

УДК 553.491:553.41

## ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ И ИХ ГЕНЕЗИС В ЗОЛОТОРУДНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ СУХОЙ ЛОГ (РОССИЯ)

© 1996 г. В. В. Дистлер\*, Г. Л. Митрофанов\*\*, В. К. Немеров\*\*,  
В. А. Коваленкер\*, А. В. Мохов\*, Л. К. Семейкина\*\*, М. А. Юдовская\*

\* Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН  
109017, Москва, Ж-17, Старомонетный пер., 35

\*\* Восточно-Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья  
664007, Иркутск, ул. Декабрьских событий, 29

Поступила в редакцию 08.07.96 г.

В уникальном стратиформном золоторудном месторождении Сухой Лог установлена и изучена минерализация металлов платиновой группы. Подобно золоту, она имеет стратиформный характер распространения и локализуется как в золотых рудах, так и в перекрывающих метаосадочных породах. Среди металлов платиновой группы (МПГ) главным компонентом руд является платина, а остальные МПГ встречаются спорадически. Для месторождений подобного типа впервые установлены формы нахождения МПГ. Главный носитель платины – самородная платина и металлические твердые растворы системы Pt–Fe–Cu. Выявлен теллуриформный палладия и показано, что родий также присутствует в минеральной форме. Образование МПГ сопровождалось проявлением большого числа фаз самородных металлов и металлических твердых растворов, включающих самородные железо, хром, олово, свинец, никель, вольфрам, титан, твердые растворы систем Fe–Cr–W, Ni–Sn–Sb и др. В статье приведены новые данные по минералогии золотых руд и фазовому составу органического вещества. На основе парагенетического анализа, термобарических и изотопно-геохимических данных сделан вывод о более раннем по сравнению с золотом формировании минерализации МПГ и парагенетических ей самородных металлов и металлических твердых растворов. Образование восстановленных форм металлов, в том числе и МПГ, происходило за счет водородного восстановления, сопряженного с окислением углеводородов. Одним из главных результатов исследования является квалификация месторождения Сухой Лог как платино-золоторудного объекта. Доказано также, что поведение МПГ и образование их форм в рудах месторождения подчиняется общим фундаментальным закономерностям их миграции и концентрации в эндогенных процессах.

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие были открыты ранее неизвестные промышленные месторождения благородных и цветных металлов в углеродсодержащих осадочно-метаморфических черносланцевых комплексах, в которых совместно с основными промышленными компонентами присутствуют металлы платиновой группы (МПГ). Они имеют широкое географическое распространение и располагаются в породах разного возраста – от протерозоя до раннего мезозоя (Kucha, 1982; Chen Nansheng *et al.*, 1982; Coveney, Nansheng, 1991; Halbert *et al.*, 1992; Созинов и др., 1995; Митрофанов и др., 1994 и др.). Месторождения различаются по масштабам оруденения, морфологии рудных тел, интенсивности и многообразию типов гидротермально-метасоматических изменений вмещающих пород, а также по другим признакам. Тем не менее их характеризует ряд общих особенностей, а именно: стратиформный характер оруденения; постоянная ассоциация с углеродсодержащими первично-осадочными порода-

ми; многокомпонентность руд, в которых сочетаются золото, серебро, платиновые металлы, радиоактивные и редкоземельные элементы, никель, медь, хром, ванадий, молибден, свинец, вольфрам, кобальт; приуроченность руд к зонам метасоматического изменения вмещающих пород и рассеянной сульфидной или сульфид-сульфоарсенидной минерализации. По морфологическим признакам месторождения разделяются на две группы. Первая, наиболее важная группа, включает крупные месторождения, в которых стратиформная рудная минерализация образует рудные зоны мощностью в десятки, а иногда и первые сотни метров и значительной (до нескольких километров) протяженности. Вторая – это месторождения с весьма малыми по мощности (первые единицы сантиметров), но с значительной протяженностью рудными телами, содержащими высокие концентрации металлов. Это цехштейновые медные месторождения Польши (Kucha, 1982), никель-цинк-платиновое месторождение Ник в Канаде (Halbert *et al.*, 1992), стратиформные

месторождения Китая (Chen Nansheng *et al.*, 1982) и ряд др.

Стратиформное золоторудное месторождение Сухой Лог (Иркутская область), залегающее в черных сланцах, относится к первой группе месторождений. Проблема его платиноносности возникла в связи с предстоящим его промышленным освоением и некоторыми аналитическими данными, фиксирующими существование повышенных концентраций МПГ в пробах золотосодержащих руд (Митрофанов и др., 1994; Созинов и др., 1995). Исследования были осуществлены в рамках специального Проекта, выполнявшегося под научным руководством вице-президента РАН академика Н.П. Лаверова.

Исследования форм нахождения МПГ и их соотношений с золотой минерализацией являлись одной из наиболее существенных и методически сложных задач Проекта. Так, на основе только аналитических данных платиновые металлы (в ряде случаев от 1 г/т и более) определены, помимо Сухого Лога, в целом ряде объектов: Мурунтау, Кумтор, Наталкинское и др. В то же время поиски форм нахождения платиновых металлов в этих и других сходных месторождениях в черных сланцах в большинстве случаев не дали ожидаемых результатов, хотя в некоторых месторождениях и была установлена разнообразная группа минералов платиновых металлов (Полеховский, Волошин, 1990). Это явилось причиной сомнений в надежности аналитических данных и повлекло за собой появление ряда противоречивых предположений о состояниях МПГ в рудах. Наибольшее распространение получили представления о существовании металл-углеродных комплексов, сорбированных на органическом веществе, и представления о рассеянии платиновых металлов в рудообразующих сульфидах (Ермолаев и др., 1995).

Поэтому, получение достоверных фактов по распределению и формам нахождения МПГ в золотых рудах Сухого Лога имеет значение не только для оценки этого и аналогичных месторождений, но и для решения более общих генетических проблем.

### ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК МЕСТОРОЖДЕНИЯ СУХОЙ ЛОГ

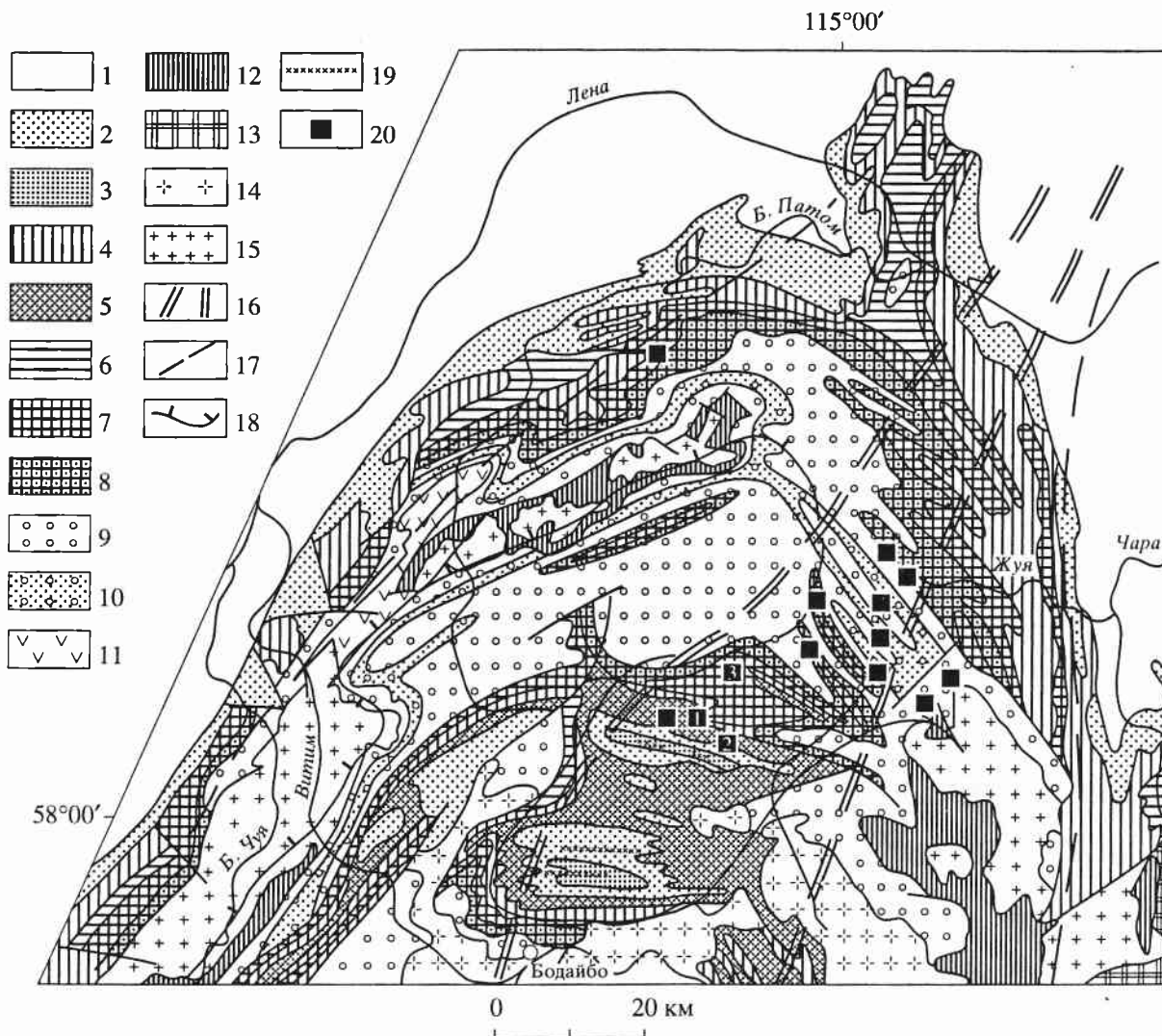
Месторождение Сухой Лог (фиг. 1, 2) локализовано в пределах Байкало-Патомского нагорья, сложенного терригенными и терригенно-карбонатными средне-, верхнерифейскими осадочно-метаморфическими породами (Попов, Лисий, 1974; Митрофанов и др., 1994). Они накапливались в перикратонном бассейне, возникшем в результате образования субмеридиональной внутрисконинентальной рифтовой системы. Развитие

бассейна завершилось стабилизацией континентальной окраины без признаков океанизации континентальной коры. Развитие территории в режиме рифтогенеза документируется хорошо выраженным поднятием границы Мохо, в силу чего мощность коры в регионе понижается до 36 км по сравнению с 42–45 км на сопредельных территориях.

В структурном отношении месторождение Сухой Лог располагается в пределах сложной синклиналиальной зоны. Рудные тела приурочены к запрокинутой антиклинальной складке, в пределах которой прослежена межформационная надвиговая зона, а также распространены разрывные нарушения высоких порядков, зоны кливажа, трещины отрыва и мелкая складчатость.

Вещающие оруденение терригенные углеродсодержащие породы представлены верхне- и среднерифейской хомолхинской свитой общей мощностью 750–850 м. По литологическому составу она расчленена на три подсвиты. Верхняя подсвита сложена преимущественно тонкозернистыми кварц-серицит-хлоритовыми пелитами, алевропелитами, редко тонкозернистыми песчаниками. Все породы подсвиты обогащены органическим веществом (от 2–3 до 5–7 об. %) с максимальными содержаниями  $C_{орг}$  в средней части подсвиты, где и располагается золоторудная минерализация. Средняя подсвита хомолхинской свиты отличается более песчаным составом, а нижняя подсвита сходна с верхней, однако обе подсвиты более бедны  $C_{орг}$ .

Таким образом, месторождение Сухой Лог локализуется в ядерной части запрокинутой антиклинальной складки, его положение контролируется зоной высокой тектонической нарушенности и распространением наиболее богатых углеродом терригенных пород. В вертикальном разрезе оно документируется по распространению вкрапленной, гнездово-прожилковой и жильной кварц-карбонат-сульфидной минерализации. Эта минерализация менее интенсивна в породах, перекрывающих и подстилающих рудное тело (надрудная и подрудная зоны) и наиболее интенсивна в рудном теле, где количество сульфидов, новообразованных кварца и карбонатов достигает 5–7 об. %. Структурно-текстурные особенности руд, соотношения жильных и сульфидных новообразованных минеральных агрегатов с первично-осадочными породами показывают, что оруденение было сформировано в результате многоактных метаморфических и метасоматических процессов, развивающихся в углеродсодержащей среде, с первичной повышенной концентрацией цветных и благородных металлов (Буряк, 1964; Попов, Лисий, 1974; Викулова и др., 1977; Коткин, 1984; Немеров, 1989; Митрофанов и др., 1994). Наиболее интенсивно проявлены многостадий-



Фиг. 1. Схематическая геологическая карта района месторождения Сухой Лог (Митрофанов и др., 1994).

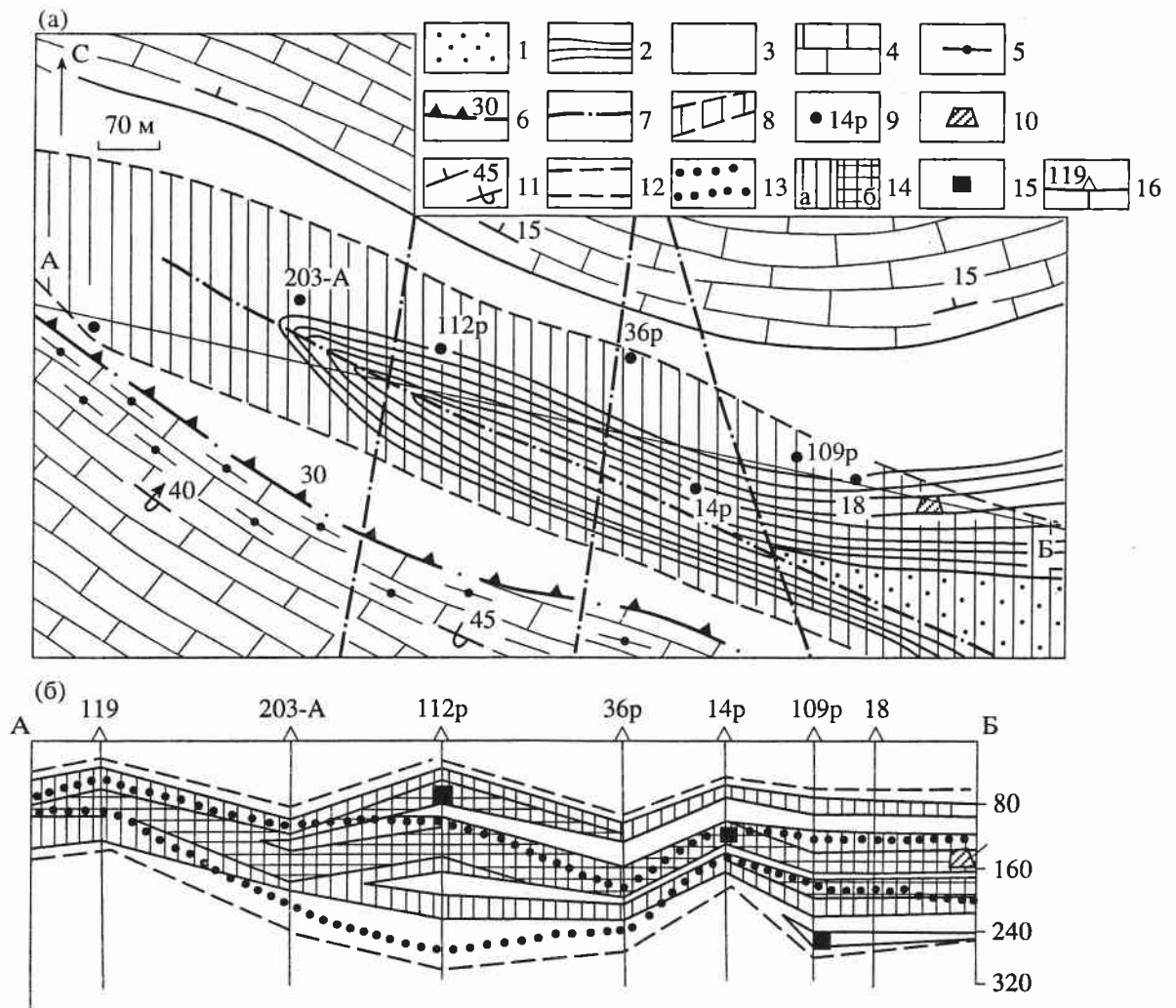
1 – фанерозойские формации чехла Сибирской платформы; 2–11 – позднедокембрийские осадочные формации: 2, 3 – вендские (2 – терригенные, 3 – углеродсодержащая илигирская), 4, 5 – верхнерифейские (4 – терригенно-карбонатные, 5 – углеродистая сланцевая вачская), 6–8 – верхне-среднерифейские (6 – карбонатно-терригенные, 7 – углеродистая сланцевая, 8 – углеродсодержащие угаханская и бужуйхтинская), 9–11 – нижне-среднерифейские (9 – терригенные, 10 – углеродсодержащая хайвергинская, 11 – терригенно-вулканогенная медвежевская); 12 – нижнепротерозойская углеродистая песчано-сланцевая формация (кевактинская); 13 – выступ архейского фундамента; 14, 15 – магматические комплексы: 14 – палеозойские гранитовые, 15 – нижнепротерозойские гранит-плагиогранитовые); 16 – контуры погребенной рифтогенной структуры; 17 – осевые части побочных рифтогенных структур; 18 – граница зоны зеленосланцевой фации метаморфизма; 19 – зоны проявления гидротермально-метасоматических процессов; 20 – месторождения и рудопроявления золота, в которых установлены содержания МПГ свыше 0.1 г/т: 1 – Сухой Лог, 2 – Вернинско-Невское, 3 – Высочайшее.

ная метасоматическая карбонатизация с формированием на ранних стадиях магнезиальных и магнезиально-железистых карбонатов, окварцевание и образование пирита.

### МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ЗОЛОТЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ СУХОЙ ЛОГ

При ограниченном (3–5 об. %) объеме рудных минералов в рудах месторождения их видовой

состав весьма разнообразен. С учетом многочисленных новых данных, полученных в настоящем исследовании, общий список рудных минералов составляет более 75 видов и минеральных разновидностей, представляющих классы самородных металлов, металлических твердых растворов и интерметаллидов, сульфидов, арсенидов и сульфоарсенидов, теллуридов и сульфотеллуридов, селенидов, висмутидов, антимонидов, фосфатов, вольфраматов, галоидов и оксидов



Фиг. 2. Схематическая геологическая карта (а) и разрез рудной зоны (б) месторождения Сухой Лог.

1–3 – хомолхинская свита рифея: 1 – нижняя пачка, 2 – средняя пачка, 3 – верхняя пачка; 4 – известняки имнянской свиты рифея; 5 – зона интенсивного прожилкового окварцевания и милонитизации (“Радостная”); 6 – зона надвига; 7 – сбросы и взбросы; 8 – зона гидротермально-метасоматической сульфидизации; 9 – скважины, изученные на платину; 10 – штольня; 11 – элементы залегания пород; 12 – границы зоны сульфидизации; 13 – границы промышленного золоторудного тела; 14 – платиноносная зона: с бедными (а) и с богатыми (б) рудами; 15 – пробы, в которых установлены и изучены минералы платиновых металлов; 16 – скважина и ее номер.

(табл. 1). Однако степень распространенности минералов неодинакова. В отличие от многих месторождений золота, в том числе связанных с черными сланцами, в рудах месторождения Сухой Лог резко преобладает пирит, а среди менее распространенных минералов главными являются богатые никелем и кобальтом сульфиды, арсениды и сульфоарсениды. К числу постоянно встречающихся, но не образующих крупных скоплений минералов относятся галенит, сфалерит, редкоземельные минералы – фосфат Се, Nd и La (монацит), алюмосиликат – фосфат Y, Gd, Dy. Более редки – кубанит, арсенопирит, молибденит, тетраэдрит, минералы  $NiFe_2S_4$  и  $Ni_3FeS_4$ , вольфрамит, шеелит. В виде единичных находок

установлены теллуриды золота и серебра, висмута и серебра, некоторые селениды и др.

#### Распространенные минералы

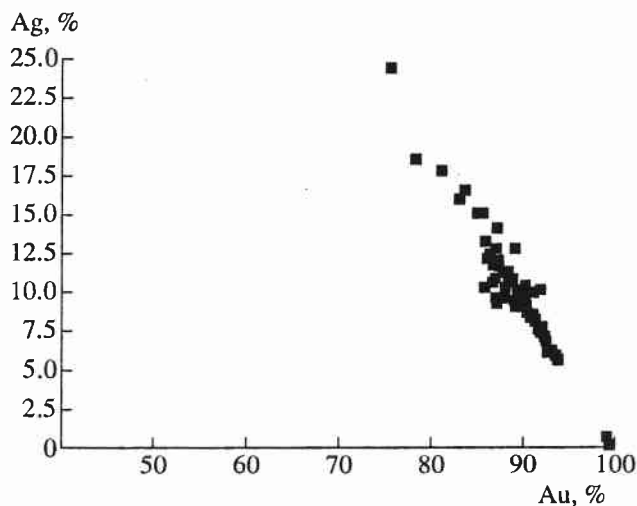
К их числу относятся самородное золото, а также минералы систем Fe–Ni–S и Ni–Co–Fe–As–S.

Самородное золото является главным промышленным компонентом руд месторождения, но не образует крупных скоплений, хотя часто отмечается в полированных шлифах под микроскопом. Основная масса самородного золота образует сростания с пиритом, пирротинном, пентландитом, галенитом, сфалеритом, халькопиритом, миллеритом, тетраэдритом, хлоритами,

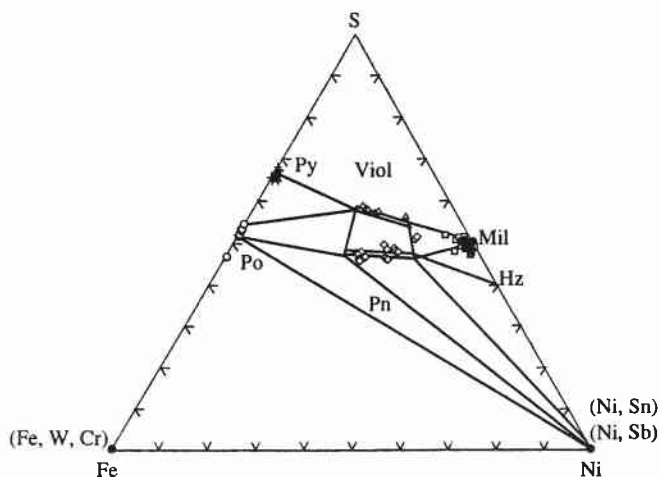
Таблица 1. Рудные минералы месторождения Сухой Лог (с использованием данных Н.А. Викуловой и др., 1977)

<i>Самородные металлы</i>		<i>Арсениды, сульфоарсениды</i>	
Золото	Au	Никелин	NiAs
Платина*	Pt	Маухерит	Ni <sub>9</sub> As <sub>11</sub>
Серебро	Ag	Раммельсбергит	NiAs <sub>2</sub>
Железо*	Fe	Смальтин	CoAs <sub>3-2</sub>
Олово*	Sn	Саффорит	CoAs <sub>2</sub>
Свинец*	Pb	Скуттерудит	(Co, Ni)As <sub>3</sub>
Медь*	Cu	Герсдорфит	NiAsS
Титан*	Ti	Кобальтин	CoAsS
Вольфрам*	W	Арсенопирит	FeAsS
Хром*	Cr	Энаргит	Cu <sub>3</sub> AsS <sub>4</sub>
<i>Металлические твердые растворы и интерметаллические соединения</i>		<i>Теллуриды и сульфотеллуриды</i>	
Золото-серебро	(Au, Ag)	Алтаит	PbTe
Золото-серебро-медь-ртуть	(Au, Ag, Cu, H)	Калаверит*	AuTe <sub>2</sub>
Амальгама серебра*	Hg <sub>3</sub> Ag	Гессит*	Ag <sub>2</sub> Te
Платина-медь* (туламинит?)	Pt <sub>3</sub> Cu	Петцит*	Ag <sub>3</sub> AuTe <sub>2</sub>
Изоферроплатина-тетраферроплатина*	Pt <sub>3</sub> Fe-PtFe	Кервеллит	Ag <sub>4</sub> TeS
Никель-олово*	(Ni, Sn)	Штютцит	Ag <sub>7</sub> Te <sub>4</sub>
Никель-сурьма*	(Ni, Sb)	Креннерит	Au <sub>4</sub> AgTe <sub>10</sub>
Свинец-олово*	(Pb, Sn)	Жозеит	BiTeS
Сурьма-олово*	(Sb, Sn)		
Свинец-сурьма-олово*	(Pb, Sn, Sb)	<i>Селениды</i>	
Медь-цинк*	(Cu, Zn)	Бурцежанит	CuSe
Теллур-висмут*	(Bi, Te)	Берцелианит	Cu <sub>2</sub> Se
Теллуrowисмутид серебра и свинца*	(Ag, Pb) (TeBi)	Умангит	Cu <sub>3</sub> Se
Теллуrowисмутид палладия и серебра*	(Pd, Ag) (TeBi)	<i>Антимониды и сульфосоли</i>	
		Дискразит	Ag <sub>3</sub> Sb
		Галеновисмутит	PbBi <sub>2</sub> S <sub>4</sub>
		Коринит	NiAsSbS
		Тетраэдрит*	Cu <sub>12</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub>
		Цилиндрит*	Pb <sub>3</sub> Sn <sub>4</sub> Sb <sub>2</sub> S <sub>4</sub>
		<i>Оксиды, фосфаты, вольфраматы</i>	
		Рутил	TiO <sub>2</sub>
		Бадделиит	ZrO <sub>2</sub>
		Магнетит	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
		Шеелит	CaWO <sub>4</sub>
		Вольфрамит	(Fe, Mn)WO <sub>4</sub>
		Оксид редких земель*	(Ce, La) <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
		Монацит*	CePO <sub>4</sub>
		Ксенотим*	YPO <sub>4</sub>
		Фосфат Nd*	NdPO <sub>4</sub>
		<i>Галоидные соединения</i>	
		Иодирит*	AgJ

Примечание. \* – минералы, установленные авторами статьи.



Фиг. 3. Состав самородного золота месторождения Сухой Лог.



Фиг. 4. Диаграмма состав-парагенезис минералов системы Fe-Ni-S в рудах месторождения Сухой Лог (ат. %).

Py – пирит; Viol – виоларит; Po – пирротин; Pn – пентландит; Mil – миллерит; Hz – хизлевудит; (Fe, W, Cr), (Ni, Sn), (Ni, Sb) – металлические твердые растворы.

турмалином, кварцем, карбонатами. Наиболее крупные выделения самородного золота обычно встречаются в составе относительно простых одно-, двухфазных агрегатов, в то время как тонкое золото с размером частиц около 10–20 мкм чаще всего входит в состав многофазных агрегатов. Частицы ультратонкого золота размером в единицы микрон нередко встречаются в виде включений в рудных сульфидных – галените и сфалерите. По составу золото Сухого Лога – высокопробное (фиг. 3). Встречаются его выделения 100%-ной чистоты, но наиболее распространено золото с пробностью 850–900. Относительно редко устанавливаются выделения золота, содержащего до

24 мас. % серебра. Такое золото, как правило, содержит примесь меди и ртути до 1 мас. % каждого элемента.

Минералы системы Fe-Ni-S. Составы минералов этой системы и их парагенетические соотношения показаны на фиг. 4.

Пирит образует несколько структурно-морфологических разновидностей. Обычно он встречается в виде крупнокристаллических порфиробластовых выделений или слагает значительные скопления в кварц-сульфидных прожилках. Распространены мелко- и тонкокристаллические агрегаты, слагающие отдельные слойки среди жильного материала или матрикса вмещающих пород. Характерны сростания пирита с пирротинном, халькопиритом, кубанитом, самородным золотом, герсдорфитом и кобальтином.

В составе пирита на рентгеновском микроанализаторе установлена постоянная примесь Ni, содержания которого варьируют от “не обн.” до 1.74 мас. %, в то время как заметные количества кобальта отмечены лишь в отдельных зернах этого минерала. Большая часть проанализированных зерен пирита содержит As (сотые–десятые доли мас. %, в одном случае – до 2.9 мас. %). В пиритах, не содержащих As, отмечены заметные концентрации сурьмы (0.02–0.15 мас. %). Известно, что Sb- и As-содержащие пириты являются концентраторами так называемого “невидимого” золота, которое может играть весьма заметную роль в балансе этого металла.

Пирротин. Количество его в изученных рудах во много крат меньше, чем пирита, но его выделения, размер которых редко превышает десятые доли миллиметра, встречаются практически постоянно. Существует несколько возрастных разновидностей пирротина, одна из которых кристаллизуется раньше пирита, а вторая – равновесная или имеющая более поздний по отношению к нему возраст. В зернах раннего пирротина присутствуют тонкие пластинчатые, иногда пламенивидные и гораздо реже – более крупные округлые либо ксеноморфные выделения пентландита. Обычны сростания пирротина с самородным золотом, а также с халькопиритом, галенитом и сфалеритом.

В минерале установлены значительные вариации соотношений Fe и S: соответственно, 58.72–62.81 и 37.2–39.88 мас. %. Содержания Ni в пирротине изменяются от “не обн.” до 0.64 мас. %, причем никелистость пирротина не зависит от его сернистости.

Пентландит встречен главным образом в виде мелких включений в пирротине, но наблюдаются также его самостоятельные выделения в равновесных соотношениях с миллеритом и хизлевудитом. Изучение пентландита на рентгеновском микроанализаторе показало весьма широкий диа-

пазон вариаций его состава: 13.71–36.3 мас. % Fe и 30.0–48.32 мас. % Ni. Величина соотношения  $\Sigma Me/S$  близка к стехиометрической (фиг. 4). В некоторых зернах пентландита установлены небольшие концентрации As и Sb, однако пентландит Сухого Лога не содержит ни Co, ни Cu.

*Миллерит* образует сростания с пиритом и другими минералами, в том числе с самородным золотом. Характерная черта его химического состава – постоянное присутствие Fe до 3.5 мас. %. В некоторых зернах минерала установлены также примеси As, Sb и Cu, иногда до десятых долей мас. %.

При минераграфических исследованиях, сопровождавшихся изучением состава на рентгеновском микроанализаторе, обнаружены единичные зерна еще двух минеральных фаз, относящихся к рассматриваемой системе. Это богатый железом виоларитоподобный минерал –  $NiFe_2S_4$  и миллеритоподобный минерал –  $Ni_3FeS_4$ .

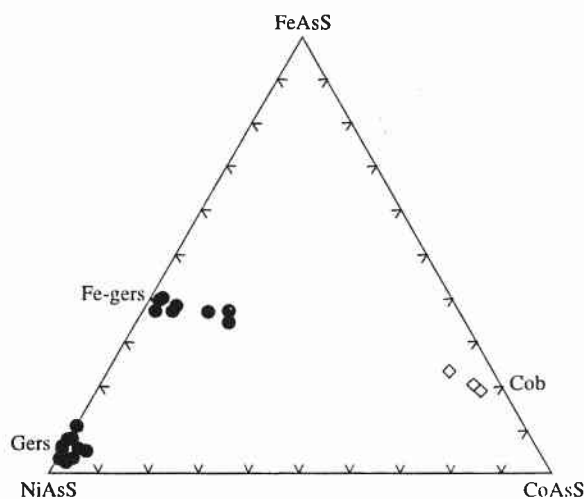
Минералы системы Ni–Co–Fe–As–S. В этой системе основную роль играют герсдорфит и кобальтин (фиг. 5).

*Герсдорфит* часто находится в сростаниях с пиритом в виде ксеноморфных включений в нем, но образует также изолированные, имеющие кристаллографическую огранку зерна и их агрегаты в жильных минералах. В сростании с герсдорфитом отмечаются также арсенопирит, сфалерит, самородное золото. По химическому составу выделяются две разновидности герсдорфита: мало-железистая (0.76–3.65 мас. % Fe) и высокожелезистая (11.8–13.93 мас. % Fe). При этом, повышенные содержания Co характерны для более железистых разновидностей герсдорфита.

*Кобальтин* обычно образует идиоморфные, с кристаллографическими очертаниями зерна. С ним наиболее часто сростаются зерна пирротина, иногда и пентландита. В отличие от герсдорфита, для кобальтина более характерны изоморфные замещения кобальта никелем (1.79–13.3 мас. %) и железом (6.5–11.5 мас. %). Судя по тому, что в отраженном свете изученный минерал изотропен, в Сухом Логе получила развитие кубическая модификация кобальтина (Pa3).

#### Второстепенные и редкие минералы

Группа второстепенных и редких минералов характеризуется наибольшим разнообразием минеральных фаз, среди которых преобладают соединения теллура с серебром, золотом и висмутом. На месторождении установлены калаверит ( $AuTe_2$ ), гессит ( $Ag_2Te$ ), петцит ( $Ag_3AuTe_2$ ), кервеллит ( $Ag_4TeS$ ), штюцит ( $Ag_7Te_4$ ), креннерит ( $Ag_4AuTe_{10}$ ) (табл. 1). Все они обычно встречаются в виде субмикронных выделений в кристаллах



Фиг. 5. Диаграмма составов минералов (ат. %) системы Fe–Ni–Co–As–S в рудах месторождения Сухой Лог. Gers – герсдорфит, Cob – кобальтин, Fe-gers – железистый герсдорфит.

пирита, с которым ассоциирует самородное золото. Теллур установлен также в составе теллуrowисмутита, мельчайшие (около 3 мкм) изометричные частицы которого вместе с фазой состава (Ni, Sb) найдены во включениях в самородном золоте. К числу редких в изученных рудах отнесены также тетраэдрит и сфалерит.

*Тетраэдрит* – один из немногих минералов сурьмы в этом месторождении, найден в сростании с халькопиритом, галенитом, пиритом, миллеритом и самородным золотом. Его состав (мас. %: Cu – 36.0, Fe – 1.2, Zn – 7.8, Sb – 27.6, As – 1.3, S – 26.2, сумма 100.1) соответствует цинковистой разновидности тетраэдрита – зандбергериту, который характерен для мезотермальных золоторудных месторождений.

*Сфалериты* Сухого Лога, которые ассоциируют с пиритом, пирротинном, галенитом и самородным золотом, представлены двумя разновидностями: маложелезистой (0.0–0.8 мас. % Fe) и умеренножелезистой (4.2–5.1 мас. % Fe). Поскольку железистость сфалерита является функцией активности серы и температуры, можно допустить, что первая была образована при  $aS_2$ , соответствующей пиритовому, а вторая – пирит-пирротинному буферу. Не исключено, что маложелезистый сфалерит был образован в ассоциации с блеклой рудой. В то же время концентрации Cd в изученных сфалеритах достаточно постоянны и находятся в интервале 0.2–0.4 мас. % вне зависимости от их железистости. В этой связи примечательна находка в рудах Сухого Лога кадмиевого аналога сфалерита – *гринокита* –  $CdS$ . В составе этого минерала определены (в мас. %): Cd – 73.0, Zn – 2.6, S – 23.4, сумма 99.0.

Большой интерес представляют находки в золото-сульфидных рудах Сухого Лога *редкоземельных минералов*, среди которых основную роль играет фосфат La, Nd и Ce (монацит – флоренсит). Он встречается постоянно среди жильного карбонатного материала, сопровождающего рудную минерализацию. Менее распространены алюмосиликат-фосфат Y, Gd и Dy и оксид La и Ce. Последний образует сферойды размером первые микроны. Среди оксидов наблюдаются также вольфрамит и шеелит.

### ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МПГ В РУДАХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ СУХОЙ ЛОГ

Идентификация стратиформных месторождений в черносланцевых толщах как платиновых объектов представляет значительные трудности, связанные с существованием объективных проблем в аналитическом определении содержаний МПГ в углеродсодержащих средах (Курский и др., 1995, Колосова и др., 1995).

В настоящей работе было использовано несколько аналитических методов определения содержаний МПГ, каждый из которых предварительно тестировался по стандартному образцу, приготовленному на основе рудовмещающих пород месторождения Сухой Лог с введением в породу точно определенных концентраций платиновых металлов в виде их солевых растворов. Затем, всеми методами, удовлетворяющими по точности воспроизведения концентраций МПГ в стандартном образце с погрешностью не более 30 отн. %, была выполнена серия сопоставительных анализов единых аналитических навесок из более 60 проб месторождения. В результате анализа было установлено, что все выбранные методы открывают в указанных пробах содержания платиновых металлов от десятых и сотых долей до 5–10 г/т. Однако по каждой конкретной пробе не всегда достигалась полная сходимость аналитических результатов, полученных различными методами. Поэтому при последующем массовом анализе проб месторождения каждая проба анализировалась двумя, а иногда тремя методами, и для оценки средних содержаний, а также определения границ распространения платиновой минерализации использовались все аналитические результаты. В число аналитических методов, применяемых в настоящем исследовании, входили схемы с химическим и пробирным вскрытием образцов, концентрированием МПГ на сорбентах и последующем определении концентрации методами ICP MS, оптической спектроскопии, спектрофотометрии, нейтронной активации, а также каталитическими реакциями. Использовался также метод вольт-амперометрического анализа.

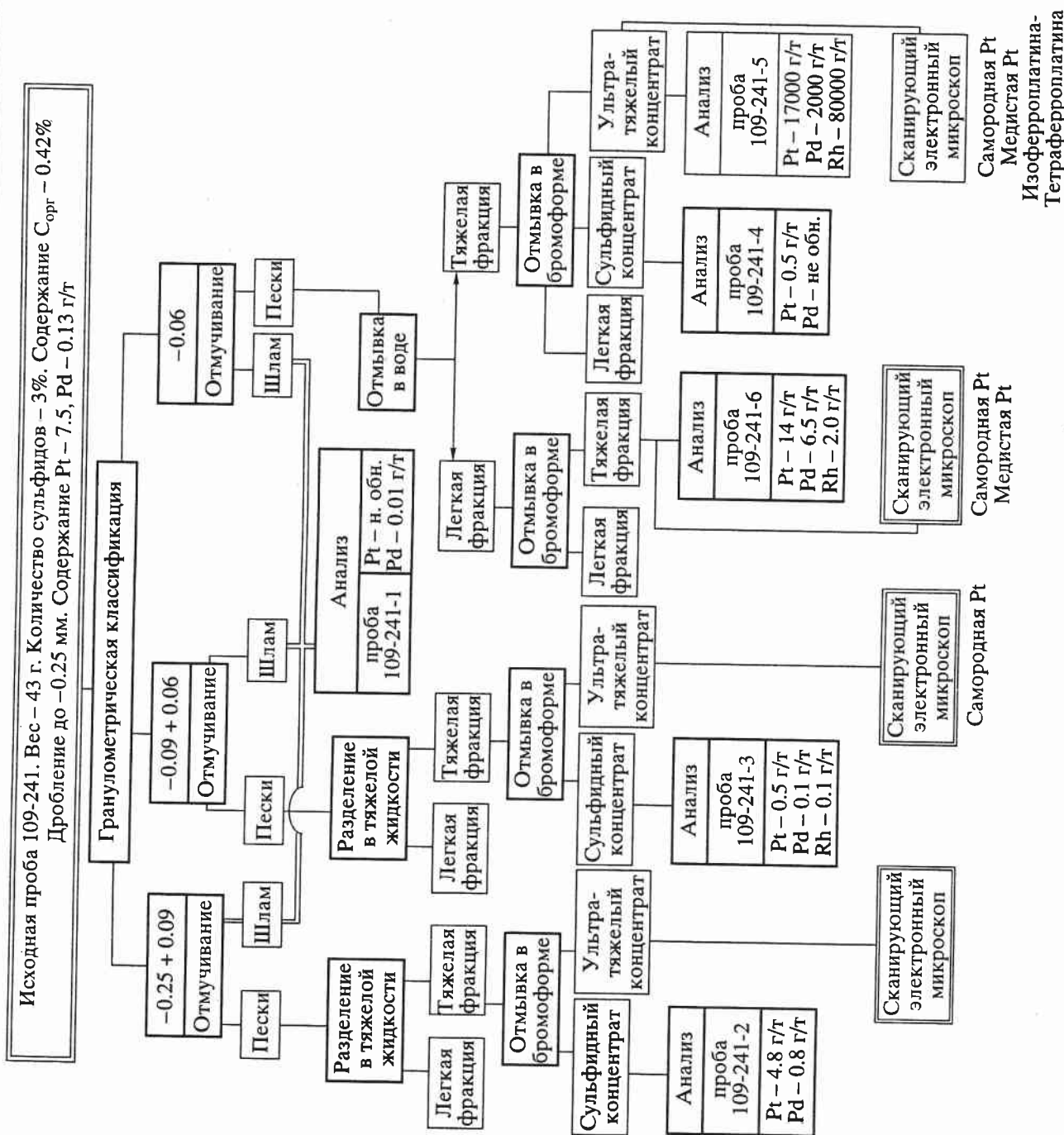
Главной проблемой оценки платиноносности месторождения Сухой Лог являлось определение форм нахождения МПГ в рудах золота. Единственной предшествовавшей находкой в этой области была диагностика с помощью электронного микроскопа включений куперита (PtS) размером 0.3–0.5 мкм в кристалле пирита (Митрофанов и др., 1994).

Отсутствие достаточного количества находок платиноносных фаз микроскопическими методами предопределило развитие исследований, главным образом, в направлениях поиска форм рассеяния МПГ в рудообразующих сульфидах, либо в связи с органическим веществом – специфическим компонентом рудовмещающих пород месторождения (Ермолаев и др., 1995).

Природные и экспериментальные данные доказывают, что некоторые сульфидные фазы образуют весьма значительной изоморфной емкостью в отношении платиновых металлов, с возможной их концентрацией в твердых растворах до нескольких десятков процентов (Дистлер и др., 1988). Наибольшая растворимость МПГ может достигаться: в пирротине – максимально до нескольких десятков г/т родия, иридия, рутения, осмия и первых единиц г/т платины; в пентландите – максимально до первых единиц процентов палладия, первых десятков процентов родия и рутения, сотен г/т иридия, осмия; в минералах изоморфной серии кобальтин–герсдорфит – до первых десятков процентов палладия, рутения, осмия, иридия, единиц процентов платины; в минералах системы Ni–As–S с содержанием родия, рутения, осмия – до первых единиц процентов.

Специальные исследования пирита из месторождений различных генетических типов с использованием высокочувствительных методов протонного, ион-ионного микроанализа показали возможность присутствия МПГ в этом минерале в количествах не более десятков мг/т. Вместе с тем, максимальные концентрации МПГ в пирротине, пентландите, кобальтине–герсдорфите, в арсенидах никеля характерны для высокотемпературных процессов. Минимальные температурные условия минералообразования, в которых отмечена платиноносность сульфидов, сульфоарсенидов составляют 550–450°C (амфиболитовая фация метаморфизма, серпентин-тремолит-бруситовый автотеморфизм гипербазитов).

Согласно исследованиям Г.М. Варшал (1994), благородные металлы входят в структурно-химическую связь с углеродом в составе кислородсодержащих функциональных групп, и чем выше степень развитости кислородсодержащих групп, тем больше вероятность связывания благородных металлов в органической матрице пород. Известно, что органическое вещество в процессах диагенеза и метаморфизма осадков испытывает



Фиг. 6. Технологическая схема разделения проб золотых руд месторождения Сухой Лог.

фазово-структурные трансформации, приводящие к образованию графитоподобных фаз.

Таким образом, при изучении форм нахождения платиновых металлов в золотых рудах Сухого Лога должны были быть рассмотрены возможные варианты связи концентраций МПГ с: 1) углеродистым веществом; 2) рудообразующими минералами; 3) собственными минеральными фазами платиновых металлов.

С этой целью использовалась комбинация аналитических методов, включающих рентгеновский микроанализ на "Cameca" MS-46 и "Comebac-Jeol", рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию, сканирующую электронную микроскопию на микроскопе "Hitachi" с энергодисперсным микроанализатором Link-10000. Эти методы обеспечивают предел обнаружения платиновых металлов до 0.01 мас. %.

Кроме того, исследования включали эксперименты по выделению фракций, богатых углеродистым веществом, сульфидных концентратов, а также специальных ультратяжелых концентратов, в которых могло происходить накопление минералов платиновых металлов. Во фракциях, богатых углеродистым веществом, с использованием хромато-масспектрометров "Hewlett Packard" и "Varian" исследовался фазовый состав органического вещества. Делались попытки выявить присутствие благородных металлов с использованием главным образом прямых методов (рентгеновский микроанализ, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия). Сульфидные концентраты исследовались методами рудной микроскопии, а массовое определение химического состава фаз выполнялось на рентгеновских микроанализаторах. На рентгеновском микроанализаторе было изучено около 1000 фаз главных, второстепенных и редких минералов в отношении возможного присутствия МПГ в виде примесного компонента.

Ультратяжелые концентраты выделялись по схеме, показанной на фиг. 6. Песковая их часть разделялась на узкие гранулометрические классы (-0.25 + 0.09; -0.09 + 0.06; -0.06 мм), а затем каждый класс разделялся в тяжелых жидкостях с домывкой тяжелых фракций в бромформе с получением легких фракций, сульфидных концентратов (аккумулирующих пирит, пирротин, халькопирит и частично сульфиды, сульфоарсениды и арсениды никеля и кобальта), а также ультратяжелых концентратов с достаточно разнообразной минералогией. Наиболее важные участки этой схемы контролировались химико-аналитическим определением содержаний МПГ, после чего соответствующие концентраты исследовались на сканирующем электронном микроскопе с определением химического состава фаз на энергодисперсионном микроанализаторе "Link-10000". Важно подчеркнуть, что ультратяжелые концентраты

выделялись из тех проб, в которых предварительно были установлены концентрации платиновых металлов от 1 до 7 г/т.

### ПЛАТИНОВАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ СУХОЙ ЛОГ

Общие закономерности распределения платиновых металлов на месторождении Сухой Лог были изучены по результатам анализа более 400 проб в вертикальном разрезе золоторудной зоны, перекрывающих и подстилающих его пород. Среди платиновых металлов главным элементом является платина, а все остальные МПГ присутствуют спорадически и в более низких концентрациях.

Значимые содержания платины (более 0.1 г/т) начинают фиксироваться с появлением в разрезе гидротермально-метасоматических пород и сульфидной минерализации (фиг. 2б), и прослеживаются практически по всему разрезу надрудной, рудной и подрудной зон. Однако более высокие концентрации (около 1 г/т и выше) фиксируются в той части надрудной зоны, которая примыкает к золоторудному телу, а также в пределах собственно рудной зоны, с развитием максимальных содержаний (свыше 3-5 г/т) в верхней части золоторудного тела. Повышенные содержания платины в подрудной зоне распределены незакономерно.

Таким образом, платиновая минерализация частично совмещается, а частично выходит за пределы интервалов с максимальными концентрациями золота.

Те же тенденции свойственны распределению других платиновых металлов, однако, содержания палладия обычно на порядок ниже содержания платины, а остальные платиновые металлы фиксируются лишь спорадически, но наибольшие концентрации (например родия до 0.8 г/т), как правило, совпадают с максимальными содержаниями платины.

#### *Платиновые металлы и органическое вещество*

При рассмотрении возможной роли органического вещества в концентрировании платиновых металлов используются следующие исходные данные:

1) среднее содержание органического углерода в золоторудной зоне месторождения близко 0.7 мас. % при локальных колебаниях от 0.2 до 5.0 мас. %; 2) в обычных пробах между содержаниями  $C_{орг}$  и валовыми концентрациями благородных металлов корреляция отсутствует (фиг. 7); 3) в органическом веществе преобладает кероген, представляющий собой неструктурированное графитоподобное вещество, лишенное функциональных групп и возникающее в процессе мета-

морфического преобразования первично-осадочного органического вещества; 4) в составе  $C_{орг}$  присутствует растворимое органическое вещество, по-видимому, представляющее реликты первичных осадков; 5) в составе органического вещества присутствует газовая фаза.

Газовая фаза представлена неуглеводородными ( $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ ) и легкими углеводородными компонентами ( $CH_4$  и  $C_2H_6$ ) с общей концентрацией летучих фаз не более 10 моль/кг.

Растворимое органическое вещество (битумоиды) могло бы представлять наибольший интерес как возможный концентратор соединений благородных металлов с органическими лигандами. Общая его концентрация в пробах рудной, надрудной и подрудной зон месторождения составляет соответственно 0.009, 0.010 и 0.008 мас. %. Фазовый состав растворимого органического вещества, идентифицированный на хромато-масспектрометрах "Hewlett Packard" и "Varian", (аналитики Н.Н. Щербина, Е.Ю. Буслаева), включает:

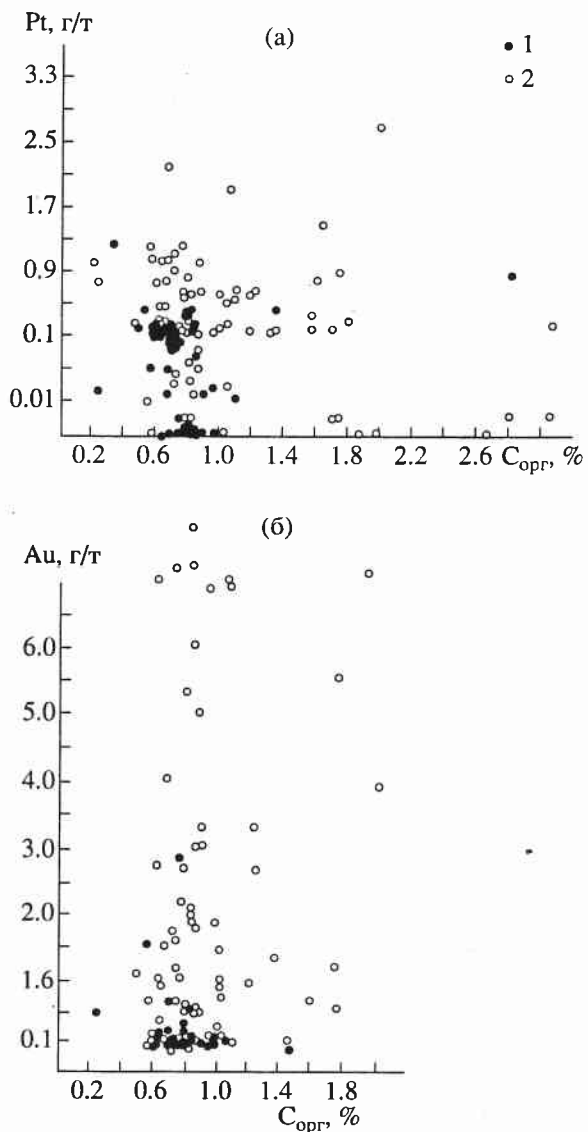
*В рудной зоне* – неразветвленные предельные углеводороды  $C_{15}$ ,  $C_{17}$ ,  $C_{19-21}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{24}$ ,  $C_{36}$ ; этиловые эфиры карбоновых кислот:  $C_{14}$ ,  $C_{18}$ ; фталаты; высокомолекулярные соединения  $C_{12}H_{17}$ ,  $C_5H_{44}$ ,  $C_{21}H_{44}$ ,  $C_8H_{34}O_8$ ; амиды.

*В надрудной зоне* – неразветвленные предельные углеводороды:  $C_{14-19}$ ,  $C_{21-25}$ ,  $C_{24}H_{50}$ ; предельные разветвленные углеводороды: тетраметил  $C_{15}$ ; этиловые эфиры карбоновых кислот:  $C_{16}$ ,  $C_{18}$ ; фталаты: диметилфталат.

*В подрудной зоне* – неразветвленные предельные углеводороды:  $C_{15}$ ,  $C_{17-20}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{24}$ ,  $C_{26}$ ; разветвленные предельные углеводороды: диметил  $C_{13}$ , тетраметил  $C_{17}$ , карбоновые кислоты  $C_9$ ,  $C_{16}$ ; этиловые эфиры карбоновых кислот:  $C_{11}$ ,  $C_{14}$ ,  $C_{18}$ ; фталаты: диметилфталат, диэтилфталат, дибутилфталат; высокомолекулярные соединения:  $C_5H_4NS$ ,  $C_{12}H_{17}ON$ ,  $C_{21}H_{44}$ ,  $C_{18}H_{34}O_4$ ; амиды. Во всех пробах обнаружены молекулярная сера в концентрации  $1 \times 10^{-10}$  г/мкл и  $S_6$  в тех же количествах.

Наиболее простой фазовый состав растворимого органического вещества характеризует рудную зону. Это, по-видимому, связано с наиболее интенсивным ее преобразованием гидротермально-метаморфическими процессами.

Присутствие установленных органических соединений (амиды, высокомолекулярные соединения и др.) допускает возможность формирования их комплексов с благородными металлами. Однако в составе хлороформенных битумоидов обнаружены летучие соединения ртути, мышьяка и кремния, но не найдены комплексы с благородными металлами.



Фиг. 7. Корреляционная диаграмма соотношений концентраций органического углерода с содержанием платины (а) и золота (б).  
1 – надрудная зона; 2 – рудная зона.

Нерастворимое углеродистое вещество, как породобразующий компонент рудовмещающих пород, представляет собой тонкодисперсную рассеянную фазу, соответствующую разупорядоченной фазе скрытокристаллических графита и графитоидов. Температура начала реакций их окисления 450–550°C, что соответствует мусковит-хлоритовой и биотит-хлоритовой субфациям зеленосланцевой фации регионального метаморфизма.

Химический состав беззольных концентратов (%): углерод – 95.22, водород – 1.44, сумма гетероэлементов (азот, сера, кислород) – 3.36.

По данным электронной микроскопии, в составе нерастворимого углеродистого вещества

выделяются два морфологических типа: каплевидный, представляющий собой детритную форму, и сотовидный, соответствующий сорбированной форме.

Для оценки возможной сорбционной или иной емкости графитоподобного вещества в отношении благородных металлов были выделены его концентраты. Установлено, что отдельные фракции нерастворимого вещества содержат золото и платиновые металлы в количествах до 10 г/т.

Идентификация возможных форм вхождения благородных металлов в составе нерастворимого углеродистого вещества выполнена с использованием оже-спектроскопии и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Оба метода не зафиксировали присутствия платиновых металлов, поскольку их содержания находятся ниже аналитического предела обнаружения элементов (0.01 мас. %). При этом, интересные данные получены для золота: рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия устанавливает присутствие золота в углеродистой массе в незаряженном состоянии ( $Au^0$ ). Это означает, что углеродистая фракция концентрирует золото в металлической (самородной) форме, вероятно, в виде ультратонких частиц, сорбированных ее активно развитой поверхностью. Подобный механизм не исключен и для платиновых металлов.

#### *Платиновые металлы и сульфидные минералы*

Химические анализы рудных концентратов и рентгеновские микроанализы отдельных фаз доказывают, что твердые растворы платиновых металлов в рудообразующих сульфидах не имеют сколько-нибудь существенного значения в балансе платиновых металлов месторождения Сухой Лог. На рентгеновских микроанализаторах было проанализировано свыше 1000 зерен пирита, пирротина, пентландита, халькопирита, миллерита, минералов ряда кобальтин-герсдорфит. В абсолютном большинстве зерен с пределами обнаружения до 0.01 мас. %, платиновые металлы не найдены. Следует подчеркнуть, что прямое определение концентраций МПГ локальными методами анализа требует весьма строгого соблюдения аналитической процедуры и тщательного выполнения требований к качеству поверхности анализируемых препаратов (полированных шлифов, искусственных запресовок и др.). Их несоблюдение в ряде случаев может дать ложные эффекты, интерпретируемые как аналитический сигнал платиновых металлов.

Вместе с тем в единичных зернах пирита, пентландита, других никелевых сульфидов, арсенидов и сульфоарсенидов при анализе на рентгеновском микроанализаторе были обнаружены локальные концентрации МПГ. Однако эти данные не могут

быть строго интерпретированы, поскольку мы не можем исключить, что подобные локальные концентрации определяются вростками субмикронных минеральных фаз МПГ, подобных микровключению куперита, обнаруженному в зерне пирита (Митрофанов и др., 1994).

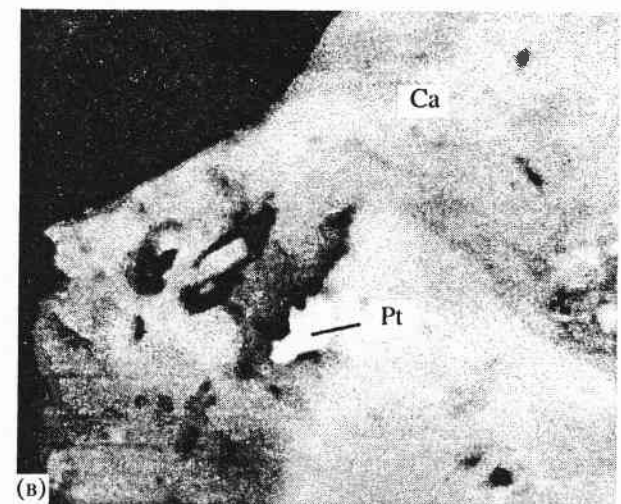
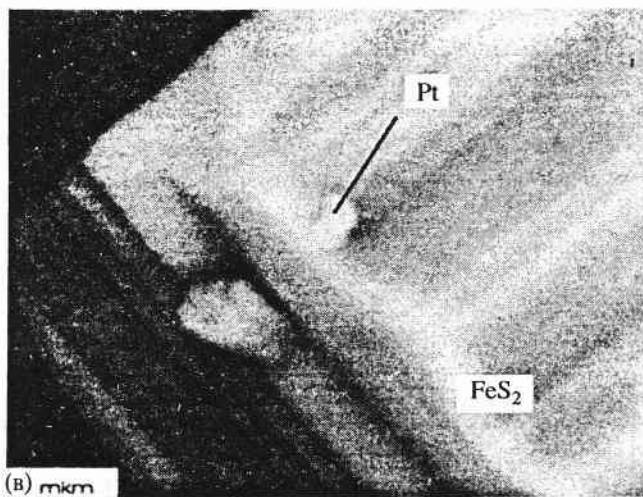
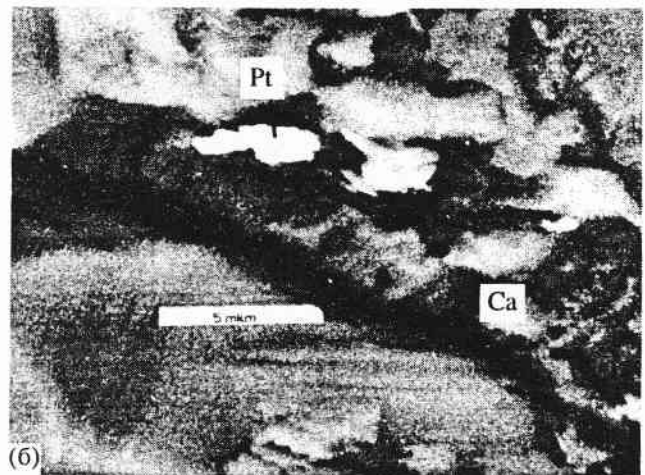
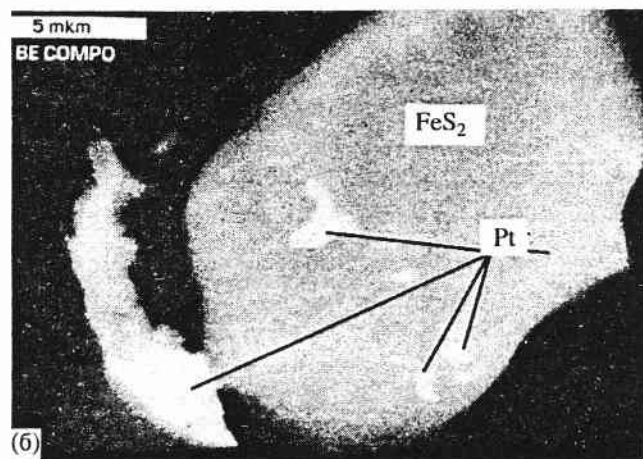
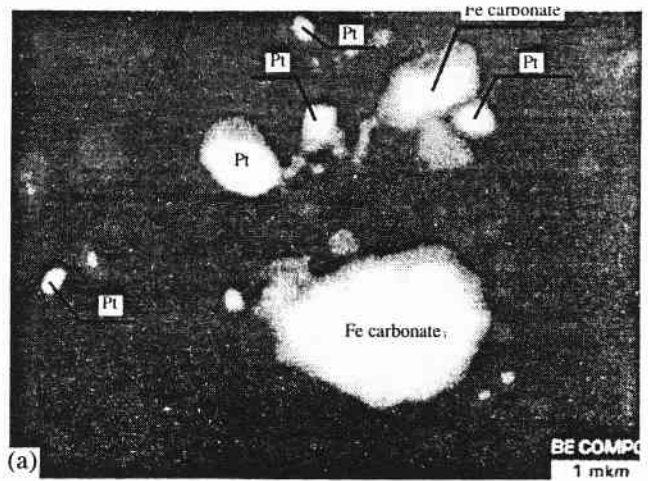
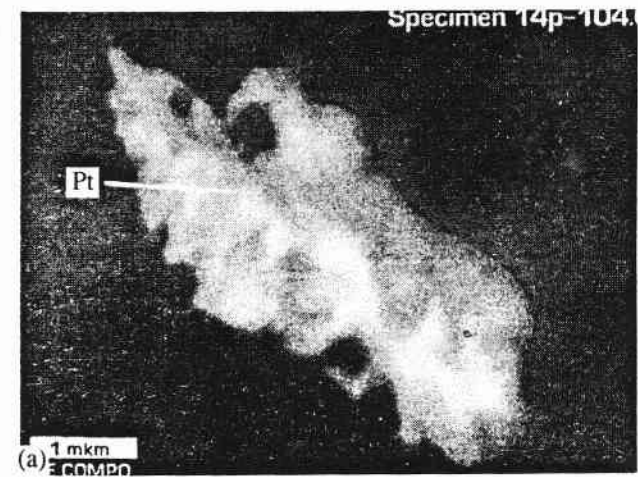
#### *Минералы платиновых металлов как главная форма их нахождения в рудах*

При изучении распределения платиновых металлов в продуктах разделения рудных проб, выполненных по технологической схеме (фиг. 6), было установлено повышение содержаний МПГ в наиболее тонких гранулометрических и наиболее высоких по плотности классах. Для одной из проб в ультратяжелом концентрате фракции  $-0.06$  мм определена сумма МПГ, равная 9.9 мас. % или 99000 г/т, что соответствует концентрату минералов платиновых металлов.

Изучение таких концентратов на сканирующем электронном микроскопе с Link-приставкой показывает, что в ультратяжелых фракциях минералы платиновых металлов (МПМ) присутствуют главным образом в виде свободных зерен и реже в сростаниях с рудообразующими сульфидами (фиг. 8, 9).

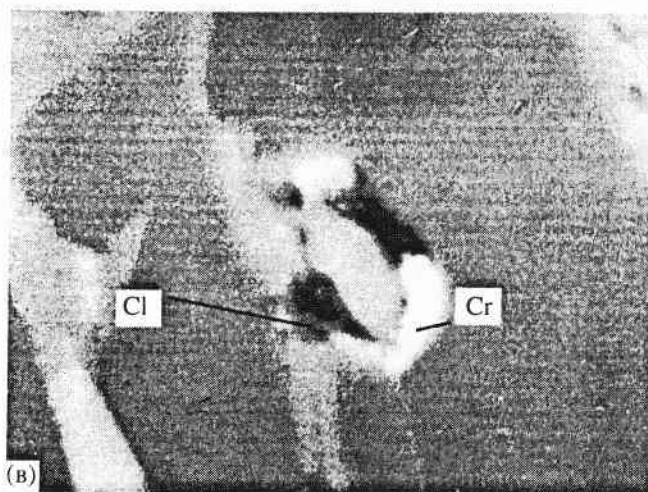
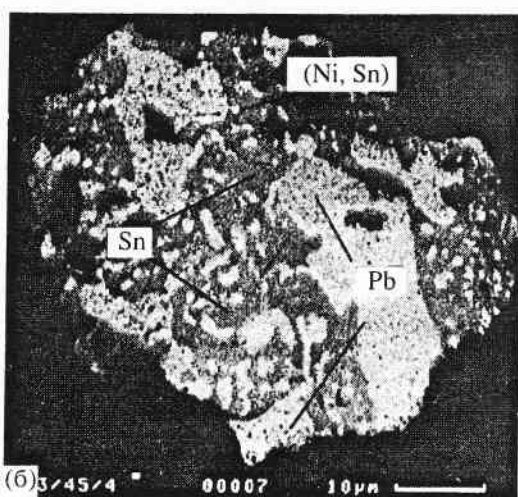
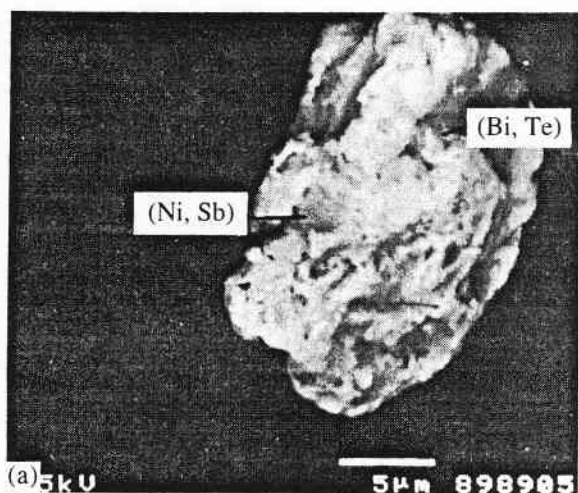
Размер зерен МПМ находится в пределах 0.5 до 10 мкм, хотя не исключено существование более крупных зерен. Самые мелкие зерна платиновых минералов обычно имеют изометрическую, близкую к округлой, форму. Показанная на фиг. 8а частица, размером более 10 мкм, имеет неправильную скелетную форму и внутреннюю структуру, весьма близкую к комковатому золоту. В сростании с пиритом форма неправильная, участками дендритовидная (фиг. 8б).

В изученных зернах (более 40) платиносодержащих фаз доминируют *самородная платина* и металлические твердые растворы системы Pt-Fe-Cu. Анализ энергодисперсионных спектров состава каждого из обнаруженных зерен показал, что наиболее распространенной фазой является *самородная платина* с низкими содержаниями примесных железа и меди. Этот минерал обнаружен как в виде самостоятельных зерен, так и в сростании с пиритом. Кроме самородной платины встречены бедные железом, но богатые медью твердые растворы платины, по-видимому, соответствующие фазе типа  $Pt_3Cu$ . В основном они присутствуют в виде свободных зерен. Также установлены относительно бедные медью, но богатые железом металлические твердые растворы, близкие по составу к *изоферроплатине* ( $Pt_3Fe$ ) или к *тетраферроплатине* (Pt, Fe). Для единичных фаз определено примерно равное соотношение меди к железу, что, вероятно, соответствует твердому раствору –  $Pt_3(Cu, Fe)$ .



**Фиг. 8.** Морфология выделений и срастания минералов платины в рудах месторождения Сухой Лог. Сканирующий электронный микроскоп.  
а – скелетный кристалл самородной платины (Pt); б – срастания медистой платины (Pt) с пиритом ( $FeS_2$ ); в – зерно железистой платины (Pt) на скульптурированной поверхности зерна пирита.

**Фиг. 9.** Морфологические особенности зерен минералов системы Pt-Cu-Fe.  
а – субмикронные зерна медисто-железистой платины из ультратяжелого концентрата; б – включения самородной платины (Pt) в железо-магнизиальном карбонате (Ca); в – зерно медисто-железистой платины (Pt) на поверхности карбоната (Ca).



**Фиг. 10.** Морфология и срastания некоторых фаз самородных металлов и металлических твердых растворов. Сканирующий электронный микроскоп. а – включения фаз состава (Ni, Sb) и (Bi, Te) в самородном золоте; б – срastания самородного олова (Sn) и свинца (Pb) и фазы (Ni, Sn); в – включение самородного хрома (Cr) в срastании с хлорсодержащей фазой (Cl) в силикате.

Обнаружены также единичные палладиевые фазы. Причем, палладий не входит в состав самородной платины и отсутствует в твердом растворе в золоте. Он образует собственные соединения класса интерметаллидов. Наиболее надежно диагностирован теллуриовисмутид палладия и серебра типа *котульскита-меренскиита* (Pd, Ag)(Te, Bi), который встречается в срastании с галенитом и сфалеритом.

Кроме того, для отдельных участков месторождения существенное значение могут иметь самостоятельные минеральные фазы родия и, возможно, других редких МПГ. Аргументом для подобного вывода служит концентрирование родия в составе ультратяжелой фракции пробы (фиг. 6) в количестве до 80000 г/т.

#### Соотношения платиновых минералов с минералами золотых руд

В этой связи особое значение имеет впервые выявленная на месторождении большая группа минералов классов самородных металлов (табл. 1). В составе класса самородных металлов, помимо известных золота и серебра, а также самородной платины, установлены самородные железо, хром, вольфрам, титан, свинец, олово, медь.

Все эти фазы диагностированы главным образом в составе ультратяжелых концентратов, нередко в срastании с другими рудными минералами (фиг. 10). Самородные металлы встречаются в виде зерен неправильной формы, сходными с минералами МПГ. Размер зерен от первых микрон до первых десятков микрон. Для ряда фаз удалось наблюдать условия их локализации в рудовмещающих породах. В частности, самородный хром встречается в интерстициях порообразующих силикатов, среди которых локализуется также фаза, содержащая хлор. Присутствие богатой хлором фазы обнаружено в ассоциации с самородными вольфрамом, платино-железными твердыми растворами и самородным золотом.

Установлены также некоторые срastания самородных металлов. Так, самородное олово и свинец образуют агрегаты, в которых каплевидные включения олова распределены в свинцовой матрице, а каплевидные выделения свинца присутствуют в оловянной матрице, что, очевидно, соответствует структурам распада Pb-Sn-твердых растворов с переменными соотношениями металлов. В состав такого агрегата входит также никель-оловянный металлический твердый раствор.

Весьма важно для характеристики рудообразующего процесса на месторождении Сухой Лог, что вся группа металлов, образующих самородные формы, наблюдается также в составе металлических твердых растворов и в составе соедине-

ний других классов: сульфидов, сульфосолей, арсенидов, теллуридов, оксидов и др.

Так, олово, кроме самородной формы, фиксируется в составе двойных и тройных металлических твердых растворах переменного состава с никелем, сурьмой и свинцом, а также в сульфосолях типа цилиндрита; железо обнаруживается в самородном виде, входит в металлические твердые растворы с хромом, титаном, вольфрамом и в многочисленные сульфиды, сульфосоли, сульфидоарсениды и т.д.; медь образует твердый раствор медь-цинк, разнообразные сульфиды и сульфосоли меди и цинка; свинец образует твердый раствор свинец-олово, интерметаллид с серебром, висмутом и теллуридом, сульфиды и сульфосоли свинца; вольфрам образует твердый раствор вольфрам-титан-железо, вольфраматы кальция (шеелит) и железа-марганца (вольфрамит). Особое значение имеет установление закономерностей смены ведущих форм платины, для которой характерен ряд: самородная платина → металлические твердые растворы системы Pt-Cu-Fe-сульфид платины.

Поскольку смена типов соединений различных классов для одного и того же металла отражает общую эволюцию процесса рудообразования на месторождении, очевидно, что самородные формы металлов закономерно возникали на определенных стадиях рудного процесса.

Во-первых, многие из самородных металлов найдены в сростаниях друг с другом в равновесных соотношениях или в виде структур распада твердых растворов, что позволяет рассматривать эту группу фаз, как одновозрастную ассоциацию. Во-вторых, выделения самородных металлов и металлических твердых растворов встречены в виде включений в минералах золотоносной ассоциации. Так во включениях в золоте установлены фазы состава (Ni, Sb), (Ni, Sn) и (Te, Bi) (фиг. 10а). Платина и металлические твердые растворы системы Pt-Fe-Cu образуют включения в пирите, ассоциирующим с золотом (фиг. 8б).

Таким образом, на диаграмме главных рудных парагенезисов, показанных на фиг. 4, металлические фазы рудообразующих элементов, в том числе и платиносодержащие, должны сосуществовать в полях устойчивости ассоциаций Fe-низкосернистый пирротин-Ni и Ni-железистый пирротин-железистый пентландит, а, возможно, Ni-пентландит-хизлевудит, в то время как основные золото-содержащие парагенезисы соответствуют более высокосернистым полям.

### О ГЕНЕЗИСЕ МИНЕРАЛИЗАЦИИ МПГ

Как уже отмечалось, генезис золотых руд месторождения Сухой Лог связан с метаморфическими и метасоматическими преобразованиями гео-

химически специализированных углеродсодержащих осадочных пород (Буряк, 1964; Коткин, 1984). По данным В.К. Немерова (1989), рудовмещающая хомолхинская серия терригенных углеродсодержащих осадочно-метаморфических пород повсеместно характеризуется аномальными фоновыми концентрациями благородных, цветных и редких металлов, что допускает концентрирование рудных элементов как следствие мобилизационных процессов. Г.М. Варшал и др. (1994) показали, что накопление платиновых металлов в составе углеродистого вещества рудовмещающих пород может происходить по механизму комплексообразования в составе кислородсодержащих функциональных групп углеродистого вещества и что при термическом или кислотном воздействии на такие породы возможен переход благородных металлов в летучие соединения. Вместе с тем в настоящее время отсутствуют убедительные данные, доказывающие достаточность механизма первичного осадочного концентрирования металлов, как главного источника рудного вещества.

#### *Стадийность гидротермально-метасоматических процессов и соотношение золотого и платинового оруденения*

Схема рудообразования на месторождении Сухой Лог включает, по данным Л.П. Викуловой, следующие этапы и стадии рудного процесса: I – синдиagenетический; II – метаморфогенный; III – гидротермально-метасоматический со стадиями и подстадиями: 1) предрудной; 2) рудной (золоторудной): а) ранней высокотемпературной; б) продуктивной золотой среднетемпературной; в) поздней низкотемпературной; 3) пострудной (Митрофанов и др., 1994).

Изложенные выше новые данные позволяют предполагать, что основной продуктивный этап платинового минералообразования предшествовал главной золоторудной стадии. На это указывают описанные выше соотношения рудообразующих минеральных фаз. На основе новых данных в табл. 2 приведена схема последовательности рудообразования месторождения Сухой Лог. При ее построении учтены данные по термобарическим характеристикам минералов, соотношениям  $\Sigma Me/S$  в пиритах и пирротинах, а также по фракционированию стабильных изотопов.

#### *Температура рудообразования*

Оценка температуры рудообразования выполнена по результатам гомогенизации флюидных включений (ФВ), содержащихся в кварце, ассоциирующем с главными рудообразующими сульфидами. В кварце установлено несколько типов ФВ, в том числе первичные и вторичные.

Таблица 2. Схема стадийности минералообразования месторождения Сухой Лог

Этапы, стадии	Минеральная ассоциация	Основные минералы
Син-диагенетические Метаморфогенные Гидротермально-метасоматические:		
1. Предрудная	Мусковит-сидерит-кварцевая	Кварц, сидерит, мусковит
2. Платиноворудная, самородного минералообразования	Mg-карбонатов, самородных металлов, низкосернистых сульфидов Fe, Ni	Самородная Pt, Pt-Fe-Cu-твердые растворы, Mg-карбонаты, низкосернистый пирротин, хизлевудит, миллерит, самородные: Fe, Cr, W, Ti, Sn, Pb, твердые растворы (Ni, Sn), (Sn, Sb), (Te, Bi), беспримесное золото
3. Золоторудная:		
а) ранняя, высокотемпературная	Сидерит-кварц-Ni, Co, Cu, Fe, Zn-сульфидная, Ni, Co-арсенид-сульфоарсенидная с теллуридами и теллуrowисмутитами Au, Ag, Pd, Pb	Кварц, сидерит, Ni-Co-пирит, халькопирит, сфалерит, кобальтин, герсдорфит, виоларит, сафлорит, креннерит, калаверит, гессит, петцит, штютцит, теллуrowисмутин, теллуrowисмутиды Ag, Pd, Pb
б) золотопродуктивная, среднетемпературная	Анкерит-сидерит-кварц-пирротин-арсенопирит-пирит-селенидная с самородным золотом	Кварц, анкерит, сидерит, пирит, арсенопирит, высокосернистый пирротин, скуттерудит, маухерит, умангит, бурцежанит, берцелианит, коринит, золото
в) поздняя низкотемпературная	Анкерит-кварц-пиритовая с дисперсным золотом	Кварц, анкерит, пирит, золото, куперит, жозеит, скуттерудит, цилиндрит, дискразит, алтаит, энаргит, иодирит, берцелианит, галеновисмутит
4. Пострудная	Сидерит-анкерит-кварцевая	Кварц, сидерит, анкерит

Размер первичных ФВ в среднем не превышает 20–30 мкм. Присутствуют как газовые включения, так и газожидкие с различными соотношениями фаз. Достаточно часто встречаются вакуоли, заполненные только раствором. Наблюдаются первичные трехфазные включения газосолевого состава с небольшим количеством раствора. В составе отдельных ФВ присутствует жидкая углекислота. По первичным включениям, пригодным для термометрии и имеющим газожидкий состав с различным соотношением фаз, общий температурный диапазон их гомогенизации определен в 310–180°C. Характерная черта всех кварцевых агрегатов – неравномерное распределение ФВ.

В количественном отношении преобладают зерна кварца с относительно малым количеством ФВ, часто имеющих форму негативного кристалла. Температура их гомогенизации равна 310–280°C. Можно предполагать, что основная масса кварца и парагенных ему рудных минералов формировалась именно в этом температурном интервале. Наряду с этим, в таких же кварцах встречены первичные существенно жидкие включения с температурой растворов не выше 60–50°C.

Вторичные включения наблюдаются редко. В ряде случаев в них можно отметить преобладание газовой составляющей. Присутствуют вторичные рассольные включения. Измеренные температуры гомогенизации двухфазовых вто-

ричных ФВ с равномерным соотношением фаз варьируют в интервале 240–150°C.

Применительно к кварцу, ассоциирующему с разновозрастным пиритом, ранее были определены максимальные температуры гомогенизации ФВ: кварц в ассоциации с ранним никель-кобальт-содержащим пиритом – 395–390°C; кварц в ассоциации с пиритом основной золотоносной стадии рудоотложения – 275–190°C; кварц послерудной стадии минералообразования – 150–50°C. Подобные температурные вариации нередко фиксируются во включениях в пределах одного зерна кварца.

Таким образом, основная масса золотоносных кварц-пиритовых прожилков образовалась из достаточно концентрированных гидротермальных растворов (до 26% в экв. NaCl) с начальной температурой не ниже 310–280°C.

Эти данные характеризуют главным образом термальный режим процесса формирования основной массы сульфидов и других рудных минералов, а также отложения основной массы золота. Применительно к оценке температур платинового минералообразования максимальные температуры золоторудного процесса, по-видимому, являются минимальной температурной границей, выше которой формировалась ассоциация самородных металлов и металлических твердых растворов, включая платиновую минерализацию.

Таблица 3. Изотопно-геохимическая характеристика пород и руд месторождения Сухой Лог

Породы, руды, минералы	$\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}, \text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}, \text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{карб}}, \text{‰}$	$\delta^{34}\text{S}_{\text{сульфид}}, \text{‰}$
Растворимое органическое вещество	-28.7			
Нерастворимое органическое вещество	-17.5			
Породы надрудной зоны месторождения с относительно слабым проявлением гидротермально-метасоматических процессов	-16.3	-8.68		+11.09
Породы рудной зоны месторождения с интенсивным проявлением гидротермально-метасоматических процессов	-11.64	-0.66	+19.6	+9.35
Породы подрудной зоны месторождения с относительно слабым проявлением гидротермально-метасоматических процессов	-13.20	-2.28	+24.8	+11.12
Пирит ранней стадии рудообразования				+3.6
Пирит золоторудной стадии				+8.5
Пирит пострудной стадии				+15.3

Примечание. Анализы выполнены Л.П. Носиком в лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ИГЕМ РАН.

*Изотопно-геохимические данные о рудообразовании*

Совокупность изотопно-геохимических данных обнаруживает существенную геохимическую специализацию рудной зоны месторождения относительно пород, ее окружающих (табл. 3).

Фоновые значения изотопных соотношений углерода ( $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ ) для пород, слабоизмененных гидротермально-метасоматическими процессами, определяется нормальным фракционированием легкого изотопа в растворимом и летучем органическом веществе (-28.7‰), близком по составу к битум-нефтяному веществу и нерастворимому органическому веществу (-17.5‰). Отметим также преобладание нерастворимого органического вещества в породах, непосредственно прилегающих к рудной зоне, значения  $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$  для этих пород - 16.3‰.

На этом фоне изотопный состав органического и карбонатного углерода рудной зоны характеризуется заметным утяжелением (-11.64‰), а в подстилающих рудную зону породах вновь наблюдается облегчение изотопных соотношений (-13.2‰). При сопоставлении этих данных с эволюцией изотопного состава карбонатного углерода обнаруживается идентичная картина распределения с максимумом в пределах рудной зоны (-0.66‰) и облегчением состава в надрудной и подрудной зонах -8.68‰ и -2.28‰ соответственно. Таким образом, утяжеление изотопного состава общего углерода рудной зоны объясняется, вероятно, следствием вклада карбонатного углерода. Поскольку суммарная концентрация общего углерода почти одинакова во всех породах, это указывает на формирование карбонатов рудной зоны главным образом за счет окисления органического углерода. По-видимому, этот процесс

способствовал появлению самородных металлов на ранних стадиях рудного процесса.

Исследования изотопов серы также выявляют аномальное облегчение изотопных соотношений ( $\delta^{34}\text{S}\text{‰}$ ) непосредственно в рудной зоне и утяжеление изотопного состава серы в надрудных и подрудных породах. Для анализа этих данных привлечены результаты изучения эволюции изотопного состава серы пирита, показывающие закономерное утяжеление состава серы от ранних к поздним его генерациям. Их сопоставление свидетельствует о том, что на фракционирование изотопов могли влиять минимум два фактора: 1) протекание рудообразующего процесса в весьма значительном температурном диапазоне; 2) существование эндогенного источника привноса серы в зону рудоотложения с существенной долей мантийной серы.

Этот вывод допускает возможный привнос в рудообразующую систему также и металлических компонентов, в том числе и в виде хлоридных соединений. Последнее аргументируется сосуществованием хлорсодержащих фаз с главными рудными минералами.

**БЛАГОДАРНОСТИ**

Работы выполнялись по Проекту "Оценка платиноносности месторождения Сухой Лог" при финансовой поддержке горнорудной компании "Star Technology Ltd.", Проекту по платиновым металлам Государственной научно-технической Программы "Ресурсосберегающие и экологически безопасные процессы горно-металлургического производства", а также научно-исследовательским темам "Геохимия рудообразующих систем платиновых металлов" и "Флюидный режим и факторы формирования разномасштабных золоторудных месторождений основных формационных типов"

плана НИР ИГЕМ РАН, "Оценка платиноносности месторождения Сухой Лог" плана НИР института ВостСибНИИГиМС.

Авторы признательны заместителю председателя Комитета по геологии и использованию недр при Правительстве РФ Б.А. Яцкевичу и главному геологу АО "Лензолото" Н.П. Попову за постоянное внимание и конструктивное содействие выполнению исследований. Мы благодарим Е.Ю. Буслаеву, Т.И. Голованову, Л.П. Носика, Т.Л. Крылову, М.В. Кузнецову, В.Г. Хитрова, Г.А. Валл, Г.С. Кацнельсон, Э.А. Развозжаеву за выполнение аналитических исследований. Авторы признательны Г.М. Варшал и Ю.П. Дикову за конструктивное обсуждение результатов исследования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Буряк В.А. О влиянии процессов регионального метаморфизма на развитие золото-сульфидной минерализации в центральной части Ленского золотоносного района // Физико-химические условия магматизма и метасоматизма. М., 1964. С. 184–189.
- Варшал Г.М., Велюханова Т.К., Кошечева И.Я., Баранова Н.Н., Козеренко С.В. О концентрировании благородных металлов углеродистым веществом пород // Геохимия. 1994. № 6. С. 814–823.
- Викулова П.П., Серова Н.Л., Новикова А.Н. Комплексование методов при изучении пирита одного из золоторудных месторождений Восточной Сибири // Новые методы анализа минерального сырья. Иркутск: ВостСибНИИГиМС, 1977. С. 46–54.
- Дистлер В.В., Гроховская Т.Л., Евстигнеева Т.Л., Служеникин С.Ф., Дюжиков О.А. Петрология сульфидного магматического рудообразования. М.: Наука, 1988.
- Ермолаев Н.П., Созинов Н.А., Чиненов В.А., Горячкин Н.И., Никифоров А.В. Форма нахождения платиновых металлов в рудах золота в черных сланцах // Геохимия. 1995. № 4. С. 524–532.
- Колосова Л.П., Ушинская Л.А., Аядадьшикина А.Е. Оценка достоверности методов определения содержания металлов платиновой группы в углеродистых сланцах // Платина России. М.: Геоинформмарк, 1995. Т. II. Кн. I. С. 174–177.
- Коткин В.В. Металлогеническое районирование, критерии прогноза и модель формирования золотого оруденения одного из рудных районов Восточной Сибири // Геология и полезные ископаемые юга Восточной Сибири. Иркутск, 1984. С. 1–20.
- Курский А.Н., Витоженец Г.Ч., Мандругин А.В., Пучкова Т.В. Проблема аналитического определения металлов платиновой группы в рудах черносланцевых комплексов // Платина России. М.: Геоинформмарк, 1995. Т. II. Кн. I. С. 159–174.
- Митрофанов Г.Л., Немеров В.К., Коробейников Н.К., Семейкина Л.К. Платиноносность позднекембрийских углеродистых формаций Байкало-Патомского нагорья // Платина России. Проблемы развития минеральной сырьевой базы платиновых металлов. М.: Геоинформмарк, 1994. С. 150–154.
- Немеров В.К. Геохимическая специализация позднекембрийских черносланцевых толщ Байкало-Патомского нагорья: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 1989. 19 с.
- Полеховский Ю.С., Волошин А.В. Новые природные системы платиноидов в метасоматитах Южной Карелии // Докл. АН СССР. 1990. Т. 315. С. 700–703.
- Попов Н.П., Лисий В.А. Перспективный тип золоторудных месторождений Сибири // Разведка и охрана недр. 1974. № 7. С. 4–9.
- Созинов Н.А., Ермолаев Н.П., Чиненов В.А., Хорошилов В.Л., Горячкин Н.И., Колпакова Н.А. Оценка платиноносности золоторудного месторождения Сухой Лог // Платина России. М.: Геоинформмарк, 1995. Т. II. Кн. 2. С. 149–156.
- Chen Nansheng, Yang Xiuzhen, Liu Dehan, Fan Delian, Wang Lianfang. Cambrian black argillaceous and arenaceous rock series in South China and its associated stratiform deposits // Mineral. Deposita. 1982. № 1(2). P. 39–51.
- Coveney R.M., Nansheng C. Ni–Mo–PGE–Au-rich ores in Chinese black shales and speculations on possible analogues in the United States // Mineral. Deposita. 1991. V. 26. P. 83–88.
- Kucha H. Platinum group metals in Zechstein copper deposits. Poland // Econ. Geol. 1982. V. 77. P. 1578–1591.
- Hulbert L.J., Gregoire D.C., Pactung D., Carne R.C. Sedimentary Nickel, Zinc and PGE Mineralization in Devonian Black Shales at the Nick Property, Yukon, Canada: A New Deposit Type // Explor. Mining Geol. 1992. V. 1. № 1. P. 39–62.