

М.С.Сахарова, Т.В.Посухова, С.К.Ряховская

## МОРФОГЕНЕТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА САМОРОДНОГО СЕРЕБРА

Морфология и внутреннее строение самородного серебра относятся к важнейшим типоморфным признакам, отражающим особенности его генезиса. Формы выделения самородного серебра, строение минеральных агрегатов, рельеф поверхности и другие микроморфологические признаки определяются условиями возникновения его индивидов - механизмом и кинетикой кристаллизации, концентрацией и особенностями питающей среды, температурой, давлением и другими факторами. Вместе с тем ряд морфологических признаков серебра конвергентен, и сходные формы могут возникать в различных условиях. В связи с этим при изучении генезиса индивидов серебра целесообразно использовать совокупность морфологических, субструктурных и других признаков его индивидов.

Комплексный подход к изучению серебра позволяет реконструировать условия его кристаллизации и установить генетическую природу, что имеет важное практическое значение. Вместе с тем в отличие от самородного золота, морфогенетические признаки самородного серебра продолжают оставаться недостаточно изученными.

Образование самородного серебра связано с эндогенными гидротермальными процессами, с явлениями регенерации серебра в эндогенных условиях и с зонами гипергенеза рудных месторождений. Эндогенное самородное серебро развито преимущественно в средне-низкотемпературных гидротермальных месторождениях, среди которых важнейшими минеральными типами с его самородной формой являются серебряные и золото-серебряные месторождения малых и средних глубин, развитые в вулканогенных областях. Эндогенное серебро часто встречается в месторождениях благородной серебряной формации (серебро-арсенидных), менее оно проявлено в серебро-оловянных типах. Известностью пользуется тип карбонатных жил с самородным серебром (месторождение Консберг, Норвегия).

Гипергенное самородное серебро широко распространено в зонах окисления и цементации серебряных и серебросодержащих типов месторождений - золото-серебряных, серебро-арсенидных, серебро-полиметаллических. Оно также проявлено в колчеданных, полиметаллических и некоторых других типах.

Процессы регенерации серебра, сопровождающиеся возникновением его самородной формы, остаются недостаточно раскрытыми. Однако высокая подвижность Ag позволяет считать, что подобные явления имеют место в ряде типов месторождений. Регенерация серебра обычно связана с поздними стадиями формирования сереброносных ассоциаций, с многостадийностью процесса рудообразования, сопровождающейся температурными инверсиями, явлениями внутрирудного метаморфизма либо переотложением серебра в полигенных образованиях или при последующем метаморфизме.

В настоящей работе обобщены результаты морфогенетического изучения эндогенного, регенерированного и гипергенного самородного серебра из месторождений золото-серебряной формации вулканогенного пояса Востока СССР, разбираются морфоструктурные особенности серебра, полученного экспериментально при моделировании процессов его образования в различных условиях и дается морфогенетическая классификация самородного серебра.

## Методика исследований

Изучение морфологических особенностей самородного серебра проводилось методами просвечивающей (ЭВМ-100Л) и растровой ("Квик-Скан-107, США; JSM-T20", Япония; "Самскап-4", Англия) электронной микроскопии в лабораториях геологического факультета МГУ.

Исследования проводились методом одноступенчатых реплик с частиц серебра или двухступенчатых углово-коллоидных реплик, полученных с предварительного протравленного шлифов. В первом случае выделения самородного серебра наклеивались на стекло и напылялись тонким слоем угля. Полученные реплики отделялись растворением зерен серебра в  $\text{HNO}_3$ . Двухступенчатые реплики готовили с помощью размягченной коллодиевой пленки, которую после получения отпечатка поверхности аншлифа напыляли углем и растворяли в ацетоне. Методом растровой электронной микроскопии были изучены свежие и протравленные в  $\text{HNO}_3$  (1:1) сколы полиминеральных агрегатов и отдельные мономинеральные выделения. Образцы предварительно очищались в спирте на ультразвуковом диспергаторе УЗД-2 в течение 5-10 мин. Исследовались напыленные углеродом (толщина пленки - десятки  $\text{Å}$ ), а затем золотом (около 100  $\text{Å}$ ) образцы, что позволило избежать явления зарядки поверхности образцов и повысить коэффициент вторичной эмиссии при увел. 35-100000 в высоковольтном режиме, что обеспечивало глубину резкости изображения 0,6-0,8 мм и разрешение до 100  $\text{Å}$ . Широкий диапазон рабочих увеличений обеспечивал возможность наблюдений макро- и микроструктурных особенностей минералов.

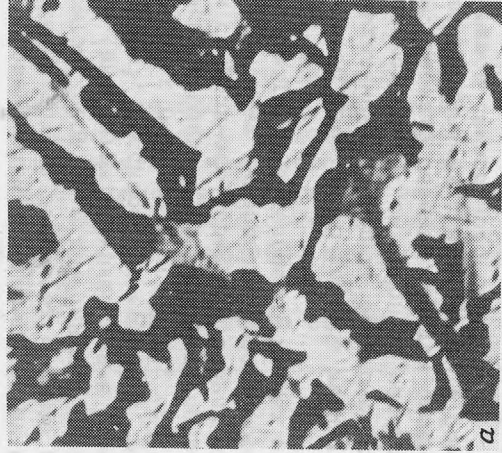
### Эндогенное самородное серебро

Кристаллизация самородного серебра из гидротермальных растворов связана преимущественно с поздними продуктивными стадиями рудоотложения, в которых оно выделяется в ассоциации с поздними сульфидами и сульфосолями или завершает их образование. Оно может быть представлено несколькими генерациями и связано также с более ранними стадиями процесса, в которых обычно тяготеет к сульфидам или сменяет их образование. К основным причинам, обуславливающим возникновение самородного серебра, относятся: 1) окислительно-восстановительные реакции, приводящие к образованию его самородной формы; 2) изменение физико-химических параметров гидротерм - температуры, давления, степени пересыщения растворов; 3) высокая концентрация  $\text{Ag}$  при низких парциальных давлениях серы; 4) наличие в рудах активных осадителей серебра - сульфидов (галенит, пирит, халькопирит), родонита,  $\text{Mn}$ -карбонатов и др.

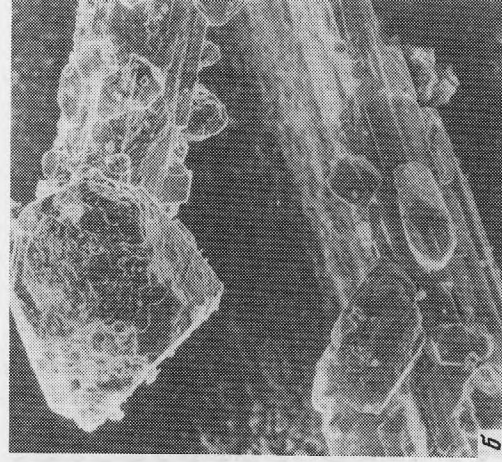
Первичное самородное серебро характерно для месторождений золото-серебряной формации кварцевого, кварц-адулярового, кварц-родонит-родохро-

Рис. 1. Морфология выделений первичного эндогенного серебра

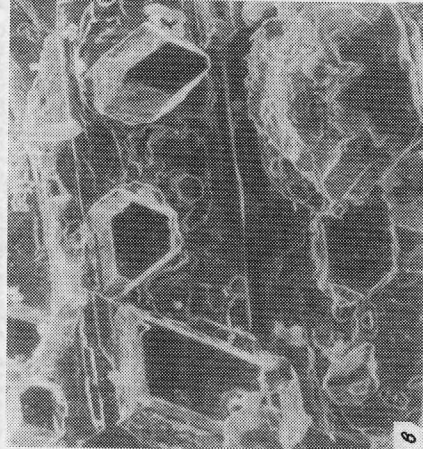
а - мirmekитовые срастания самородного серебра с пиритом. Изображение в обратно-отраженных электронах с вещественным контрастом, увел. 200; б - искаженные кубооктаэдры со следами растворения (скипетровидные выделения). Изображение во вторичных электронах, увел. 144; в - острорезберные уплощенные октаэдрические и кубооктаэдрические кристаллы, увел. 368; г - объемные дендритовидные срастания изометричных и уплощенных кубооктаэдрических форм, увел. 60; д - сrostки закрученных спиралевидных кристаллов, увел. 19



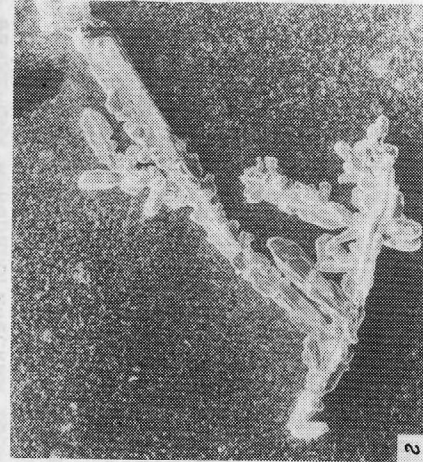
1



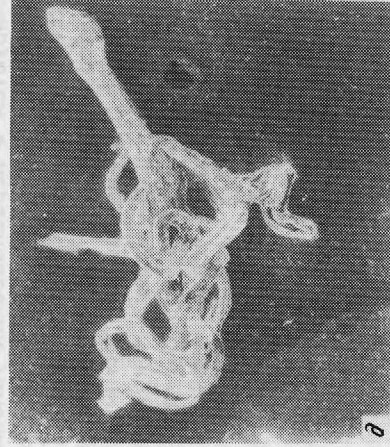
2



3



4



5

зитового и кварц-карбонатного состава, образующихся в условиях малых и средних глубин. В рудных телах оно часто развито в агрегатах с более ранними сульфидами - галенитом, халькопиритом, пиритом и др. Типичны парагенезисы самородного серебра с аргентитом (акантитом), сульфосолями серебра (фрейбергитом, пираргиритом, стефанитом), гесситом. Свообразны мirmekитоподобные сростки самородного серебра с пиритом (рис. I, а), его тонкие выделения в халькопирите. Типичны гетерофазные образования, представленные неправильными обособлениями самородного серебра в зернах электрума и кустелита, а также его каймы вокруг этих минералов. Широко проявлены его скопления в агрегатах родонита, а также в кварцевых жеодах и карбонатах.

Характерной морфологической особенностью первичного серебра является большое разнообразие форм и размеров выделений. Последние варьируют от нескольких микрон и тысячных долей миллиметра до I см и более; чаще других распространены фракции 0,25-0,5 мм. Нередко развиты сростки сложного строения и мелкие самородки размером до нескольких сантиметров. В бананцевых участках отмечено укрупнение размеров самородного серебра.

К важнейшим минералогическим формам самородного первичного серебра относятся правильные и искаженные кристаллы и их сростки, дендритовые образования, а также проволочные выделения и сростания сложной и неправильной формы (см. таблицу).

Среди ограниченных кристаллов эндогенного серебра преобладают октаэдры и кубооктаэдры, изометричные или уплощенные. Последовательная смена простых форм в ряду  $\{III\}$ ,  $\{II0\}$ ,  $\{100\}$  связывается со снижением температуры и пересыщением растворов, подобная эволюция отмечается для целого ряда минералов кубической сингонии (галенита, флюорита) [6]. Доминируют формы со сглаженными или даже скругленными ребрами, встречаются остросереберные искаженные кристаллы. Чаще всего эти образования наблюдаются в пустотах и друзовых полостях кварц-карбонатных агрегатов. Наиболее распространены дендритовидные сростки, скипетровидные образования, сочетающие плоские и объемные формы (рис. I, б). Дендритовидные сростки развиты в тонких трещинах, также среди кварцевых, кварц-адуляровых, кварц-хлоритовых агрегатов и формируются в неравновесных условиях при неравномерном поступлении вещества. Они состоят из закономерно ориентированных октаэдрических и кубооктаэдрических кристаллов (рис. I, г).

Для эндогенного серебра характерны проволочковидные формы, усы, образованные сросшимися по оси  $L_4$  субиндивидами вытянутой формы или нитевидными микрокристаллами, спирально или сложно закрученными (рис. I, д). Образование подобных форм связывают обычно со специфическими условиями кристаллизации, возникающими вследствие неравномерного питания агрегата в процессе роста [7]. Такие условия типичны для заключительных этапов отложения минералов, сопровождающихся широким развитием аутометаморфических процессов.

Изучение микроморфологии естественных поверхностей зерен первичного самородного серебра показало, что для них характерен пористый микрорельеф, обусловленный тонкими сростаниями (вязью) мельчайших спирально закрученных нитевидных кристаллитов, имеющих в поперечном сечении от 2 до 5 мкм при длине 20-100 мкм (рис. 2, а). По данным ряда авторов [4, 7], необходимыми условиями образования нитевидных кристаллов являются анизотропия прочности химических связей - удлинение кристалла серебра  $\{II0\}$  отвечает направлению с минимальным периодом идентичности [7], а также неодинаковое строение реальной поверхности граней растущего кристалла, т.е. наличие дислокаций, обусловленное кристаллизацией из низкотемпера-

Морфогенетическая классификация самородного серебра

Морфологическая группа серебра	Морфология выделений	Субструктура и микроморфология	Условия образования
Правильные кристаллы и их сростки	Совершенные и несовершенные кристаллы октаэдрического или кубооктаэдрического габитуса, иногда уплощенные, со сглаженными ребрами, реже острые, искаженные; сложные сростки назакономерно ориентированных кристаллов	Скульптурирование граней, ступенчатая микроскульптура их монокристалльных участков, образованная в результате послыного роста. Линейные и тригональные акцессории роста на гранных поверхностях	Эндогенная первичная кристаллизация из гидротермальных растворов в условиях свободного роста в пустотах, занорышах и друзовых полостях, в легко проницаемых средах (карбонаты, пористые метасоматиты)
Дендриты и дендритоиды	Объемные дендриты и дендритовидные сростки закономерно ориентированных кристаллов октаэдрического габитуса, часто уплощенные по $L_3$ или удлиненные по $L_2$ Плоские дендриты в виде закономерно сросшихся пластин гексагонального облика - сильно уплощенных октаэдрических кристаллов Сложные образования, сочетающие плоские и объемные дендритоидные формы	Следы растворения (ямки травления) на гранях отдельных индивидов. Мозаично-блоковое строение субиндивидов  Метазернистая субструктура отдельных пластин  Мозаично-блоковая и ступенчатослоистая микроструктура поверхности отдельных индивидов	Эндогенная первичная кристаллизация в вязких кварцевых средах в неравновесных условиях при неравномерном поступлении вещества  Процессы гипергенного образования в трещинах, кавернах или на поверхности вторичных минералов железа, марганца, меди  Эндогенная первичная кристаллизация или регенерация серебра в кварцевых и поздних кварц-карбонатных жилах

Таблица (продолжение)

Морфологическая группа серебра	Морфология выделений
Проволочные выделения и их сростки	Проволочные причудливо изогнутые выделения, образованные сросшимися по $L_4$ субиндивидами вытянутой формы
Пластинчатые и пленочные выделения	Тонкие пластинки, пленки или чешуйки, реже сильно уплощенные комковидные выделения  Интерстициальные выделения пластинчатой формы

Субструктура и микроморфология	Условия образования
<p>Ступенчато-слоистый микро- рельеф монокристалльных участ- ков. Мозаично-блоковая микро- структура стволовой части вы- делений. Присутствие новооб- разованных микрокристаллов Волокнистое субмикростроение отдельных монокристалльных ин- дивидов; микропсевдоморфозы по проволочному самородному серебру</p>	<p>Преимущественно эндогенные процес- сы первичной кристаллизации или регенерации в условиях свободно- го роста в полостях. Возможно ги- пергенное образование в зоне вто- ричного обогащения Эндогенная первичная кристалли- зация или регенерация в процессе направленного роста в асимметрич- ных средах с односторонним пита- нием</p>
<p>Метазернистая субструктура, об- разованная кубическими микро- кристаллами на субстрате с ден- ритным внутренним строением Скульптуры совместного роста на поверхности зерен; микро- блоковое или двойниковое строе- ние, ажурная субструктура, сло- женная нитевидными микрокрист- таллами Наличие зародышевых новообра- зований и участков реликтового строения</p>	<p>Гипергенное образование се- ребра в ассоциации с вто- ричными минералами меди, же- леза, марганца, акантитом Эндогенная первичная кристал- лизация или регенерация сереб- ра в условиях стесненного рос- та в силикатных, кварцевых или сульфидных средах</p>

Неправильные  
выделения

Комковатые, амебовидные, неправильные выделения, представленные сростаниями нескольких индивидов изометричной или округлой формы

Сложные формы  
(образованные  
совокупностью  
различных  
морфологи-  
ческих типов)

Скипетровидные сростки, обусловленные нарастанием правильных кубооктаэдрических и октаэдрических кристаллов на проволочковидные и вытянутые выделения

Сростания скрученных нитевидных или проволочных выделений и комковатых частиц изометричной и неправильной формы

Выделения уплощенной формы, образованные реликтами правильных кристаллов и дендритовидных форм

Формы сроста-  
ния и замеще-  
ния

Каймы, мирмекитоподобные сростания и псевдоморфозы серебра по сульфидам и жильным минералам

---



Мозично-блоковая микроструктура. Присутствие линейных и тригональных аксессуариев роста на монокристалльных участках

Эндогенная гидротермальная кристаллизация в жильной мас-се в условиях стесненного роста

Микроблоковое строение удлиненной стволовой части и ступенчато-слоистая микроскульптура монокристалльных участков

Эндогенные процессы первичной кристаллизации и регенерации серебра при понижении пересыщения раствора при росте в свободных пустотах и занорышах

Микроблоковое строение изометричных индивидов и трубчато-волоконистая микроструктура вытянутых нитевидных форм

Эндогенное отложение и регенерация при изменяющихся направлении и скорости массопереноса вещества в процессе кристаллизации

Следы растворения на монокристалльных участках

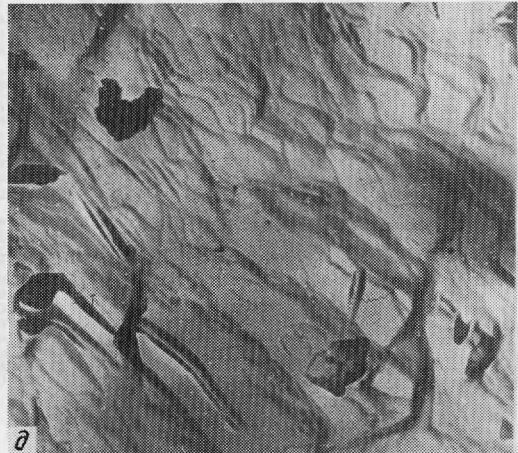
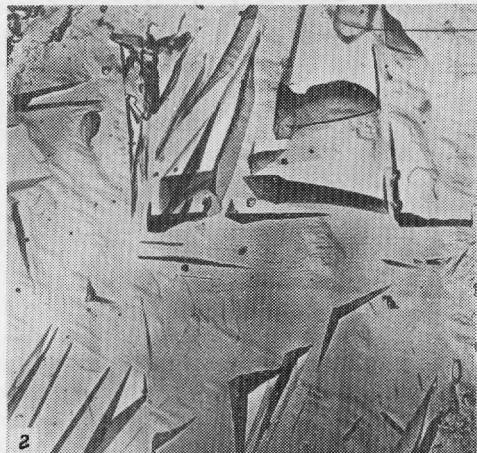
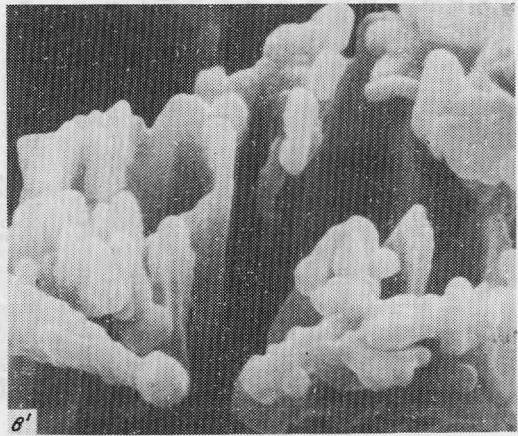
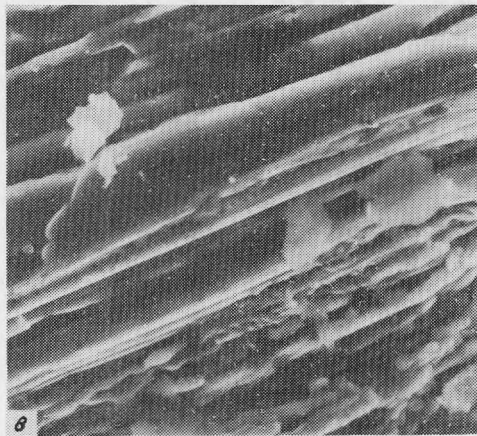
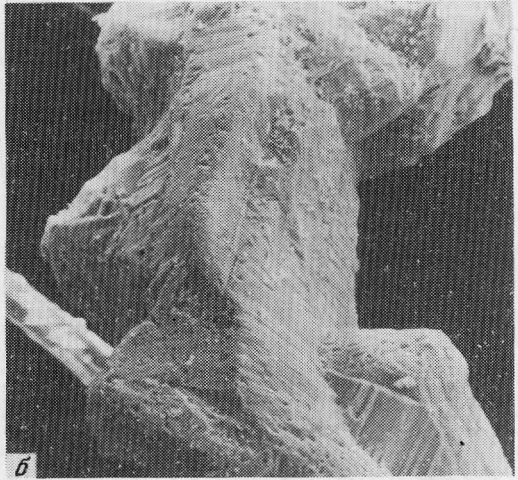
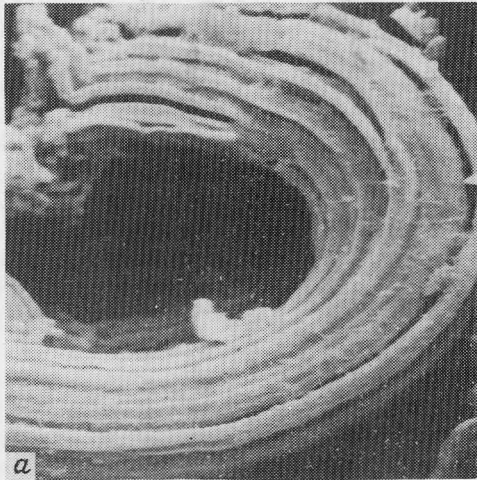
Слоисто-чешуйчатое и метазернистое микростроение дендритных образований

Гипергенное образование в изменяющихся кислотно-щелочных и других условиях

Разнообразные микроскульптурные формы, характерные как для эндогенного, так и для гипергенного серебра

Последовательная смена эндогенных и гипергенных процессов отложения и переотложения серебра

---



турных растворов при высоком их пересыщении и неравномерной адсорбции примесей.

В результате травления в образцах эндогенного самородного серебра обнаружены трубчатые микропсевдоморфозы акантита, развивающиеся по проволочному серебру (рис. 2, в). Подобные формы сульфида серебра, согласно данным экспериментов [12], возникают при замещении серебра в низкотемпературных гидротермах (150-160°C), что хорошо согласуется с природными наблюдениями.

К типоморфным особенностям эндогенного первичного серебра относятся элементы его первичной кристаллизации - линейные и тригональные ступени роста, перпендикулярные (линейные формы) или параллельные (тригональные формы) грани октаэдра (рис. 2, г). На монокристалльных участках обнаруживается тонкая ступенчатость (рис. 2, б), что объясняется послойным ростом кристалла [14]. Показателем первичной кристаллизации серебра являются также тонкая мозаичность, блоковое строение (рис. 2, д). Мозаичное, блочное строение растущего кристалла, как правило, обусловлено ускоренным ростом при относительно высоких температурах и многочисленности новых центров кристаллизации [5]. Блочные структуры эндогенного самородного серебра могут быть обусловлены линзовидными субзернами, округлыми и сложной формы индивидами, развитыми по всей поверхности зерна или в отдельных участках. Аналогичные структуры эндогенного самородного золота рассмотрены Н.В.Петровской [8].

#### Регенерированное самородное серебро

В месторождениях серебра сложного генезиса, таких, как полигенные, полистадийные или в рудах, испытавших внутри- или пострудный метаморфизм, возможны процессы перегруппировки серебра и образование регенерированного самородного серебра [13]. Последнее развито в полистадийных рудных агрегатах в ассоциациях с сульфидами, в интерстициях и занорышах кварцевых жил, в виде гнезд в пострудных образованиях.

Природа регенерированного серебра обусловлена высокой степенью подвижности Ag как путем мобилизации и перехода его в раствор с последующим пе-реотложением в самородной форме, так и путем твердофазной диффузии в халькогенидах и жильных минералах, приводящей к перераспределению и укрупнению серебра. Регенерированное серебро отличается от первичного изменением субструктурных особенностей, обеднением элементами-примесями, в первую очередь подвижными - Hg, Sb, As, Cu и др., а также укрупнением размеров.

Рис. 2. Субмикроморфология и субструктурные особенности первичного эндогенного серебра

а - спирально закрученные по  $L_4$  нитевидные кристаллы серебра. Изображение во вторичных электронах, увел. 2000; б - срастание октаэдрических кристаллов с отчетливыми признаками слоистого роста, увел. 456; в - трубчатая микроструктура, обусловленная нарастанием нитевидных монокристаллов серебра, (увел. 2177) или псевдоморфозами  $Ag_2S$  по проволочному самородному серебру, (увел. 4000); г - линейные и тригональные скульптуры роста на поверхности частиц серебра. Реплика с частицы, изображение в проходящих электронах, увел. 13600; д - микроблочное строение монокристалльных участков самородного серебра. Реплика с частиц, изображение в проходящих электронах, увел. 800

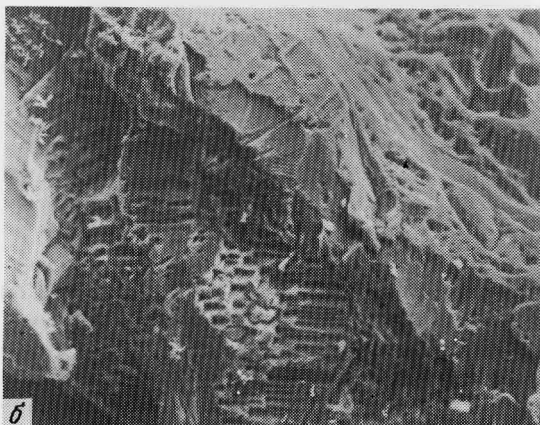
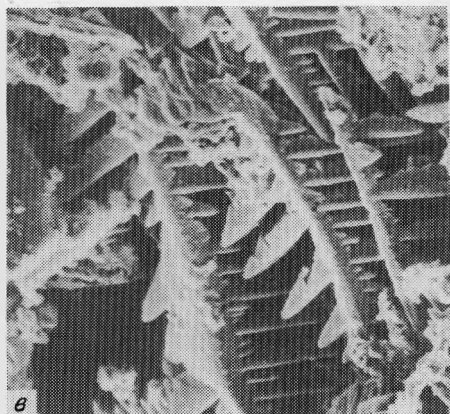
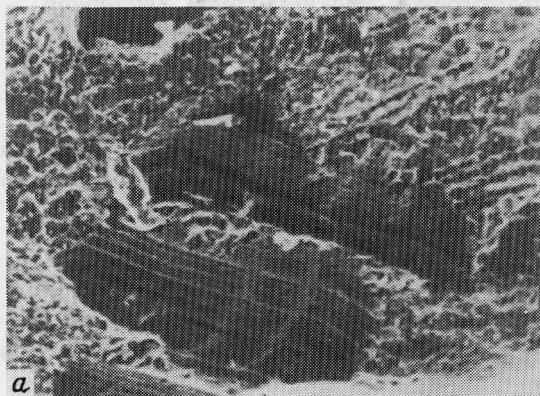


Рис. 3. Реликты первичного самородного серебра в регенерированном серебре

а - реликтовые участки первичного самородного серебра с микроступенчатым рельефом. Изображение во вторичных электронах, увел. 1200; б - реликтовая первично-ступенчатая скульптура поверхности интерстициального серебра со следами растворения, увел. 680; в - фрагменты поверхности протравленных частиц регенерированного серебра с реликтовой дендритной структурой, увел. 400

По морфологии регенерированное самородное серебро во многом сходно с первичным эндогенным серебром, и их морфологические признаки конвергентны. Вместе с тем для регенерированного серебра типичен ряд индивидуальных особенностей, позволяющих выделять эту генетическую группу. К конвергентным признакам можно отнести проволочковидные сростки нитевидных закрученных кристаллов, а также пленочные и пластинчатые выделения (см. табл.). Важнейшим морфогенетическим признаком регенерированного серебра служат реликты первичного серебра нитевидной субструктуры (рис. 3,а) и первичных сульфидов (галенит, акантит), нарастание на поверхность серебра зародышей и новообразований самородного серебра и переотложенных сульфидов (рис. 4, б).

К числу морфологических особенностей регенерированного самородного серебра относятся: отчетливая неоднородность внутреннего строения, мозаично-блоковая структура с обособлением изометричных или деформированных многогранников размером до 10 мкм, межзерновые границы которых выполнены агрегатами тончайших выделений серебра размером до 1-2 мкм, обусловленными явлениями перекристаллизации (рис. 4,а). Подобные явления вызываются напряжениями, возникающими в кристаллах при их росте в стесненных условиях (интерстиции зерен, трещины). Поскольку в таких условиях пластическая деформация возникает одновременно с ростом, то образующиеся в ходе деформации микроблоки, выходящие на поверхность кристалла, могут расти са-

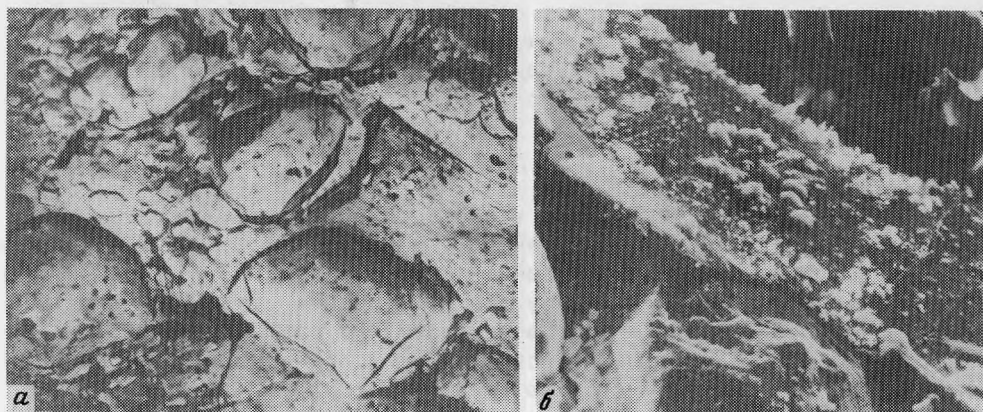
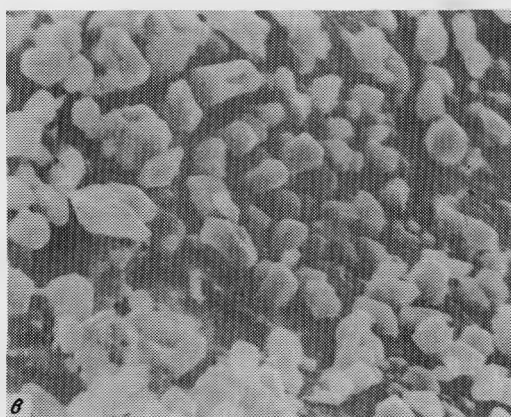


Рис. 4. Признаки регенерации самородного серебра

а - деформированная мозаичная структура самородного серебра. Двухступенчатая реплика, увел. 10500; б - деталь поверхности со звездчато-пластинчатыми новообразованиями на мозаично-блоковой поверхности серебра. Изображение во вторичных электронах, увел. 1995; в - зародышевые микрокристаллы самородного серебра в форме сильно искаженных уплощенных кубооктаэдров, увел. 5622



мостоятельно за счет собственных центров роста [10]. Кристаллизационное давление, развивающееся по индукционным поверхностям между основным кристаллом и блоком, создает новые напряжения и возникают новые блоки. Таким образом, происходит прогрессивное нарастание блочности [10], вследствие чего мозаичным выделениям самородных металлов свойственна повышенная способность к перекристаллизации [9]. На границах зерен регенерированного серебра сохраняются структуры первичной кристаллизации, такие, как тригональные и линейные аксессуарии роста, обусловленные быстрой кристаллизацией, а также удлинённые выделения, имеющие нитевидное микростроение.

Типоморфным для регенерированного серебра является наличие зародышей новых зерен, образующихся при рекристаллизации на его поверхности. Они представлены "сыпью" мелких изометричных зерен и часто локализируются вдоль микротрещин, образуя линейно-вытянутые структуры (рис. 4,в). Образование таких зародышей связано с термическим воздействием на энергетически неустойчивые кристаллы [3]. Электронно-микроскопическое изучение регенерированного самородного серебра позволило выявить еще одну особенность, свойственную регенерационным поверхностям - характерный ступенчато-слоистый рельеф поверхности зерен [1]. Высота отдельных ступеней варьирует от 0,1 до нескольких мкм, причем часто и сами ступени имеют неровную шероховатую поверхность.

Таким образом, регенерированное самородное серебро сочетает в себе конвергентные морфологические и микроструктурные признаки, свойственные также первичному серебру, и индивидуальные особенности, определяющиеся процессами преобразования самородного серебра.

#### Гипергенное самородное серебро

Процессы гипергенеза приводят к возникновению вторичного самородного серебра прежде всего за счет окисления сульфидов и сульфосолей серебра, а также Ag-содержащих сульфидов (галенит и др.). В первую очередь гипергенное серебро возникает в условиях сульфатного режима, где образуются разнообразные по морфологии и широко варьирующие по размеру образования гипергенного серебра. В щелочных окислительных условиях эти процессы редуцированы и приводят к возникновению пленочных форм, ассоциированных с гидроксидами Fe и Mn.

Гипергенное серебро обычно встречается в виде уплощенных выделений - пленок и чешуек, пластинчатых агрегатов, плоских дендритов, а также в виде моховидных комковатых скоплений, преимущественно развитых в ассоциации с оксидами и гидроксидами железа и марганца, вторичными минералами марганца и меди в зонах окисления или вторичного сульфидного обогащения. Оно наблюдается в виде пленок на поверхности акантита и пирита, а также пластинчато-чешуйчатых образований на поверхности первичного самородного серебра (рис. 5, а).

В отличие от дендритоидов первичного серебра, образующих объемные или плоскообъемные формы, гипергенное серебро представлено плоскопластинчаты-

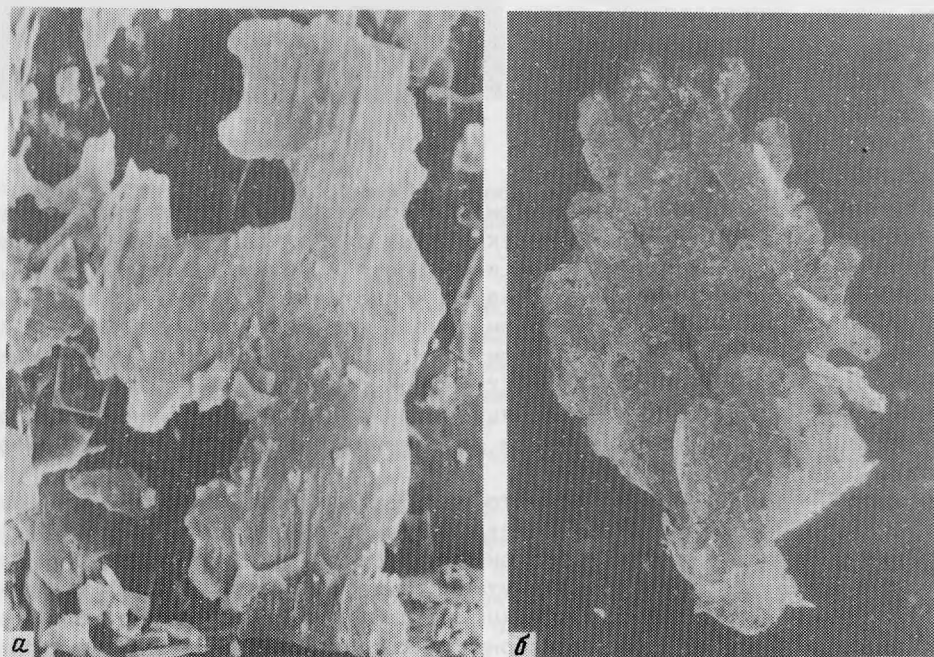


Рис. 5. Морфологические особенности гипергенного самородного серебра  
а - пластинчатые выделения гипергенного серебра. Изображение во вторичных электронах, увел. 60; б - плоско-пластинчатый дендрит самородного серебра, увел. 21

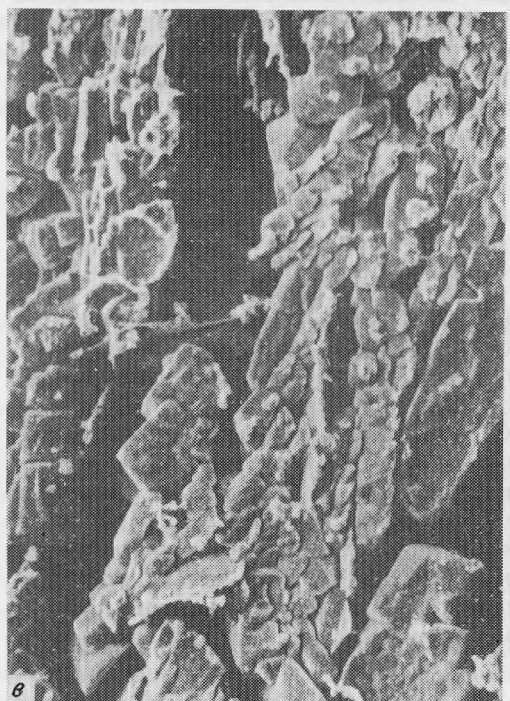
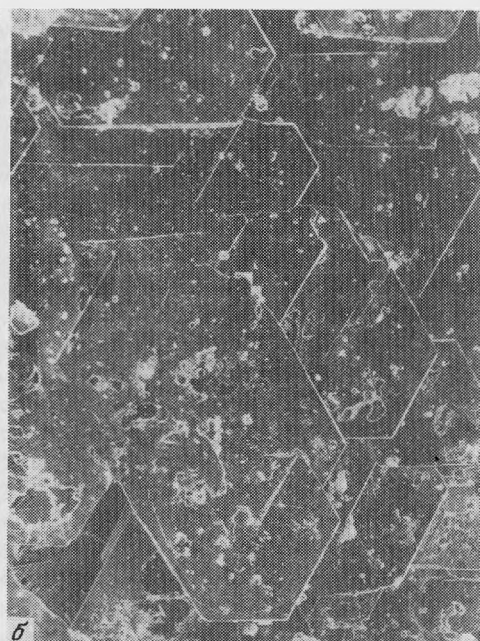


Рис. 6. Субмикростроение гипергенного серебра

а - пластинчато-чешуйчатое строение непротравленных частиц самородного серебра с ровной сглаженной поверхностью. Изображение во вторичных электронах, увел. 4000; б - плоские шестиугольные пластины, слагающие плоские дендриты, увел. 110; в - дендритное внутреннее строение образцов пластинчатого гипергенного серебра, выявляемое при травлении  $HNO_3$ , 1:1, увел. 200; г - преимущественное развитие кубических микрокристаллов, тесное страстание которых обуславливает метазернистую субструктуру пластинок гипергенного серебра, увел. 400

ми дендритами, часто лапчатой формы (рис. 5,б), сложенными блоками серебра гексагональных очертаний. Возникновение такого рода пленочных дендритов связано с выделением минералов по тонким трещинам [2], а также на поверхности лимонитовых агрегатов.

К важнейшим микроморфологическим особенностям гипергенного самородного серебра относится тонкий пластинчатый микрорельеф непротравленных зерен (рис. 6,а), при этом пластинки сложены мельчайшими (менее 0,5 мкм) кубическими кристалликами (рис. 6,г). Метазернистая субструктура гипергенного серебра выявляется при изучении угольных реплик, снятых с его частичек. Подобные метазернистые структуры характерны для пленочных агрегатов зоны окисления и могут считаться типоморфными признаками образования минералов в гипергенных условиях [15].

Электронно-микроскопическое изучение протравленных поверхностей пластинчатых частиц гипергенного серебра выявило их дендритовидную субструктуру (рис. 6, б,в). Дендритоиды образованы параллельно сросшимися кристаллами серебра кубического габитуса, иногда искаженными и как бы корродированными. По своему строению подобные образования сходны с гигантскими пластинами серебра из зон вторичного обогащения некоторых крупнейших месторождений мира [11]. Образование подобных сростаний возможно в условиях кристаллизации вещества в средах с затрудненной диффузией при отсутствии перемешивания, что приводит к возникновению различного градиента концентрации по разным направлениям вокруг растущего кристалла. Тот же эффект наблюдается при росте минералов в среде, быстро перемещающейся относительно растущего агрегата, в частности при фильтрации поверхностных вадозных вод в рудных телах. Таким образом, дендритовидное внутреннее строение пластинчатого серебра можно рассматривать как один из признаков его гипергенного происхождения.

#### Экспериментальное изучение морфогенетических особенностей серебра

Важнейшую информацию для морфогенетических построений дает изучение морфологических особенностей самородного серебра, полученного экспериментально при заданных условиях. Показано, что многие формы выделения серебра конвергентны, т.е. возникают в различных условиях. Так, дендритные и дендритоидные формы образуются: 1) вследствие диффузионной перегруппировки вещества при прогреве самородного серебра до 400°C, в этих случаях наблюдаются веточковидные дендриты (см. рис. 7, а); 2) в результате твердофазного восстановления серебра из аргентита (акантита) с возникновением зародышевых "ракушковидных" форм, в дальнейшем разрастающихся в радиально-лучистые агрегаты уплощенных нитевидных кристаллов (рис. 7,б); 3) при отложении самородного серебра на различных минералах из растворов, при этом возникают сложные формы, несущие на себе признаки нескольких зароджений.

Образования самородного серебра, полученные на жильных минералах (кварц, родонит), представлены главным образом гранными формами или зародышами, морфология которых варьирует в зависимости от температуры кристаллизации. При 20°C формируются округлые зародыши октаэдрических кристаллов (рис. 8,а). С повышением температуры до 150°C и более отлагаются треугольные формы роста октаэдров, появляются двойники при значительной доле изометричных образований (рис. 8,б). Дальнейший рост температуры вызывает появление наряду с изометричными проволочковидных форм с линейной скульптурой поверхности и их сростаний. Появляются признаки



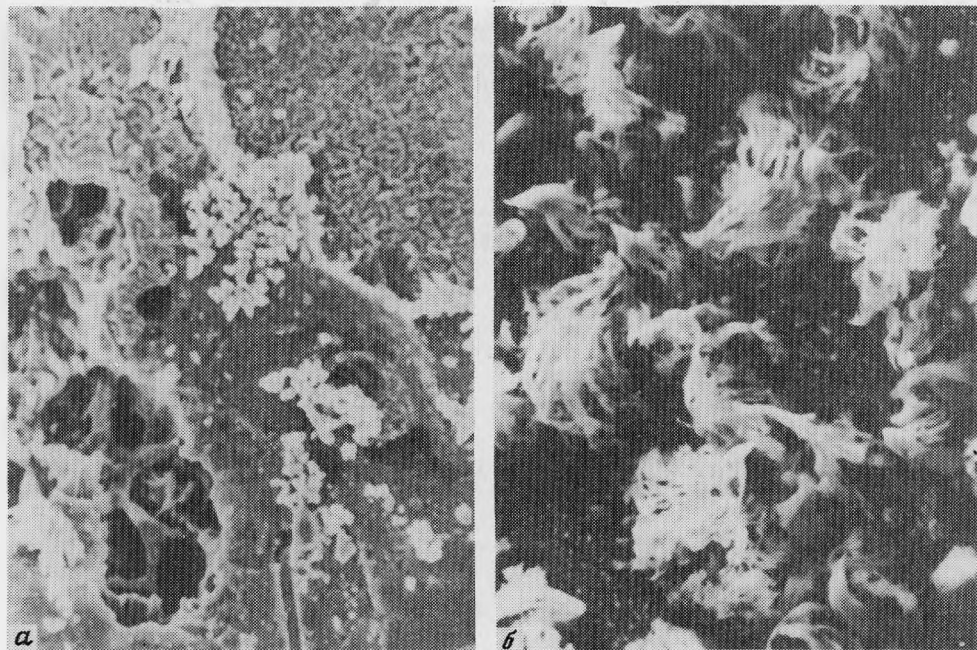


Рис. 7. Дендритовидные выделения серебра разного генезиса, полученные экспериментально

а - дендритовидная структура и зародышевые формы новообразования серебра при прогреве до  $400^{\circ}\text{C}$ . Изображение во вторичных электронах, увел. 1840; б - лентовидные стростки серебра, проявляющиеся при катодном преобразовании аргентита, увел. 5360

нескольких зародений серебра со сменой кубооктаэдрических форм скелетными кристаллами, растущими в условиях недосыщения раствора.

Наиболее морфологически разнообразны выделения серебра на сульфидах. Это губчатые, пластинчатые, палочковидные, комковатые, дендритовидные, а также сложные срастания. При относительно низких температурах (до  $100^{\circ}\text{C}$ ) преобладают срастания разноориентированных пластин, спиралевидных и проволочковидных форм, образующие локальные скопления на поверхности сульфидов. С ростом температуры до  $200^{\circ}\text{C}$  преобладающими становятся дендритовидные и сложные формы выделений с более равномерным распределением по поверхности сульфидов, возникают два и более зародений выделений серебра, образуются двойниковые, тройниковые сrostки (рис.8, в, г).

Хорошо ограниченные кристаллы самородного серебра и монокристалльные выделения наблюдаются: 1) при кристаллизации серебра из поздних, обедненных серебром растворов на поверхности ранее отложенного тонкозернистого осадка серебра (рис. 9, а), при этом в условиях повышенных температур ( $200^{\circ}\text{C}$ ) отмечаются главным образом октаэдрические кристаллы; 2) при повышенных температурах, но в области кислых значений pH растворов появляются кубооктаэдрические, иногда искаженные кристаллы со ступенями растворения (рис. 9, б); 3) при осаждении серебра из относительно низкотемпературных растворов (до  $100^{\circ}\text{C}$ ) вдоль активных зон поверхности сульфидов отлагаются в основном кубические и кубооктаэдрические формы. Таким обра-

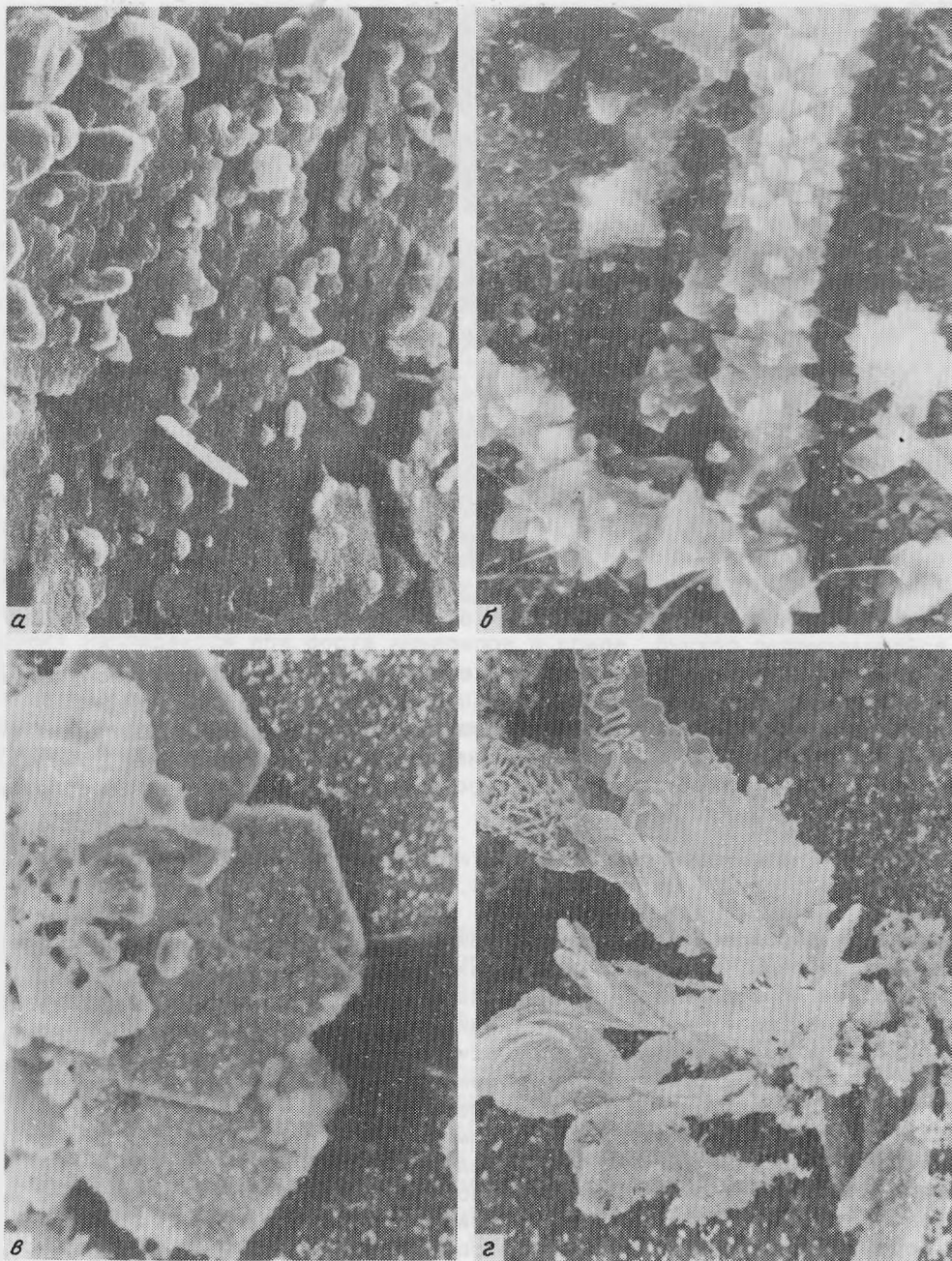


Рис. 8. Морфология серебра, отложенного из  $10^{-3} \text{AgNO}_3$  на жильных минералах и сульфидах

а - пластинчатое новообразование с метазернистой структурой на родоните при  $20^\circ \text{C}$ . Изображение во вторичных электронах, увел. 600; б - монокристалльные, двойниковые срастания треугольной формы, изометричные и палочковидные выделения серебра на родоните при  $200^\circ \text{C}$ , увел. 6400; в - сrostок

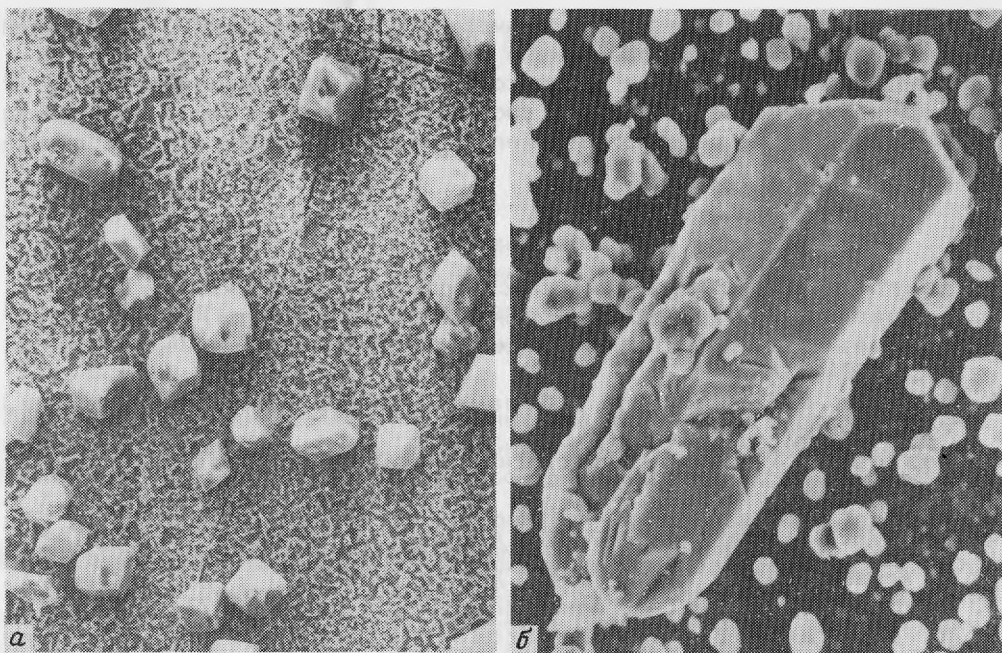


Рис. 9. Правильные и искаженные кристаллы серебра, отложенные из растворов  $10^{-3}$  н.  $\text{AgNO}_3$  на сульфидах

а - октаэдры и кубооктаэдры серебра, отложенные на галените при  $200^\circ\text{C}$ . Изображение во вторичных электронах, увел. 273; б - искаженные кубооктаэдры серебра, отложенные из кислых (рН 3) растворов на халькопирите, увел. 2800

зом, появление хорошо ограненных кристаллов может быть связано с условиями замедленного роста, обусловленными относительно низкими температурами, незначительным пересыщением растворов и особенностями кислотно-щелочного режима растворов.

#### Морфогенетическая классификация самородного серебра

Обобщение материалов по изучению морфологических и субструктурных особенностей различных генетических групп природного серебра и данных экспериментальных исследований позволяет выделить важнейшие морфогенетические признаки самородного серебра, представленные в таблице. В морфогенетической систематике самородного серебра впервые использован комплекс морфологических и субмикроструктурных признаков, позволяющих с высокой сте-

трех кристаллов серебра шестиугольного сечения. Сверху нарастание комковатых образований. Осадок на халькопирите ( $200^\circ\text{C}$ ). Изображение во вторичных электронах, увел. 2800; г - сложный дендритовидный сросток серебра, осложненный нарастанием губчатых и палочковидных форм, увел. 800

пенью достоверности выделять генетические группы серебра - его эндогенные, гипергенные и регенерированные образования.

Определение генетических признаков наряду с научным имеет важное практическое значение, поскольку соотношение в рудных телах первичного, вторичного, а также регенерированного серебра позволяет оценить перспективность оруденения.

#### Литература

1. Асхабов А.М. Регенерация кристаллов. Л.: Наука, 1979. 176 с.
2. Годовиков А.А. Введение в минералогию. М.: Наука, 1973. 254 с.
3. Григорьев Д.П. Онтогенез минералов. Львов: Изд-во Львов. ун-та, 1961. 284 с.
4. Дэна Дж.Д., Дэна Э.С., Пэлач Ч. и др. Система минералогии. М.: Изд-во иностр. лит., 1950. Т. I. 115 с.
5. Козлова О.Г. Рост и морфология кристаллов. И.: Изд-во МГУ, 1972. 303 с.
6. Костов И. Минералогия. М.: Мир, 1971. 583 с.
7. Малеев М.Н. Свойства и генезис природных нитевидных кристаллов и их агрегатов. М.: Наука, 1971. 196 с.
8. Петровская Н.В. Самородное золото. М.: Наука, 1973. 348 с.
9. Петровская Н.В., Новгородова М.И., Фролова К.Е., Цепин А.И. Природа неоднородности и фазовый состав эндогенных выделений самородного золота // Неоднородность минералов и тонкие минеральные смеси. М., 1977. С. 16-27.
10. Петров Т.В., Трейвус Е.Б., Касаткин А.П. Выращивание кристаллов из растворов. Л.: Недра, 1983. 175 с.
11. Рамдор П. Рудные минералы и их сростания. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 1132 с.
12. Рафальский Р.П., Дымков Ю.М. О трубчатых псевдоморфозах аргентита по самородному серебру и температуре их образования // Докл. АН СССР. 1957. Т. 112, № 4. С. 746-748.
13. Сахарова М.С., Посухова Т.В., Артеменко О.В. Типоморфизм самородного серебра // Минерал. журн. 1983. Т. 5, № 3. С. 3-14.
14. Тиллер У. Образование дислокаций при росте кристалла из расплава // Элементарные процессы роста кристаллов. М.: Изд-во иностр. лит., 1959. С. 73-78.
15. Юшко С.А. Методы лабораторного исследования руд. М.: Недра. 1971. 343 с.