РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК: 546.59

ИССЛЕДОВАНИЕ БЛАГОРОДНОМЕТАЛЬНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ОМЧАКСКОГО РУДНОРОССЫПНОГО УЗЛА НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ «ПАВЛИК» (МАГАДАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

© Ю.А. Кузнецов[1], В.А. Лукьяненко[1,2], А.Т. Попова[1,2], С.Д. Варфоломеев[2], А.А. Мальцев[2], В.Н. Калиниченко[2], В.А. Наумов[3], А.А. Дубков[4], А.В. Жабин[5]

1 – ООО «РГ Иркутскгеофизика - 3», г. Иркутск
2 – ИБХФ РАН, г. Москва
3 – ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург
4 – ФГБУ «ВНИГНИ», г. Москва
5 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж

DOI:10.24412/1997-8316-2025-120-4-19

Аннотация: методами оптической и электронной микроскопии под контролем рентгеноструктурного анализа исследованы геохимический и минеральный состав с параллельным морфологическим изучением благороднометальной минерализации углеродистых кристаллических сланцев и их концентратов месторождения Павлик. В металлогеническом отношении месторождения Омчакского руднороссыпного узла относятся к пирит-арсенопиритовому типу золотокварцевой малосульфидной формации, локализованной в зоне хлорит-серицитовой субфации зеленосланцевой фации метаморфизма. Исходя из установленного минерального состава микрочастиц благородных элементов в «упорных» рудах сделаны выводы о недостаточной эффективности применяемых технологических схем извлечения благородных элементов.

Ключевые слова: Омчакский руднороссыпной узел, Магаданская область, месторождения Павлик, Наталка, Омчак, микро- и наночастицы благородных металлов.

E–mail: zhabin01@gmail.com

STUDY OF PRECIOUS METAL MINERALIZATION IN THE OMCHAK ORE-AND-PLACER CLUSTER: A CASE STUDY OF THE PAVLIK DEPOSIT (MAGADAN REGION)

© Yu. Kuznetsov[1], V. Lukyanenko[1,2], A. Popova[1,2], S. Varfolomeev[2], A. Maltsev[2], V. Kalinichenko[2], V. Naumov[3], A. Dubkov[4], A. Zhabin[5]

1 – RG Irkutskgeophysics - 3 LLC, Irkutsk
2 – IBChF RAS, Moscow
3 – IGG UB RAS, Yekaterinburg
4 – FGBU VNIGNI, Moscow
5 – FGBOU VO Voronezh State University, Voronezh

Abstract: the geochemical and mineralogical composition of carbonaceous crystalline shales and their concentrates from the Pavlik deposit was studied using optical and electron microscopy,

controlled by X-ray diffraction analysis, with a parallel morphological study of noble metal mineralization. In terms of metallogeny, the deposits of the Omchak ore-placer node belong to the pyrite-arsenopyrite type of the gold-quartz low-sulfide formation, which is localized in the chlorite-sericite subfacies of the green schist facies of metamorphism.Based on the established mineral composition of the microparticles of noble elements in the "resistant" ores, the authors conclude that the current technological schemes for extracting noble elements are insufficiently effective.
Key words: Omchak ore-placer complex, Magadan Region, Pavlik, Natalka, and Omchak deposits, micro and nano particles of noble metals.

ВВЕДЕНИЕ

Исторически так сложилось, что наши исследования, результаты которых были опубликованы в научных изданиях и докладывались на конференциях по соответствующей тематике, начались с изучения минералого-геохимических особенностей субмикроскопических выделений благородных элементов на месторождении Павлик на Колыме. Именно здесь зародилась идея о превалирующей роли химических процессов, проходящих в зоне гипергенеза, над процессами механического разрушения коренных пород, содержащих металлы, при образовании россыпей. Упомянутые выделения, часто встречаемые в так называемых упорных рудах, характеризуются наличием субмикроскопического, трудно вскрываемого золота. Одновременно с ним присутствуют минералы сурьмы, теллура, меди, мышьяка, двухвалентного железа, а также сульфиды, в том числе пирит и углеродистые вещества, затрудняющие процесс цианирования. Упорные руды золота – это те руды, с которыми методы цианирования, мягко говоря, работают малоэффективно.

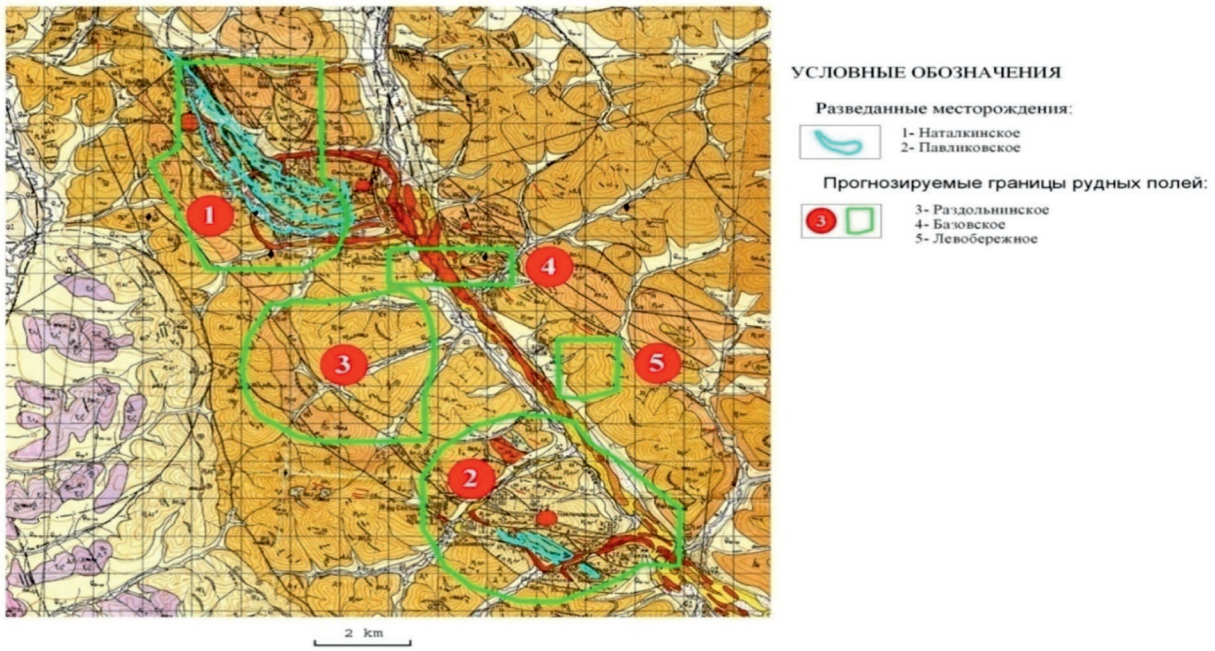

Рис. 1. Схема размещения объектов на территории Омчакского рудно-россыпного узла [4]

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Месторождение Павлик входит в состав Омчакского рудного узла [4] Яно-Колымского металлогенического пояса (рис.1). Специфика этой структуры заключается в наличии многочисленных рудных объектов, как россыпных, так и коренных. Кроме разведанных месторождений отмечается большое количество рудопроявлений и пунктов минерализации. Геологическое строение, мирагения и минеральный состав пород и руд Омчакского рудно-россыпного узла были детально изучены в течение многих десятилетий после его открытия, состоявшегося в 1941 году [1-4, 7, 10, 11, 13, 14, 16].

Оруденение на всех объектах рудно-россыпного узла контролируется крупными разрывными нарушениями северо-западного направления, относящимися к зоне Тенькинского глубинного разлома. В геологическом строении района принимают участие терригенные породы верхоянского турбидитного комплекса пермского возраста, которые прорваны плутонами гранитов, гранодиоритов и мелкими интрузиями различного состава. Среди магматических образований установлены реликты раннего и позднемелового вулканизма, обусловившие проявление поздней минерализации в виде золоторудных месторождений. В металлогеническом отношении месторождения Омчакского руднороссыпного узла относятся к пирит-арсенопиритовому типу золотокварцевой малосульфидной формации, локализованной в зоне хлорит-серицитовой субфации зеленосланцевой фации метаморфизма.

Процессы метасоматических изменений пород всего Омчакского рудно-россыпного узла и, в частности, на месторождении Павлик характеризуются наложением процессов березитизации с развитием карбонат-кварцевых гидротермалитов штокверкового типа с вкрапленностью пирита, арсенопирита, золота и пропилитизации (с развитием хлорита, серицита, пирита). Состав жильных образований в данных метасоматитах существенно кварцевый, кварц-карбонатный, в редких случаях карбонатный. Из жильных минералов преобладает кварц, в небольшом количестве присутствуют кальцит и другие карбонаты, хлорит, серицит, альбит, каолинит, калинатровый полевой шпат, адуляр. Количество кальцит-кварцевого материала в составе руд невелико и редко превышает 5–10% от общей массы или объема руды.

Рудные минералы, по опубликованным данным, представлены пиритом, арсенопиритом, менее распространены сфалерит и галенит. Ещё реже встречаются халькопирит, ильменит, рутил, шеелит, апатит, кобальтин, интерметаллиды Fe-Cr состава, самородные медь и висмут, очень редко наблюдаются монацит и ксенотим. В рудах месторождений Наталка и Павлик установлены зёрна самородного серебра (размером от 1.1 до 5 мкм) округлой формы, находящегося в срастании с арсенопиритом, реже мышьяковистым пиритом. Помимо самородного серебра на месторождении Павлик выявлено наличие селенида Ag – науманнита [16]. В рудах Наталкинского месторождения обнаружен теллурид серебра – гессит (от 2 до 59 мкм), а также селениды золота и серебра – науманит и фишессерит [9].

По данным исследователей [1 - 4], на месторождении Наталка установлено наличие элементов платиновой группы (ЭПГ), однако минеральные формы для них в то время не были определены. На месторождении Дегдекан выделены минеральные фазы платиноидов: самородный осмий, рутеносмирид, лаурит (RuS_2), иридарсенид, арсениды Ru, Os, Ir [10, 17].

Для руд Омчакского рудного узла и месторождения Павлик характерно наличие редкоземельных элементов (РЗЭ) [14]. Появление РЗЭ в пробах авторы работы пред-

положительно связывали с наличием апатита, ксенотима и монацита, но минеральные формы не были установлены точно.

Акцессорным минералом (в пределах 0,0001 – 0,0002%) является золото. Оно считается основным полезным компонентом в добываемых рудах. Кроме золота как минеральной формы на месторождении Павлик выявлены селениды Au и Ag – науманнит и фишессерит на гранях кристаллов арсенопирита [14].

Породы рудовмещающих толщ месторождения в разной степени насыщены углеродистым веществом (УВ). По данным разных исследователей [1, 4, 11], оно присутствует в виде дисперсных скоплений вещества вдоль сланцеватости, составляя основную долю УВ. Наблюдаются тончайшие чешуйки графита (размером от тысячных долей до 0.1 – 0.2 мм); включения УВ нефтяного ряда – изометрично-округлых, линзовидно-овальных, угловатых (0.1 – 0.4 мм). Отмечались скопления глобулярного УВ в мельчайших (размером 0.05 – 0.06 мм) линзах кварцевого и кварц-хлоритового состава. Кузьмина Т.В. [7], исследовавшая процессы хемосорбции золота и платиноидов на углеродистом веществе, в том числе и на объектах Омчакского рудно-россыпного узла, считала, что углеродистое вещество служит не только концентратором, но и надёжным консервантом благороднометальной минерализации.

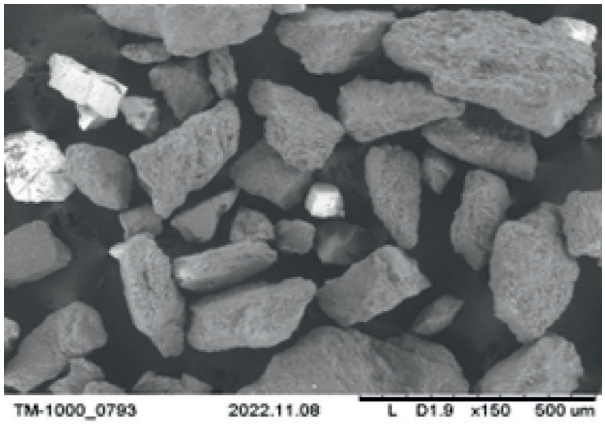

Рис. 2. Месторождение Павлик, проба 1. Средняя размерность обломков породы, представленной на этом снимке, по данным гранулометрии – 355,4 микрона. Светлые обломки – пирит и арсенопирит. Электронный микроскоп «Hitachi TM-1000», Япония

МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалами исследований послужили 4 пробы из рудных горизонтов карьера месторождения Павлик, каждая весом 150 – 153 кг, раздробленные на щековой дробилке примерно до 0.3мм (рис. 2). Образцы проб – типичные малоуглеродистые сланцы с мелкой, редкой, различно ориентированной сеточкой кварц-полевошпатово-карбонатного состава, иногда с мелкими кристалликами пирита и ещё более редко отмечаемого (при визуальном просмотре) арсенопирита.

Пробы 1 и 2 содержали визуально заметное повышенное количество пирита и арсенопирита, а пробы 3 и 4 менее значительное. Содержание золота во всех пробах определялось как пробирным методом (наша лаборатория), так и методом гамма-активационного анализа (ГАА метод – лаборатория Павлика) (таблица 1).

При изучении минеральных форм благородных элементов применялись доступные нашим лабораториям различные формы их концентрирования. Для этого небольшая часть каждой пробы (1 – 1,5 кг) разделялась в бромоформе, а остальная часть додрабливалась до класса менее 36 микрон на планетарных мельницах и просеивалась на сите

Таблица 1.
Содержание золота в исходных пробах месторождения Павлик г/т

№ пробы	Методы	
	ГАА метод	Пробирный
1	0,463	0,6
2	0,448	0,8
3	0,873	0,9
4	0,663	0,7

с ячейкой 25 микрон (рис. 3). Частицы размером более 25 микрон снова дотирались на планетарных мельницах.

Из проб, разделённых в бромоформе, были отобраны все видимые под оптическим микроскопом золотины. По нашим наблюдениям, формы выделений собственно золота имели вид округлых, иногда неправильной формы выделений, чешуек и пленок, связанных с породообразующими для углеродистых сланцев минералами (рис. 3). Общий вес такого золота в сростках, отобранного нами из 4-х проб, разделённых в бромоформе, не превышал 1,5 миллиграмма.

При этом выбранные выделения из шестикилограммовой пробы, разделённой в бромоформе, никак не могли дать содержаний, определяемых лабораторными методами. Основная масса Au, вероятнее всего, должна быть представлена выделениями значительно более мелкого размера, в первый десяток и менее микрон (рис. 4), а возможно и субмикронных размеров. Подтверждение этому мы получили, просматривая минералы «тяжелой фракции» под электронными микроскопами в характеристических лучах золота. Такие микронные и субмикронные выделения форм золота были характерны не только для поверхностей пирита и арсенопирита, но и для хлоритизированных обломков полевых шпатов.

Чтобы уверенно детектировать частицы минералов, в том числе и благородных элементов, имеющих микроразмеры, методами электронной микроскопии и рентгенофазовой дифрактометрии, порода дополнительно дотиралась на планетарных мельницах улучшенной конструкции и расситовывалась до размеров строго менее 25 микрон. Крупность частиц определялась с помощью лазерного измерителя «Bettersizer 2600-WD» (ФРГ). Моды размеров частиц составляли 11.96, 11.13, 10.72 и 9.37 мкм для первой, второй, третьей и четвёртой проб соответственно.

Из этих проб (вес каждой составлял около 150 кг) методом многократного центрифугирования в пульпе (соотношение Т:Ж = 1:3) были получены концентраты с повышенными против исходного материала содержаниями благородных элементов и других соединений. Супернатант и лёгкая

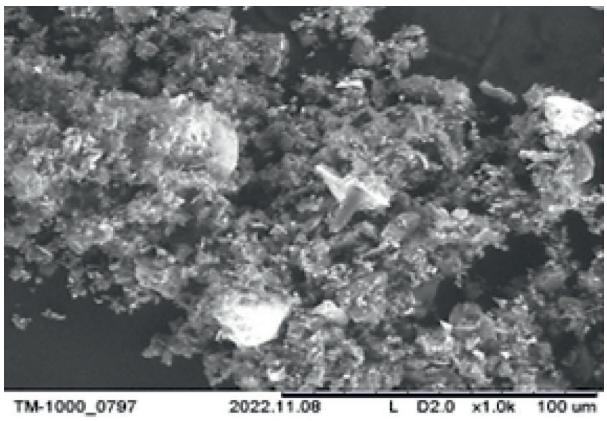

Рис. 3. Месторождение Павлик. Проба 1 после дробления на планетарной мельнице. Основная масса породы имеет размерность 7-20 микрон и менее. Средняя размерность обломков породы, представленной на этом снимке, по данным гранулометрии – 9,35 микрона. Светлые обломочные зёрна – пирит. Электронный микроскоп «Hitachi TM-1000» (Япония)

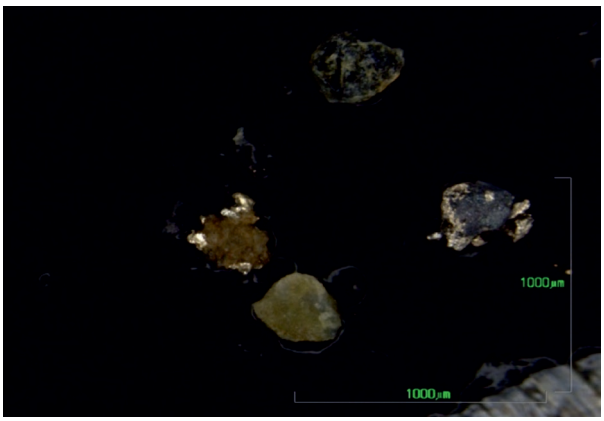

Рис. 4. Единичные, редкие зёрна золота, полученные из всех исходных проб после разделения в бромоформе, в сростках с обломками сланцев и хлоритизированным полевым шпатом с плёночным золотом (нижнее зерно на снимке). Примесь серебра – до 12.23%, железа – до 1.96%. Электронный микроскоп «TESCAN VEGA»

плёнка на поверхности, образовавшаяся после окончательного центрифугирования, сохранялись для дальнейших исследований. Конечный вес полученной тяжёлой фракции составлял примерно 1.5 кг, плюс–минус десять грамм. Содержание золота в этих концентратах также определялось пробирным методом и методом гамма-активационного анализа (таблица 2).

Из таблицы 2 видно, что при центрифугировании было достигнуто увеличение концентраций золота более чем в сорок раз, по сравнению с исходными пробами. Однако, судя по соотношению весов исходной и конечной проб, а это примерно 100:1, значительная часть соединений золота перешла в супернатант и лёгкую, плавающую по поверхности плёнку.

Таблица 2.
Содержание золота в тяжёлой фракции после процесса многократного центрифугирования, г/т.

Исходные пробы

№ пробы	Методы	
	ГАА метод	Пробирный
1	0,463	0,6
2	0,448	0,8
3	0,873	0,9
4	0,663	0,7

Осадок после центрифугирования

№ пробы	Методы	
	Метод ГАА	Пробирный
1	32,8	36
2	29,5	24
3	24,6	27
4	25,4	33

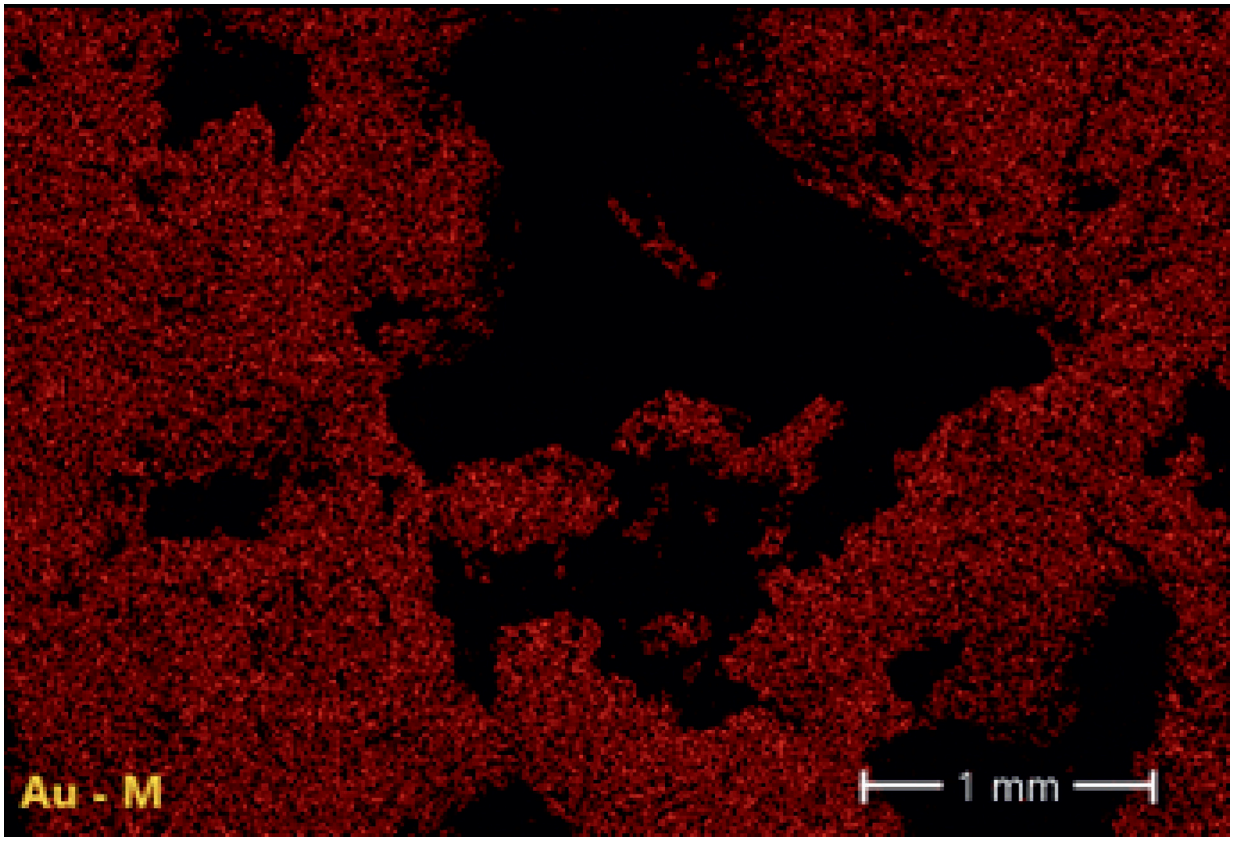

Рис.5. Поверхность хлоритизированного зерна полевого шпата в характеристических лучах золота. Комбинированный шлиф. Электронный микроскоп «Prisma E»

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для достижения цели исследований были поставлены пять основных задач. Решение первой заключалось в сравнении минеральных составов исходных руд месторождения Павлик с таковыми в более мелкой, передробленной, а затем и сконцентрированной их части. Вторая задача – выяснение возможной приуроченности минеральных форм благородных и других элементов к группам породообразующих минералов или их ассоциаций. Третьей задачей определялись не только благородные элементы, но и их минеральные формы в сравнении с опубликованными данными по Омчакскому рудно-россыпному узлу. Четвёртая задача состояла в подтверждении данных о наличии минеральных форм ЭП. Пятая заключалась в проверке предположений [3, 11, 13], высказанных на рубеже веков, о тесной связи дисперсного органического вещества, углеводородов нефтяного ряда, графита с золоторудной минерализацией месторождений Омчакского рудно-россыпного узла.

Для сравнения минерального состава исходных руд и минеральных форм благородных и других редких элементов месторождения Павлик с более мелкой раздробленной и сконцентрированной их частью использовались методы рентгенофазовой дифрактометрии. Полученные этим методом данные приведены в таблицах 3 и 4.

Аналогичные исследования проведены для проб 3 и 4 с менее выраженными содержаниями пирита и арсенопирита.

Таблица 3.
Пробы 1 и 2 с повышенным содержанием пирита. Слева – минеральные фазы крупнораздробленной породы, справа – мелкораздробленного концентрата

Проба 1

Фаза	**%**	**Фаза**	**%**
Quartz	33,5	Quartz	23,2
Albite, low	31	Albite(low)	21,5
Muscovite	17	Pyrite	19,8
Chlorite	3,6	Muscovite	11,7
Dolomite	2,4	Chlorite	3,8
Calcite	2	Ankerite	3,4
Ankerite	2	Krennerite $AuTe_2$	3,3
Siderite (rhomb)	1,8	Apatite, F	2,8
Kaolin	1,6	$AgAu F_4$	2,4
Biotite	1,3	Arsenopyrite (tri. small)	2,1
$KrenneriteAuTe_2$	0,7	Biotite	1,3
Adularia	0,6	Rutile	1,1
$LitochlebiteAg_2PbBi_4Se_8$	0,6	Siderite (rhomb)	0,7
Apatite, F	0,4	Silvercarbonate	0,6
Rutile	0,3	Palladiumdiarsenide	0,5
Tysonite (Ce, La) F_3	0,3	Silveroxide	0,4
Pyrite	0,3	Sperrylite $PtAs_2$	0,3
Cu_3Pd	0,2	Ir Se_2	0,3
$BismuthiniteBi_2S_3$	0,2	Palladiumfluoride	0,2
Arsenopyrite (tri. small)	0,2	$BismuthiniteBi_2S_3$	0,2
		Galena	0,2
		Pyrrhotite	0,2

Продолжение таблицы 3

Проба 2

Фаза	**%**	**Фаза**	**%**
Quartz	36,6	Quartz	23,6
Albite, low	25,6	Albite(low)	22,3
Muscovite	14,4	Pyrite	18,2
Dolomite	2,7	Muscovite	11,9
Ankerite	2,4	Chlorite	3,8
Chlorite	2,3	Ankerite	3,4
Kaolin	2,3	$KrenneriteAuTe_2$	3,1
Biotite	1,8	Apatite, F	2,7
Siderite (rhomb)	1,7	$Silvanite(Au,Ag)_2Te_4$	2,4
Calcite	1,2	Arsenopyrite (tri. small)	1,6
$Ag\ Au_2\ F_8$	1,1	Biotite	1,3
$Au\ Sb_3$	0,9	Rutile	1,1
Apatite, F	0,9	Siderite (rhomb)	0,7
$AuAg\ Te_4$	0,8	$AuCu\ Se_4$	0,6
$LitochlebiteAg_2PbBi_4Se_8$	0,7	Palladiumdiarsenide	0,5
$KrenneriteAuTe_2$	0,7	$FishseriteAg_3AuSe_2$	0,4
Alunite	0,6	$FluorargyriteAg_2\ F$	0,3
Rutile	0,5	$AurostibiteAuSb_2$	0,3
$AuCu\ Se_4$	0,5	$Ir\ Se_2$	0,3
Cristobalite	0,4	GersdorffiteNiAsS	0,3
$Tysonite(Ce,La)F_3$	0,4	Palladiumfluoride	0,2
Pyrite	0,4	Platinumboride	0,2
Bismuthinite	0,3	$Tysonite(Ce,La)F_3$	0,2
Acanthite	0,2	Kerargyrite	0,2
Kerargyrite	0,2	Rhodiumdisulphide	0,2
Rhodiumdisulphide	0,2	Cu_3Pd	0,2
Cu_3Pd	0,2		

Таблица 4.
Пробы 3 и 4 с менее выраженным содержанием пирита в исходной пробе. Слева представлены минеральные фазы крупнораздробленной породы, справа- мелкораздробленного концентрата

Проба 3

Фаза	**%**	**Фаза**	**%**
Quartz	46,7	Quartz	32,3
Albite (low)	27,2	Albite, low	25,9
Muscovite	13,5	Muscovite	12,7
Ankerite	2,5	Pyrite	16,2
Chlorite	2,4	Chlorite	1,5

Продолжение таблицы 4

Calcite	1,4	$KrenneriteAuTe_2$	2,8
$KrenneriteAuTe_2$	1,1	Siderite (rhomb)	1,5
Kaolin	1,2	Aurostibite	1,4
Dolomite	1,1	$LitochlebiteAg_2PbBi_4Se_8$	0,7
Siderite (rhomb)	0,9	Dolomite	0,5
$Au\ Sb_3$	0,6	Calcite	0,5
$SylvaniteAuAgTe_4$	0,5	$SilvaniteAuAg\ Te_4$	0,5
Cu_3Pd	0,3	Acanthite	0,5
Silveroxide	0,2	$LauriteRuS_2$	0,4
Bismuthinite	0,2	$Tysonite(Ce,La)F_3$	0,3
$Ir\ Se_2$	0,2	Rhodiumdiselenide	0,3
		Rutheniumdioxide	0,3
		Silveroxide	0,3
		$NaumaniteAg_2Se$	0,3
		Rutheniumdiselenide	0,3
		$FishseriteAg_3AuSe_2$	0,2
		Kerargyrite	0,2
		Bismuthinite	0,2
		Cu_3Pd	0,2

Проба 4

Фаза	**%**	**Фаза**	**%**
Quartz	43,2	Quartz	30,4
Albite(low)	26,5	Albite, low	25,6
Muscovite	15,4	Muscovite	14,3
Chlorite	3,1	Pyrite	14,5
Ankerite	2,6	Ankerite	4,3
Kaolin	1,9	$KrenneriteAuTe_2$	2,7
$LitochlebiteAg_2PbBi_4Se_8$	1,6	Chlorite	1,9
Dolomite	1,5	Siderite (rhomb)	1,6
$KrenneriteAuTe_2$	1,3	$LitochlebiteAg_2PbBi_4Se_8$	0,9
Siderite (rhomb)	1,2	Arsenopyrite (tri. small)	0,8
$Au\ Sb_3$	0,6	Calcite	0,8
Rutheniumdioxide	0,4	Kerargyrite	0,4
Kerargyrite	0,3	$AurostibiteAuSb_2$	0,4
Cu_3Pd	0,2	Cu_3Pd	0,4
$Ir\ Se_2$	0,2	Tysonite	0,3
		$AnuyiteAu(Pb,Sb)_2$	0,3
		Rutile	0,2
		Millerite	0,2

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При анализе таблиц 3 и 4 отчётливо видно, что:

- набор породообразующих минералов исходных проб (левая часть таблиц) типичен для хорошо изученных углеродистых сланцев района, вмещающих золоторудную минерализацию;
- измельчение пород до микронных размеров и последующая концентрация на центрифугах привели к резкому увеличению содержаний минералов тяжёлой фракции. Это отчётливо видно по возрастанию в десятки раз концентрации именно мелких пиритов в осадке тяжёлой фракции. Конечно, надо учитывать то, что процесс центрифугирования привёл к частичному удалению лёгких минеральных форм породообразующих минералов и переводу их в супернатант и лёгкую плывущую фракцию. Несомненным является тот факт, что основная часть рудных минералов имеет микроразмеры;
- методами порошковой дифрактометрии в рудах месторождения Павлик установлено чрезвычайное многообразие минеральных фаз благородных, цветных и редких элементов;
- основная масса микроминеральных форм благородных элементов представлена не ноль-валентной, так называемой интерметаллической формой (за исключением небольшого количества анюйита в пробе 4 и медистого палладия в пробах 3 и 4), а в виде теллуридов, стибнитов, селенидов и других их форм, в которых

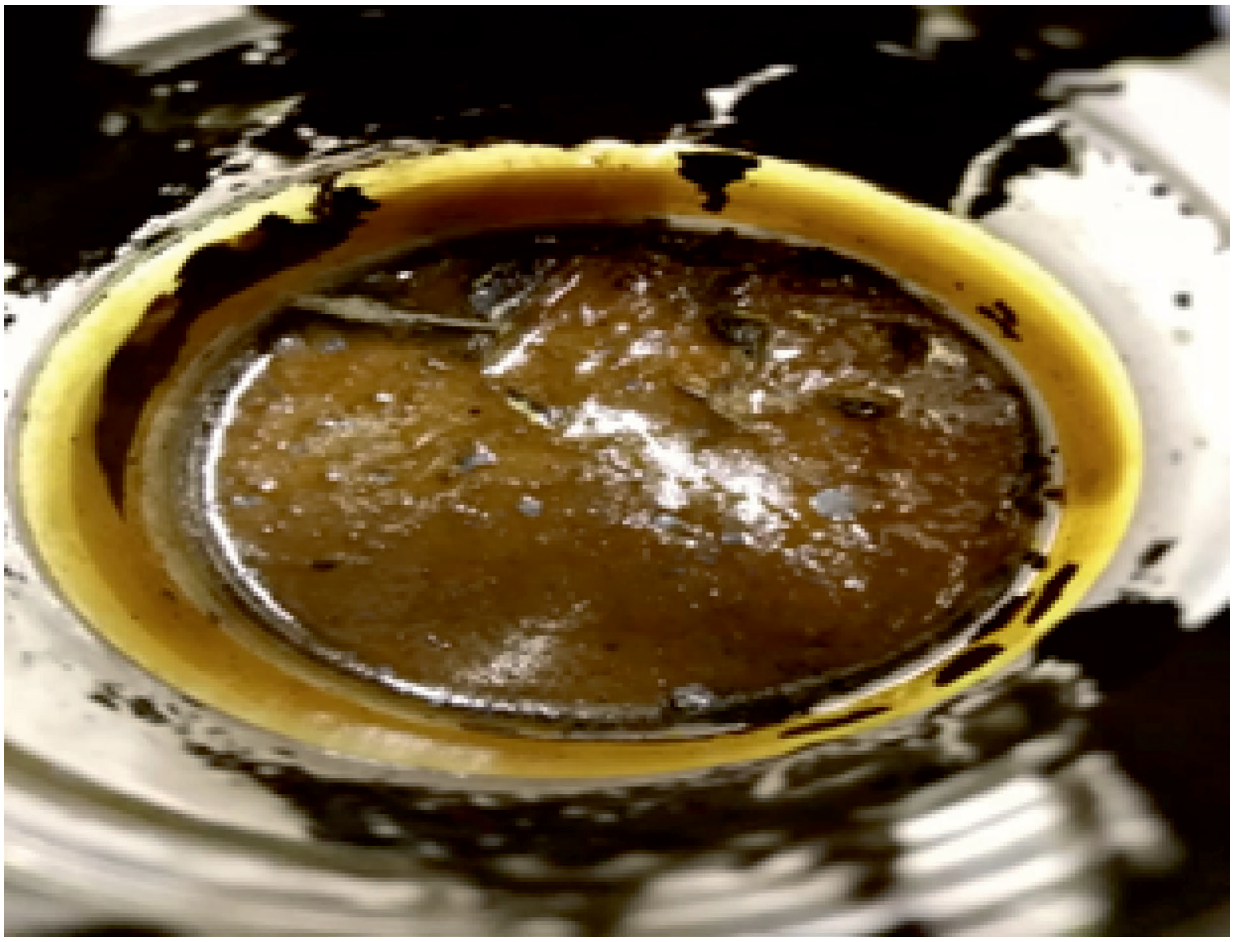

Рис.6. Вид всплывшей лёгкой фракции раздробленной породы после центрифугирования

они имеют степени окисления +3, +2, +1 и, вероятно, +5, судя по наличию фтораурата серебра в пробе 1. Как известно, такие формы хуже подвергаются цианированию, нежели Au^0;

- анализ левой и правой частей таблиц 3 и 4 показывает появление дополнительных и довольно многочисленных минеральных форм благородных элементов. Вероятнее всего, это связано с дополнительным вскрытием минеральных форм, имеющих субмикронные размеры при супертонком измельчении.

Лёгкая всплывающая фракция, получаемая при центрифугировании и отстое пульпы, представлена на рис. 6.

В её составе присутствуют мелкораздробленные частички породы, на поверхности которых наблюдаются более мелкие чешуйки и плёнки тяжелых элементов, а также крупные (до 10-15 мкм) обломки сульфидов железа и слюды (рис. 6). При высушивании масса легко агломерируется и слипается.

Минеральный состав этой фракции методом порошковой рентгенофазовой дифрактометрии определить не удалось из-за появления значительного количества аморфной фазы, как мы предполагаем, связанной с углеродистым некристаллическим веществом. Аморфная фаза образует на дифрактограммах «гало». Уверенно диагностируются лишь породообразующие минералы типа кварца, полевых шпатов, карбонатов. Хаотическое наложение «гало» перекрывает отражения минеральных форм, особенно с небольшими содержаниями (менее 5%).

Состав органического вещества в породах определялся в лаборатории Института органической химии РАН. В нем присутствуют масла, смолы, асфальтены, асфальтеновые кислоты. КР-спектры этой фракции, изученной в Институте биохимической физики РАН, были получены при помощи КР-спектрометра «RamanStation 400F», оснащенного лазером с длиной волны 785 нм (пр-во «PerkinElmer»), подтвердили эти данные. Лишь наличие углерода, отмеча-

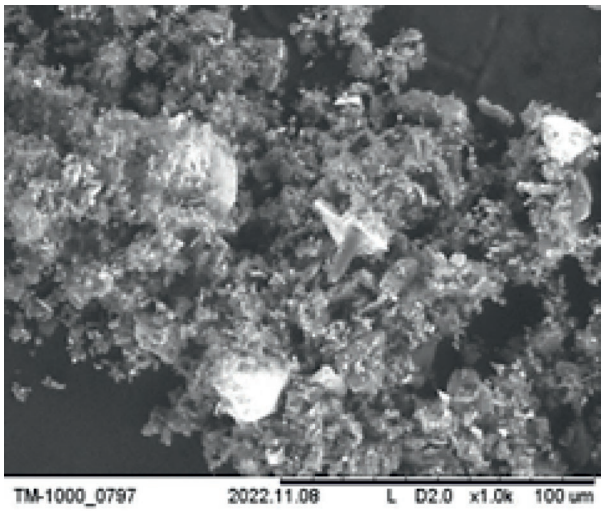

Рис. 7. Месторождение Павлик. Агломерированная, слипшаяся после просушки масса, состоящая из частиц размерностью 7-20 микрон и менее. Средняя размерность обломков породы, представленных на этом снимке, по данным гранулометрии, составляет 9.35 микрон. Электронный микроскоп «Hitachi TM-1000» (Япония)

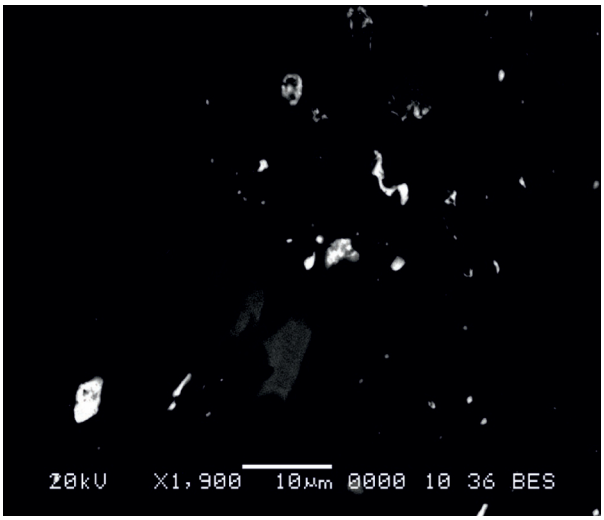

Рис. 8. Минеральные формы золота, полученные из битумоидов, извлеченных из хвостов флотации, после обработки их спиртобензольными смесями, хлороформом, промывки спиртом и центрифугирования. В левом нижнем углу – зерно золота размером около 4-х микрон. Наиболее крупное зерно в центре снимка – кераргирит (Ag2S) с примазками хлорита. Месторождение Павлик. Электронный микроскоп TM-1000, Hitachi, Япония

емого в работах Ведерникова, Ворошина и Плутешко [4, 2, 11], не было подтверждено.

В целом изученные нами соединения из углеродистых сланцев Павлика представляли собой «окисленное» углеродистое вещество, обогащённое кислородсодержащими группами. Как известно [6], окислительное разложение органического вещества в толще пород земной коры сопровождается потерей массы и относительным увеличением концентрации Au не менее чем на порядок.

После многократной промывки в турбулентных потоках спиртобензольной смеси и центрифугирования из пробы лёгкой фракции весом 998.2 г были выделены частички с содержанием высокопробного Au – 96,2-98,7% (рис. 8), а также частички станнопалладинита на поверхности углеродистой массы (рис. 9). Частичек не ноль-валентных (в лёгкой фракции) соединений благородных элементов не зафиксировано.

Наличие значительных содержаний элементов платиновой группы в пределах территории Омчакского рудно-россыпного узла было известно не только из литературных источников, но и по данным ГГК 200 [4, стр. 62]. На месторождении Павлик нами было установлено (метод ASP – MS, лаборатория ВНИИХТ) наличие не только золота в исходных рудах, но и платиноидов с содержаниями 1,2 –2,7 г/т, а в некоторых про-

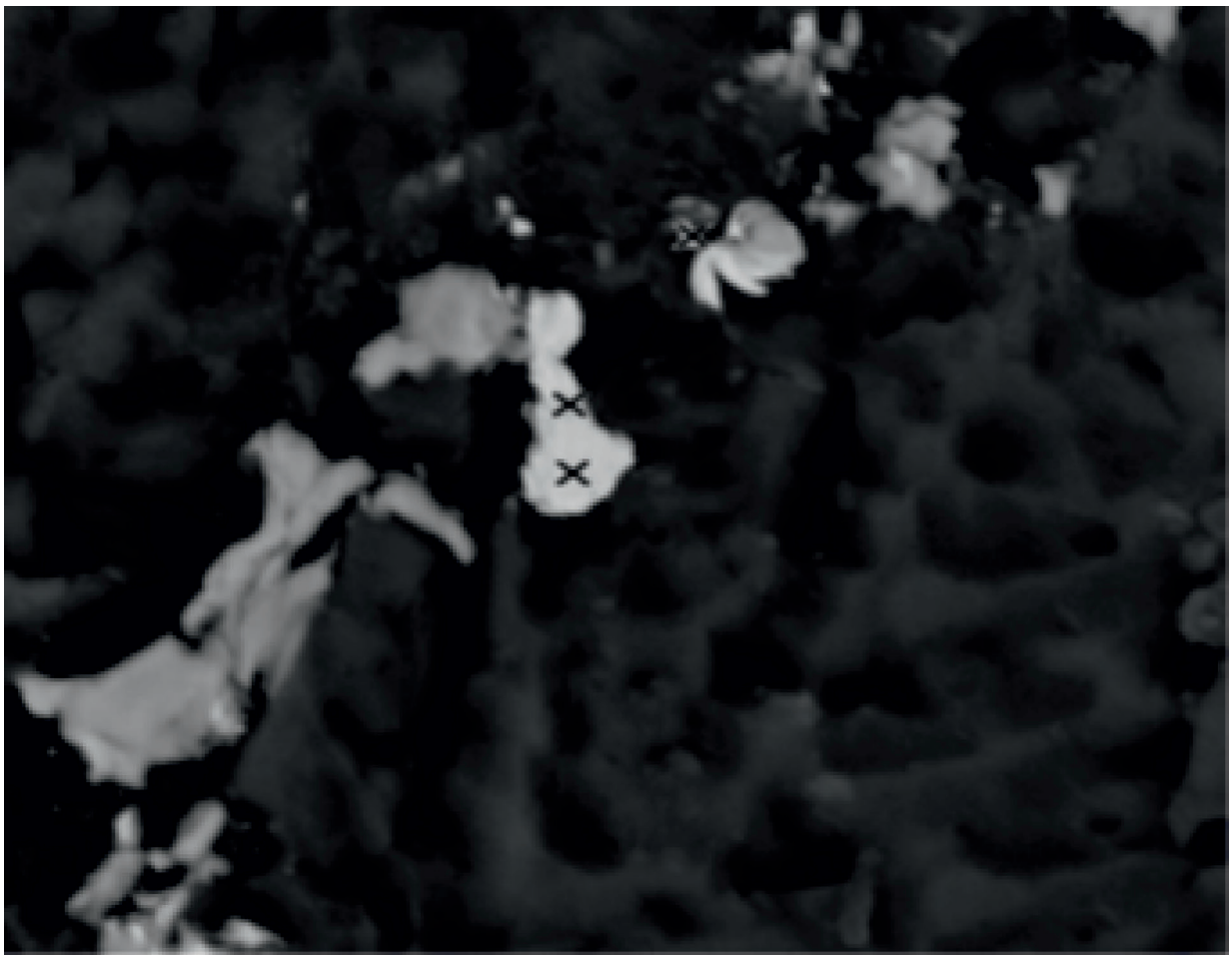

Рис. 9. Фотография участка проявления платиноидной минерализации, полученная на сканирующем электронном микроскопе «EVO-50 XVP» фирмы «C. ZEISS» в отраженных электронах. Углистый сорбент, хвосты сорбции. Данные приставки для рентгено-спектрального анализа химического состава вещества «INCA ENERGY 350»: станнопалладинит – Pd3Sn2Cu (Pd 40-45, Pt 15-20, Sn 28-33, Cu 1.5-6.2%). Размер выделений 3-7 микрон

бах и более 10 г/т. Однако необходимость установления минеральных форм МПГ, а не только их содержаний (эти работы нами проводились в 2018 году), авторами настоящей статьи тогда чётко не осознавалась, аппаратурные возможности также были ограничены.

После установления минеральных форм методами рентгенофазовой дифрактометрии было решено дополнительно изучить данные по содержанию платиноидов методом сцинциляционного излучения (РФА-СИ) в институте ядерной физики им. Г.И. Будкера в Новосибирске. В пробе 1 (таблица 1), для которой содержание золота находилось (по методу ГГА) в пределах 0,463 г/т, по данным пробирного анализа 0,6 г/т, были зафиксированы минералы платиновой группы, их содержания составили: Jr – 0,010, Pd – 0,84, Pt – 0,43, Rh – 0,096, Ru – 0,029 г/т, что суммарно почти в два раза превышает содержание золота и примерно совпадает и с нашими определениями содержаний МПГ.

ВЫВОДЫ

В результате наших исследований были подтверждены выводы, сделанные другими авторами, о значительном многообразии минеральных форм благородных элементов на месторождении Павлик и рудных объектах Омчакского рудно-россыпного узла. В том числе преимущественное нахождение минералов золота и серебра в виде микроформ теллуридов (минералы – креннерит исильванит), селенидов (фишсерит и науманит), стибнитов (ауростибнит) и других соединений. Интерметаллиды золота, даже в микроформах, находятся по отношению к ним в резко подчинённом количестве, представляя смеси с серебром и медью. В единичном случае обнаружен анюйит - $Au(Pb)_2$.

Минеральные формы серебра, кроме распространённых его минеральных форм в виде кераргирита (зафиксированного в хлоридной и во фторидной форме) и акантита, на удивление часто представлены считающейся редкой минеральной формой – литохлебитом $Ag_2PbBi_4Se_8$. Различными методами установлены минералы платиновой группы в породах месторождения Павлик. Здесь они присутствуют в виде интерметаллидов (чаще всего с медью Cu_3Pd), сперрилита $PtAs_2$ и лаурита, сульфидной формы рутения (RuS_2), образуют и селенидные формы.

Также методом рентгенофазовой дифрактометрии были выявлены соединения благородных металлов, не образующих минеральные формы. Их частицы не превышают 10 микрон, а в большинстве случаев имеют явно субмикронные размеры.

Был подтверждён вывод Кузьминой Т.В. [7] о том, что на объектах Омчакского рудно-россыпного узла углеродистое вещество служит не только концентратором, но и надёжным консервантом благороднометальной минерализации.

Получили подтверждение сделанные нами ранее выводы [8, 9, 18] о значительно большем распространении во вмещающих оруденение породах микроминеральных форм благородных элементов с ненулевой валентностью. А привычные для нас формы с нулевой валентностью – явление уже вторичное, возникающее лишь при стечении ряда благоприятных геологических факторов. В частности, для месторождений черносланцевого типа таким фактором может служить наличие органических восстановителей.

Руды черносланцевого типа действительно являются «упорными», то есть тем материалом, с которым методы цианирования в любом их виде работают малоэффективно. Что же касается элементов платиновой группы, то их цианидные комплексы нерастворимы в воде, а электролиз бессмыслен. Назрела необходимость разработки абсолютно других методов (причём комплексных) извлечения микро- и наноформ благородных элементов как из пород, так и из техногенных отвалов прошлых лет. Об-

наружение именно ноль-валентных соединений золота, в том числе и запечатанных в органике сланцев, тоже очень интересно. При их высвобождении из пород в зоне гипергенеза такие соединения золота могут служить в качестве зародышей при восстановлении многовалентных соединений. Они резко убыстряют кинетику процесса его роста в зоне гипергенеза, что, по нашему мнению, наряду с присутствием значительного количества сульфидов объясняет широкое распространение россыпных месторождений в областях распространения чёрных сланцев.

Для редкоземельных элементов, наличие которых Савчук Ю.С. и др. [14] связывали с наличием апатита, ксенотима и монацита, однако минеральные формы РЗЭ ими не установлены, авторами была определена минеральная форма фторида лантана и церия в виде минерала тиссонита $(Ce,La)F_3$.

Исследуя материал руд Павлика, мы впервые задумались о связи микро- и нановыделений золота, находящихся в черносланцевых толщах, и их связи с россыпными месторождениями. Но зоны окисления и россыпи давно выработаны. Известно лишь то [4], что содержания золота, добываемого из зоны окисления, составляли: в 1944 г. – 50,4 г/т, в 1945 г. – 28,9 г/т, в 1946 г. –16,1 г/т. В последующие годы по мере отработки зоны окисления содержания Au снижались: в 1950 г. – 6,4 г/т, в 1955 г. – 4,9 г/т, в1960 г. – 4,9 г/т, в 2008– 2,38 г/т. В настоящее время богатыми руды считаются при содержании Au свыше 1,0 г/т. В россыпях превалировало мелкое золото (0,5–2,0 мм), но встречались и самородки. Самые крупные весом 1128 и 480 г. Из элементов примесей (кроме серебра) в них присутствовали железо, мышьяк, свинец. К счастью, было открыто месторождение Хлебопёк, где можно исследовать как материал кристаллических сланцев, так и россыпей, не согласовывая ход исследований с собственником.

Важно отметить то, что наши работы подтвердили данные других исследователей о наличии в породах Омчакского рудно-россыпного узла минералов не только золота, но и платиновой группы. Иными словами, существует обоснованная вероятность обнаружения в пределах Омчакского рудно-россыпного узла рудных объектов, специализированных не только на золото (и даже не столько на золото), но и на минералы платиновой группы (МПГ). Судя по всему, на этой территории, площадью всего-то 350 км^2, могут быть выявлены объекты МПГ, сопоставимые, возможно и превышающие, по запасам известные там месторождения золота.

Но, по-видимому, площадное распространение таких объектов значительно более широкое. В своё время мы выявили наличие элементов и минеральных форм МПГ на Чукотке [15], в частности на месторождениях Купол, Двойное и Сентябрьское. А также в Приморском крае на таких объектах, как Конторское, Малиновское, Намовское [5] и Милоградовское [12]. Причём на последнем нам удалось провести самосборку платины из её минеральных форм, различимых лишь под электронным микроскопом, методом рентгенофазовой дифрактометрии и методом нейтронной активации, которым определяются содержания в граммах на тонну. Удалось перевести микроформы в макроформы, видимые уже невооружённым глазом [12]. Это был наш первый опыт по искусственной организации самосборки благородных элементов из микро- в макроформы. Опыт успешный, но не очень технологичный.

Более целенаправленно к решению этого вопроса мы подошли в работе «Исследования микроформ кристаллических соединений благородных металлов в золоторудных месторождениях Евразии» [9], где на примере изучения образцов из заведомо рудных интервалов 28-ми золоторудных месторождений различных типов показали, что микроформы благородных элементов встречаются в этих интервалах значительно чаще их крупных аналогов, подтвердив

вывод Петровской Н.В., сделанный ей ещё в 1973 году, о том, что микроформы золота в природе превалируют.

Судя по полученным нами и литературным данным, основная масса МПГ (кроме лаурита RuS_2), во-первых, существует в виде интерметаллидов, то есть восстановленных форм с нулевой валентностью, и связана с углеродистым веществом сланцев; во вторых – они, как минимум, имеют микроразмерность. Значит, эти руды будут очень упорными.

Существующие методы цианидного выщелачивания для извлечения платиноидов не годятся. Разработка других технологических схем их извлечения – задача на уровне государственного решения. Но в силу множества причин решение этих задач, вероятнее всего, будет передано частному бизнесу. А ему – существующему в жёстких рамках нормативных документов и множества ограничений, это совсем не нужно.

В заключение следует признать, что мы имеем дело с целой провинцией или даже провинциями МПГ, которые локализованы не только в углеродистых сланцах, но и в вулканитах Северо-Востока и Востока Российской федерации.

Авторы выражают благодарность компании ООО РГ “Иркутскгеофизика - 3” за финансовую поддержку наших многолетних исследований.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ворошин С. В., Сидоров В. А., Тюкова Е. Э. и др. Геология, геохимия, минералогия и перспективы платиноносности Наталкинского золоторудного месторождения // Платина России. Т. II. Кн. 2. М.: Геоинформмарк, 1995, С. 161–176.

2. Ворошин С. В., Тюкова Е. Э., Чиненов В. А. Изотопный состав углерода и кислорода во вмещающих породах и рудах Наталкинского месторождения // Колыма, 2000,№ 2, С. 58–65.

3. Горячев Н. А., Соцкая О. Т., Михалицына Т. И., Горячева Е. М., Маньшин А. П. Оценка Au-Pt-Pd-Ni в рудах типовых месторождений (Наталка, Дегдекан) в черносланцевых толщах Яно-Колымского золотоносного пояса //Проблемы минерагении России. Издание ГЦ РАН.– Москва, 2012.

4. Ермоленко В. Г. и др. Государственная геологическая карта Российской федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Неро-Бахапчинская. Лист P-55-XXII (Омчак), 2002, 103 с.

5. Жабин А.В., Кузнецов Ю.А., Дубков А.А. К вопросу о применении методов рентгеноструктурного и энергодисперсионного анализов для обнаружения платиноидной и рениевой минерализации на золоторудных проявлениях (на примере золото-сульфидных месторождений Центрального Сихотэ-Алиня Приморского края) // Недра Поволжья и Прикаспия, Вып.104, С. 30-38.

6. Кизильштейн Л.Я. Роль органического вещества в образовании месторождений золота (на примере черных сланцев) // Науки о земле и смежные экологические науки. 2000. С.108-114.

7. Кузьмина Т. В. Исследование хемосорбции золота и платины на углеродистом веществе в связи с проблемой металлоносности чёрных сланцев // Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук. Владивосток, 2006, 20 с.

8. Кузнецов Ю.А., Дубков А.А., Жабин А.В., Грибанов В.Н., Гулин А.А. // Исследования минерального состава россыпного месторождения Хлебопёк (Бодайбинский район Иркутской области) //Недра Поволжья и Прикаспия. Вып. 109, С.20-27.

9. Кузнецов Ю.А., Дубков А.А., Калиниченко В.Н., Жабин А.В., Варфоломеев С.Д. Исследования микроформ кристаллических соединений благородных металлов в золоторудных месторождениях Евразии // Недра Поволжья и Прикаспия. Вып. 111, 2023, С. 27-37.

10. Лазебник К.А., Гамянин Г.Н., Округин А.В. и др. Редкие минералы в Якутиию.– Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1984, 106 с.

11. Мирзеханов Г.С., Мирзеханова З.Г. Стратифицированное золото-кварцевое оруденение углеродисто-терригенных толщ Южного Верхоянья.– Владивосток: ИВЭП, 1991, 128 с.

12. Ненахова Е.В., Сахно В.Г., Калашников Ю.Д., Ненахов В.М., Кузнецов Ю.А. Самосборка нанодисперсных форм платиноидов как метод их извлечения на примере золотосеребряных руд Милоградовского проявления (Приморский край) // Вестник ВГУ. Серия Геология, 2018, № 4, С. 102-106.

13. Плутешко В.П., Яблокова С.В., Яновский В.М. Наталкинское месторождение // Геология золоторудных месторождений Востока СССР. ЦНИГРИ, 1988, С. 126–140.

14. Савчук Ю.С., Волков А.В., Аристов В.В., Сидоров В.А., Лямин С.М. Строение и состав золоторудных залежей месторождения Павлик // Руды и металлы, 2018, № 2, С. 77–85.

15. Сахно В.Г., Кузнецов Ю.А., Дубков А.А., Ненахова Е.В. О находках платиноидов в первичных рудах золотосеребряных месторождений Северной Чукотки // Вестник Воронежского государственного университета. Серия Геология, 2019, № 3, С. 329-336.

16. Соцкая О.Т., Горячев Н. А. Микроминеральные формы нахождения золота и серебра во вкрапленно-сульфидных «черносланцевых» рудах (Северо-Восток России) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. – Якутск, 2012, Т. 2, С. 173–177.

17. Соцкая О. Т. Минералогические и геохимические особенности месторождений золото-сульфидно-вкрапленного типа в южной части Яно-Колымского золотоносного пояса: автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук. – Магадан, 2017, 20 с.

18. Varfolomeev S.D., Kalynychenko V.N., Kuznetsov Yu.A., Gacho I.V., and Tsybenova S.B.. Physicochemical Model of the Formation of Allocate Gold // RUSSIAN JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY A Vol. 98 No. 12. 2024. pp. 2798-2808.