лабораторию геологии медноколчеданных месторождений, затем лабораторию Урала в составе отдела комплексных исследований разных районов СССР. Под руководством А. Г. Волчкова выполнен ряд обобщающих работ по меденосности и металлогении Уральской провинции, локальному прогнозу и поискам медно-цинковоколчеданных и медно-порфировых месторождений в районах действия горнодобывающих предприятий Южного и Среднего Урала. Он – автор и соавтор прогнозных карт (масштаба 1:10 000–1:50 000) уральских меднорудных районов в Свердловской, Челябинской, Оренбургской областях, Республике Башкортостан. Алексей Гордеевич участво-

вал в подготовке геологических основ для подсчёта запасов таких крупных месторождений, как Юбилейное, Подольское, Сафьяновское. ГРР-методики и руководства по крупномасштабному и локальному прогнозу, поискам и количественной оценке медноколчеданных месторождений, составленные А. Г. Волчковым совместно с коллегами, успешно внедрены в производство.

В 1987 году Алексей Гордеевич Волчков в составе коллектива авторов удостоен премии Министерства геологии СССР за создание первого в отрасли прогнозно-поискового комплекса по поискам скрытых медноколчеданных месторождений. В 1990-е годы под его руководством была создана прогнозно-металлогеническая карта страны (масштаба 1:2 500 000), которая послужила основой для формирования программ геологоразведочных работ на медь, свинец, цинк, никель. Затем им были изучены перспективы выявления месторождений благородных металлов на Полярном Урале и создана прогнозная карта территории ЯНАО в масштабе 1:500 000. Итогом названных проектов, проведённых под началом А. Г. Волчкова, стали оперативное вовлечение ряда важных объектов в недропользование, развитие минерально-сырьевой базы меди и золота на Урале, в Чукотском АО, в других регионах России.

На протяжении двадцати лет Алексей Гордеевич Волчков возглавляет такое ответственное направление работы института как научно-методическое сопровождение и обеспечение геологоразведочных работ, выполняемых за счёт средств федерального бюджета. За минувшие годы почти полностью обновился состав специалистов, начинавших эту деятельность вместе с ним. Но благодаря мудрому руководству, высокой культуре взаимодействия с коллегами, присущей Алексею Гордеевичу, принципы экспертной работы сохраняются. Эта деятельность позволяет выявить рудные объекты, по-настоящему перспективные для разработки недропользователем.

Результаты исследований Алексея Гордеевича Волчкова отражены в более чем в 200 научных работах. Его труд неоднократно отмечен почётными грамотами Минприроды и Роснедр, он награждён нагрудными знаками «Отличник разведки недр» и «Почётный разведчик недр», юбилейной медалью «300 лет Горно-геологической службы России», медалью Ассоциации геологических организаций «За заслуги в разведке недр» 1 степени.

Алексей Гордеевич – хранитель традиций, заложенных его учителями, сотрудниками старшего поколения ЦНИГРИ. Он влюблён в свою профессию,

многие его замечательные стихи посвящены работе геолога. Он делится своими знаниями и опытом с молодыми коллегами, не жалея времени и сил. Истинное удовольствие – слушать в его исполнении песни, любимые несколькими поколениями геологов. И ещё Алексей Гордеевич – автор ряда воспоминаний о знаменитых исследователях рудных ме-

сторождений, частично опубликованных в научно-публицистических изданиях ЦНИГРИ, в журналах «Руды и металлы» и «Отечественная геология».

*Редколлегия и редакция журнала сердечно поздравляют Алексея Гордеевича с юбилеем и желают ему крепкого здоровья, плодотворной работы, новых творческих планов!*



## 75-летие Сергея Сероповича Вартапяна



16 февраля 2022 года исполнилось 75 лет Сергею Сероповичу Вартапяну, Заслуженному геологу России, ветерану ЦНИГРИ, первому руководителю научно-методического сопровождения геологоразведочных работ на твёрдые полезные ископаемые, выполняемых в нашей стране за счёт средств федерального бюджета с 2002 года.

Сергей Серопович Вартапян – выпускник геологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Более полувека работал в ЦНИГРИ, пройдя путь от младшего научного сотрудника до заместителя директора института по научной работе. В 2019–2020 гг. Сергей Серопович был советником генерального директора института.

Научные интересы Сергея Сероповича Вартапяна связаны с исследованиями в области металлогении, прогноза, поисков и оценки золоторудных месторождений. В 1970–1980-х годах судьбоносными для него стали исследования условий локализации золото-серебряных месторождений вулканических поясов Камчатки и Примагаданья – Оганчинского, Агинского, Асачинского, Карамкенского и ряда других. В 1979 г. он защитил диссертацию на звание кандидата геолого-минералогических наук по теме «Закономерности размещения золотосеребряного оруденения Южной Камчатки, связанного с проявлением неогенового магматизма». С. С. Вартапян сформулировал принципы выявления, оконтуривания и прогнозной

оценки разноранговых металлогенических таксонов (рудный район, рудное поле, месторождение) на основе их прогнозно-поисковых моделей. Реализация этих разработок способствовала созданию на востоке России новой минерально-сырьевой базы, интенсивно осваиваемой в наши дни.

В течение ряда лет Сергей Серопович трудился в экспертных группах Министерства геологии СССР, решавших задачи оптимизации геологоразведочных работ на золото и серебро в Закарпатье, Северном Казахстане, Горном Алтае, Примагаданье, на Камчатке, в других регионах страны. Он многое сделал для вовлечения в недропользование вновь выявленных объектов, для развития минерально-сырьевых баз золота на Алтае, в Красноярском крае, Якутии, Магаданской и Сахалинской областях, на Камчатке, Чукотке, др.

В конце XX–начале XXI вв. С. С. Вартапян участвовал в геолого-поисковых работах в Монголии, Никарагуа, Гондурасе, на Аляске (США), проводившихся с применением передовых отечественных научно-прикладных разработок.

Сергей Серопович принял деятельное участие в работе ЦНИГРИ «Экзогенная золотоносность и платиноносность Российской Федерации – комплект карт», высоко оценённой Правительством РФ: в 2001 году авторский коллектив удостоен премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники.

В 2001 году С. С. Вартапян возглавил разработку проекта научно-методического сопровождения и обеспечения геологоразведочных работ в РФ и стал первым руководителем этой работы в нашей стране. Система реализации научно-методических разработок, созданная им совместно с коллегами, способствует укреплению минерально-сырьевых баз действующих предприятий, находящихся в федеральном ведении, и помогает развитию новых минерально-сырьевых баз. Научно-методическое сопровождение ГРР – ключевой блок системы программно-целевого управления воспроизводством отечественной МСБ благородных и цветных металлов. Эта деятельность позволяет обеспечить концентрацию сил и средств федерального бюджета на наиболее приоритетных объектах, расширить инвестиционно привлекательный фонд недропользования в районах с особыми геополитическими интересами России, а также в регионах с напряжённой социально-экономической обстановкой.

Значителен вклад С. С. Вартапяна в укрепление отечественной минерально-сырьевой безопасности России. В 2007 г. он был удостоен звания лауреата

премии Правительства РФ в области науки и техники за научное обоснование, создание и реализацию системы прогноза и воспроизводства МСБ Российской Федерации.

С. С. Вартапяну принадлежит ведущая роль в составлении в первые десятилетия XXI в. оперативных программ федеральных геологоразведочных работ, направленных на воспроизводство МСБ твёрдых полезных ископаемых, программ лицензирования участков недр Российской Федерации. Сергей Серопович участвовал в разработке долгосрочных государственных программ изучения недр и воспроизводства МСБ России.

Результаты исследований Заслуженного геолога РФ С. С. Вартапяна отражены в 90 научных трудах,

в том числе 15 монографиях. Сергей Серопович Вартапян – дважды лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники (2001, 2007), лауреат премии им. А. Н. Косыгина за вклад в оценку отечественной минерально-сырьевой безопасности (2000), награждён нагрудными знаками «Почётный разведчик недр» и «Отличник разведки недр», почётными грамотами Министерства природных ресурсов России и Роснедр.

*Редколлегия и редакция журнала поздравляют Сергея Сероповича с 75-летием и желают ему крепкого здоровья, семейного благополучия, успеха во всех начинаниях!*

## Памяти Евгения Александровича Козловского



1929–2022

20 февраля 2022 года не стало Евгения Александровича Козловского, Министра геологии СССР в 1975–1989 годах, заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, вице-президента РАЕН, крупного учёного, внёсшего огромный вклад в развитие отечественной геологической отрасли. С именем Е. А. Козловского связаны интенсивное развитие минерально-сырьевой базы СССР, геологической науки, масштабный научно-технический прогресс в отрасли и техническое переоснащение геологоразведочного производства.

Е. А. Козловский родился 7 мая 1929 года в селе Довск (в Рогачёвском районе Гомельской области Белоруссии). В годы Великой Отечественной войны был участником партизанского движения, пройдя суровую школу жизни. После окончания в 1948 году Минского артиллерийского училища и в 1953 году Московского геологоразведочного института Е. А. Козловский начал трудовую деятельность в геологических организациях Дальнего Востока. Вскоре он уже руководил геологической партией, а затем – большим коллективом геологов на Дальнем Востоке. С 1965 года Е. А. Козловский продолжил работу в должности начальника технического управления Министерства геологии РСФСР, члена Коллегии Министерства. С приходом Евгения Александровича из-

менилась политика Министерства по отношению к научным исследованиям: разрабатывалась и осуществлялась обширная программа научно-технического прогресса при проведении геологоразведочных работ, освоении новой техники и технологий, организации работ. В 1973 году Козловский возглавил Всесоюзный научно-исследовательский институт экономики минерального сырья и геологоразведочных работ.

Успешно решая производственные и научные проблемы, возглавляя различные крупные институты и подразделения Министерства геологии страны, Е. А. Козловский заслуженно завоевал известность и славу талантливого организатора и в 1975 году был назначен Министром геологии СССР. На период его руководства Министерством приходится крупные открытия многих видов полезных ископаемых, существенно обогативших нашу Родину: минерально-сырьевой потенциал страны вырос в два раза.

Период его руководства Министерством геологии СССР по праву относят к «золотому веку геологии», а Евгения Александровича называют «легендой геологической отрасли». Е. А. Козловский лично принимал участие в открытии месторождений таких важнейших видов минерального сырья, как нефть в Западной Сибири, алмазы близ Архангельска, олово на Дальнем Востоке России. При его участии был основан мощный, хорошо оснащённый флот отрасли, базу которого сформировали на Чёрном море, в Мурманске и Владивостоке.

По инициативе Е. А. Козловского на правительственном уровне была утверждена научно-практическая система исследования недр «Космос – воздух – земля – скважина», которая подняла исследование недр на новый научный уровень. Благодаря применению принципиально новой отечественной технологии, научных методов управления и организации работ оказалась возможной проходка уникальной Кольской сверхглубокой скважины.

В деятельности Е. А. Козловского можно выделить три главных направления: проблемы минерально-сырьевых ресурсов СССР и мира, методика и технология разведки полезных ископаемых, а также геологические проблемы окружающей среды. Е. А. Козловский уделял внимание кардинальным геологическим проблемам – строению, составу и эволюции Земли, комплексному изучению земной коры. Он успешно осуществлял руководство Межведомственным научным советом по проблемам изучения недр Земли и сверхглубокого бурения Государственного комитета по науке и технике СССР.

Е. А. Козловским создана научная школа, положившая начало новым подходам к системам управления, в том числе технологическим процессам в разведке месторождений на основе геолого-экономического моделирования. Этим вопросам посвящены монографии: «Кибернетические системы в разведочном бурении» (1985), «Геолого-экономическая модель: новые принципы разведки и организации работ» (1989), «Управление геологоразведочным производством», «Кибернетический аспект» (1990) и другие. Е. А. Козловский являлся научным руководителем международного проекта ЮНЕП–Юнеско–СССР «Охрана литосферы как компоненты окружающей среды». Под его руководством подготовлена двухтомная монография «Гидрогеологические основы охраны подземных вод», в составлении которой принимали участие учёные СССР, Франции, США, Чехословакии, Венгрии, Греции и Нидерландов.

Будучи президентом XXVII сессии Международного геологического конгресса (МГК), профессор Е. А. Козловский провёл огромную работу по подготовке и проведению крупнейшего форума геологов мира. Организация этого конгресса получила высочайшую оценку советских и зарубежных участников, и, по их мнению, ни один последующий конгресс не смог достичь уровня XXVII МГК.

Многие годы Евгений Александрович осуществлял большую научно-редакторскую деятельность, он являлся главным редактором многотомного издания «Геология СССР», «Горная энциклопедия» (в 5 томах), монографии «Кольская сверхглубокая», «Геологическое строение СССР и закономерности размещения полезных ископаемых», «Справочника инженера по разведочному бурению», а также первооткрывателем ряда месторождений, автором свыше 40 открытий и изобретений.

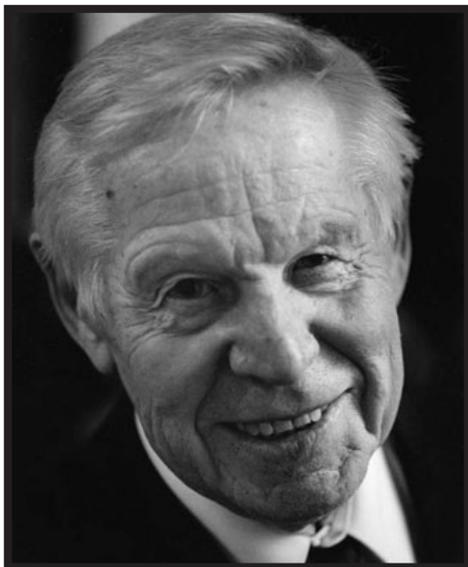
Е. А. Козловский активно участвовал в научно-практической деятельности, будучи председателем, заместителем председателя и членом ряда научных советов и комиссий Президиума Совета Министров СССР, Государственного комитета по науке и технике, Академии наук СССР, Академии народного хозяйства СССР, учёных советов Московского геологоразведочного института, Санкт-Петербургского горного института, Президиума Госсовета РФ и Правительства России.

За большой вклад в развитие минерально-сырьевой базы страны Е. А. Козловский удостоен звания Героя Социалистического Труда, лауреата Ленинской (1964) и Государственных премий РФ (1998, 2002), почётных званий «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР», «Заслуженный геолог России», а также званий «Почётный разведчик недр», «Почётный нефтяник», «Почётный работник газовой промышленности», «Почётный работник угольной промышленности». Он награждён двумя орденами Ленина, орденами Трудового Красного Знамени, «Знак Почёта», «За заслуги перед Отечеством» III и IV степени, знаком «Шахтёрская слава» трёх степеней. Е. А. Козловский избирался депутатом Верховного Совета СССР (1976–1989), кандидатом в члены ЦК КПСС (1976–1989), членом ЦК профсоюза рабочих геологоразведочных работ.

Евгений Александрович Козловский входит в плеяду выдающихся геологов России и навсегда останется в истории российской геологии. Его высокий авторитет в геологии и в обществе основан на огромном жизненном опыте, объективности, честности и смелости суждений, твёрдой гражданской позиции, бескорыстном служении Родине. Его кончина – огромная утрата для всей страны.

*Учёный совет ЦНИГРИ  
Редколлегия журнала*

## Памяти Дмитрия Васильевича Рундквиста



1930–2022

15 января 2022 года скончался Дмитрий Васильевич Рундквист, выдающийся советский и российский учёный-геолог, минералог и металлогенист, доктор геолого-минералогических наук, профессор, президент Российского минералогического общества (1987–2015 гг.), академик Российской академии наук, действительный член Академии горных наук.

Д. В. Рундквист родился 10 августа 1930 году в г. Ленинграде в семье известного специалиста в области обогащения полезных ископаемых, одного из основателей института «Механобр», профессора Рундквиста Василия Александровича.

В 1953 году Дмитрий Васильевич с отличием окончил геологоразведочный факультет Ленинградского горного института им. Г. В. Плеханова, в этом же году был зачислен в аспирантуру Горного института при кафедре минералогии. Параллельно с аспирантурой Д. В. Рундквист работал во Всесоюзном научно-исследовательском геологическом институте (ВСЕГЕИ), занимаясь выявлением закономерностей размещения оловорудных близповерхностных месторождений. В 1957 году защитил диссертацию «Минералогия Хинганского оловорудного месторождения», представленную на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук. Продолжая работать во ВСЕГЕИ, Д. В. Рундквист проводил научные

изыскания по рудным формациям в различных регионах страны, включая Урал, Центральный Казахстан, Забайкалье, Дальний Восток. После блестящей защиты в 1968 году диссертационной работы «Онтогенез и филогенез грейзеновых месторождений» ему была присуждена учёная степень доктора геолого-минералогических наук.

В 1969 году Д. В. Рундквиста назначили заместителем директора по научной работе ВСЕГЕИ. На этом посту он беспрерывно проработал в течение 15 лет, проявляя большие организаторские способности, талант крупного исследователя. В период 1984–1990 гг. он возглавлял Институт геологии и геохронологии докембрия АН СССР и этом же институте до 1993 года руководил лабораторией металлогении.

В 1984 году Д. В. Рундквиста избрали членом-корреспондентом АН СССР по Отделению геологии, геофизики и геохимии, а в декабре 1990 года за выдающиеся научные достижения и большие потенциальные творческие возможности общее собрание Академии наук СССР избрало Дмитрия Васильевича в состав действительных членов по отделению геологии, геофизики, геохимии и горных наук. Он стал единственным академиком по специальности «металлогения» в составе Академии наук СССР. В 1993 году Д. В. Рундквиста назначили директором Государственного геологического музея им. В. И. Вернадского РАН. Его энергичные действия дали новую жизнь одному из старейших уникальных естественно-исторических музеев России.

В 1993 году Д. В. Рундквиста избрали заместителем академика-секретаря Отделения геологии, геофизики, геохимии и горных наук Российской академии наук (ОГГГН РАН). А с 1996 по 2003 гг. он – академик-секретарь Отделения наук о Земле РАН, Советник РАН, член Президиума РАН, руководитель международных проектов Комиссии по геологической карте Мира «Атлас металлогенической зональности докембрия Мира», «Крупнейшие рудные месторождения Мира», заместитель главного редактора журнала «Геология рудных месторождений», член подкомиссии по металлогеническим картам мира Международного союза геологических наук.

Основные направления научных интересов – геология рудных месторождений, глобальная и региональная металлогения, минералогия, петрография, геодинамика и сейсмоструктура. Дмитрий Васильевич изучал зональность месторождений олова, вольфрама, молибдена, никеля, меди, рудоносность метасоматически изменённых пород, гранитоидный магматизм и сопутствующее ему оруденение. Значительное

место в его научной деятельности занимали формационный анализ горных пород и руд, а также его применение при металлогенических исследованиях и прогнозной оценке территории СССР. Опубликовал ряд работ по истории геологических наук и анализу достижений выдающихся отечественных геологов.

Под руководством Д. В. Рундквиста и при его участии были изданы капитальные монографии «Зональность эндогенных рудных месторождений» (1975), «Критерии прогнозной оценки территорий на твёрдые полезные ископаемые» (1978), «Рудоносность и формации структур земной коры» (1981), серия книг «Принципы и методы оценки рудоносности геологических формаций» (1983–1986), монографии «Докембрийская геология СССР» (1988), «Месторождения полезных ископаемых докембрия СССР» (1991), «Основы металлогенического анализа при геологическом картировании докембрия» (1995), трёхтомное издание «Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых» (2006).

Д. В. Рундквист внёс значительный вклад в создание региональных металлогенических карт. Начиная с 1984 года на основе формационного анализа были созданы карты «Металлогения СССР» (16 карт

регионов) и серия карт «Прогнозная оценка территории на комплекс полезных ископаемых», охвативших всю территорию СССР. В 1986–1991 гг. был главным редактором «Атласа металлогенических карт СССР», с 2000 г. вёл большую работу по изучению закономерностей размещения и особенностей крупных рудных месторождений.

Д. В. Рундквист награждён Орденом Почёта, Орденами «За заслуги перед Отечеством» IV степени, «Заслуженный геолог РСФСР». Он является лауреатом Государственной премии СССР, Государственной премии РФ в области науки и техники, Демидовской премии Научного Демидовского фонда, а также офицером Ордена Академических пальм (Франция) и Почётным членом Международной ассоциации по генезису рудных месторождений (IAGOD). Д. В. Рундквист был первым вице-президентом и президентом Российского минералогического общества, вице-президентом Российского геологического общества.

Память об этом замечательном человеке и выдающемся учёном навсегда останется в наших сердцах и на страницах всемирной истории и геологии.

*Редколлегия журнала  
Редакция.*

# III

**МОЛОДЕЖНАЯ  
НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ ЦНИГРИ**

**11–12  
апреля**

Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов

## **ОТ ПРОГНОЗА К ДОБЫЧЕ**

Организатор конференции – ФГБУ «ЦНИГРИ».

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

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

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

### **НАПРАВЛЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ**



Металлогения, минерагения и рудогенез



Прогноз, поиски, оценка и разведка месторождений полезных ископаемых



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



Методы изучения вещественного состава пород и руд



Физико-химические условия минералообразования



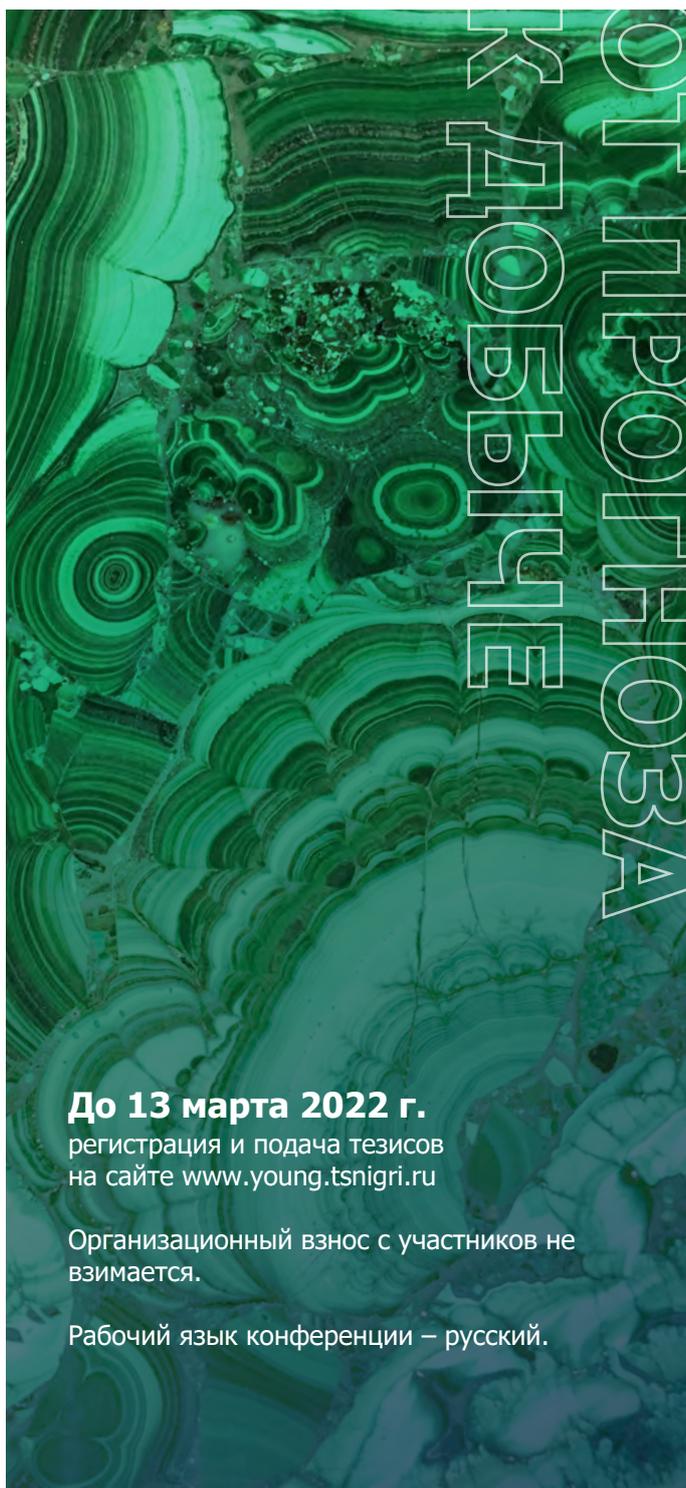
Геолого-экономическая оценка месторождений полезных ископаемых и участков недр



Использование геоинформационных технологий и пространственных данных в геологической отрасли



Современные технологии добычи и переработки минерального сырья



**До 13 марта 2022 г.**

регистрация и подача тезисов  
на сайте [www.young.tsnigri.ru](http://www.young.tsnigri.ru)

Организационный взнос с участников не  
взимается.

Рабочий язык конференции – русский.



[antonetc@tsnigri.ru](mailto:antonetc@tsnigri.ru)  
[www.young.tsnigri.ru](http://www.young.tsnigri.ru)



8(495) 315-26-01, секретарь конференции  
Анастасия Владимировна Антонец



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

# XI МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



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

12–15  
АПРЕЛЯ  
2022

МОСКВА  ЦНИГРИ

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

Программа конференции включает пленарное заседание, устные и стендовые доклады на тематических секциях, а также полевую экскурсию на полевометаллические и золоторудные месторождения Рудного Алтая.

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

**Официальные языки конференции – русский и английский**

**Организационный взнос с участников не взимается.**

**Участие в экскурсиях платное.**

**Окончания приёма заявок и оплаты участия в полевых экскурсиях – 1 марта 2022 г.**

## ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

- Минералогия АБЦМ
- Приоритетные направления прогнозно-поисковых работ на АБЦМ
- Перспективные объекты для постановки геологоразведочных работ на АБЦМ различных стадий
- Опыт проведения и результаты геологоразведочных работ на АБЦМ
- Научно-методические основы комплексирования геологических, геохимических, геофизических методов прогноза, поисков, оценки и разведки
- Использование комплексных моделей месторождений для целей прогноза, поисков, оценки и разведки АБЦМ
- Разработка и реализация инновационных методов, методик и технологий ГРП



conference@tsnigri.ru  
www.conference.tsnigri.ru



8(495) 315-26-83, ученый секретарь  
Ирина Геннадьевна Третьякова



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

## Требования к авторам статей

1. Рукопись представляется с установленными сопровождающими документами: письмом (разрешением на опубликование) руководителя учреждения и экспертным заключением о возможности публикации в открытой печати. В конце статьи ставятся подписи всех авторов. В том случае, если автор не один, надо указать фамилию автора, с которым будет вестись переписка.

2. К материалам, направляемым в редакцию, должна быть приложена справка об авторе (авторах) с указанием: фамилии, имя, отчества, ученой степени, звания, должности, места работы, адреса для переписки (почтового), телефона, e-mail каждого автора.

3. Научные статьи, поступившие в редакцию, подлежат обязательному рецензированию с целью их экспертной оценки. В случае отклонения статьи (отрицательная рецензия) редакция направляет авторам рецензию или мотивированный отказ за подписью главного редактора; редколлегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных статей; статьи, отклоненные редколлекцией, повторно не рассматриваются.

4. В журнале не публикуются статьи, излагающие обобщения и предположения, не вытекающие из публикуемого оригинального фактического материала; серийные и излагающие отдельные этапы исследований.

5. Объем статьи не должен превышать 20 страниц, включая таблицы и список литературы. Следует выставлять поля: сверху (2 см), снизу (2 см), справа (1 см) и слева (3 см). Все страницы рукописи нумеруются. Текст предоставляется в формате MS Word (\*.doc) с использованием шрифта Times New Roman (размер 12, полуторный межстрочный интервал). В отдельные файлы помещаются статья, таблицы. Возможна передача статей по электронной почте: ogeo@tsnigri.ru

6. Для набора математических формул и химических символов рекомендуется использовать Microsoft Equation 2.0.

7. Список литературы дается сквозной нумерацией в алфавитном порядке. Иностранная литература помещается после отечественной. Ссылки в тексте на источник из списка литературы приводятся соответствующим порядковым номером в квадратных скобках. В список не включаются неопубликованные работы.

8. Рисунки и другие графические материалы (не более 7) представляются в цветном или черно-белом варианте. Размер оригиналов рисунков не должен превышать формата страницы журнала (170×237 мм). Каждый рисунок помещается в отдельный файл в одном из следующих форматов: графический редактор Corel Draw, JPEG, TIFF (только для фото), диаграмма Microsoft Excel. Графика должна быть связана с текстом и способствовать его сокращению. Оформление и содержание иллюстративного материала должны обеспечивать его читаемость после возможного уменьшения. Ксерокопии и сканированные ксерокопии не принимаются. Подрисуночные подписи печатаются на отдельной странице (текстовый файл, после списка литературы). Рисунки, не удовлетворяющие требованиям редакции, возвращаются автору.

9. Редакция оставляет за собой право сокращать и редактировать название статьи, текст, рисунки.

10. Статьи, превышающие установленный объем или не отвечающие данным требованиям, возвращаются автору.