

Морфология на самородното злато от рудното находище Челопеч

*Иван К. Бонев, Томас Керестеджиян,
Александър Хаджиев, Колин Андрю*

Bonev, I. K., T. Kerestedjian, A. Hadjiev, C. Andrew. 1998. Morphology of native gold from the Chelopech ore deposit. - *Geochem., Mineral. and Petrol.*, 35, 3-16

Abstract. The Chelopech gold-copper high-sulphidation deposit in the Srednogorie zone is one of the largest and economically most important ore deposits in Bulgaria, considered to be the largest gold resource in Europe.

The Chelopech ore have complicated mineralogical and chemical composition with more than 70 minerals established, and large spectrum of sulphophile chemical elements, incl. Cu, As, Sb, Se, Te, Pb, Zn, Ag, etc. Gold is present mainly as native metal, only a small part of it (< 1%) occurring in the form of telluride minerals, incl. kostovite, sylvanite, petzite.

It has been established that a substantial part of the gold particles in the gravity concentrates are not mechanically distorted and deformed during crushing and processing of the ore, thus preserving their original morphology.

Gold particles detached from the gravity and flotation concentrates by additional laboratory gravity separation were subjected to detailed study of their spatial morphology by using microscopic and SEM methods.

Different morphological types of gold crystal particles have been established, including flat platelets and irregular grains, idiomorphic isometric and distorted crystals, needle-like, fine fibrous, and spongy gold. {111} polysynthetic twinning is common.

The grain size measurements confirm that the high flatness of gold particles is their substantial feature. The mean thickness/diameter ratio of the platelets (i.e. their Corey shape factor) is 0.16. This characteristics is valid for all size classes. In the plane of the flatness, particles are systematically elongated with a ratio length/breadth about 1.6. The mean size of particles is 65 μm .

Grain morphology of gold particles suggests that, their crystal growth took place in restricted fine cracks and intergranular space, the geometry of which controls the flat, elongated or irregular and branched dendrite-like shapes. Occasionally, the growth proceeds also in the open space of small available voids, and then, well formed idiomorphic or distorted gold crystals arise, as well as some more specific crystal formations like rod-like, wire-like, fine fibrous, fine dendritic and spongy gold.

Gold from Chelopech is of characteristic high fineness, with a main value of 957. No correlation between size and fineness of gold particles can be found.

Key words: native gold, crystal morphology, crystal growth, Chelopech mine

Addresses: I. K. Bonev, T. Kerestedjian, A. Hadjiev - Geological Institute, Bulgarian Academy of Sciences, 1113 Sofia, Bulgaria; e-mail: bonev@geology.bas.bg; C. Andrew - Navan Resources plc, Kennedy Road, Navan, Ireland.

Ключови думи: самородно злато, кристална морфология, кристален растеж, находище Челопеч

Адреси: И. К. Бонев, Т. Керестеджиян, А. Хаджиев - Геологически институт, Българска академия на науките, 1113 София; e-mail: bonev@geology.bas.bg

Увод

Масивно-сулфидното златно-медно находище Челопеч е едно от най-големите и важни български рудни находища, характеризиращо се със сложен минерален и химичен състав, сложни минерални взаимоотношения, структурно-текстурни особености и комплексен генезис. По запаси и икономическо значение то попада в групата на големите находища от световен мащаб (Singer, 1995), съсредоточващи съществена част от известните концентрации на злато. В настоящия момент то се счита за най-голямото разработвано златно находище в Европа (Andrew, 1997).

Златото, заедно с медта са основни полезни компоненти на сулфидните руди, които съдържат богат спектър и от други елементи, имащи значение като полезни попутни компоненти в рудите: Pb, Zn, Ag, Sb, Bi, Se, Te, Ge, Ga, Sn, V, PGE, Ba и др. Отрицателно значение имат As и някои от другите елементи, като опасни замърсители на околната среда.

Минералогията на находището е изучавана детайлно от Терзиев (1968) и покъсно от Цонев (1982), Коваленкер и др. (1986), Петрунов (1994, 1997), и др. автори.

Златото в находището се среща както в самородна форма, така и като собствени минерали, в това число силванит, петцит, костовит (установен за първи път именно в Челопеч от Терзиев), нагиагит.

Самородното злато е много важен компонент на рудите. Характеризирано е от Терзиев (1968), Ковачев и др. (1988), Strashimirov, Kovachev (1994), Петрунов (1994). Изучавани са химичният му състав, отношенията със съпътстващите го минерали, размерът и други особености. Данни за златото в района и за съседни находища привеждат още Богданов (1987) и др. автори, например специално за Елшица - Bogdanov et al. (1997) и Kuikin (1998).

Терзиев (1968) определя размера на златните частици за рудите от Челопеч в интервала 1-5 до 60-70 μm с мода 5-10 μm . Ковачев и др. (1988) и Strashimirov, Kovachev (1994) считат, че в находището освен финозърнестото има и едрокристално злато, формирано при процеси на ре-

кристализация, което те считат за втори морфогенетичен тип.

Наличните данни за морфологията на златните частици засега всъщност са твърде ограничени, базирани на микроскопски наблюдения в двумерните сечения на аншлифите. Нашата цел е да изследваме систематично реалната морфология на златните частици, което заедно с данните за техния химизъм и парагенези има съществено значение за разбиране процесите на образуването им, а също така е важно и за техноложката практика.

Методика и материал

Изучаването на пространствената и повърхностна морфология на малки частици при сегашните изследователски микроскопски методи е осъществимо, когато те са изолирани и достъпни за непосредствено наблюдение. Такава възможност предлагат например речните златоносни разсипи и други неспоени или слабо споени седименти, както и образувания от зоната на хипергенезата. Морфологични изследвания на златни частици са провеждани именно при такива находища (напр. Giusti, 1986; Hallbauer, Utter, 1977; Utter, 1979; Groen et al., 1990; Watterson, 1992; Lawrance, Griffin, 1994; Bonev, Vesselinov, 1996), включително и от района (Богданова, 1975). Първичната морфология на златните частици в тези случаи е значително повлияна от характера и продължителността на претърпения транспорт, а е усложнена и от допълнителни кристализационни процеси, протекли във водната среда.

Морфологични изследвания на златните зърна от масивни руди понастоящем почти липсват. Известна обща представа дава например атласът на Латыш (1984). Формите на химически отделени частици от различни украински находища в него обаче са илюстрирани само с малки оптически увеличения.

Провеждането на такива изследвания изисква отделяне от включващата ги рудна маса на достатъчно голям брой зърна, което е възможно чрез химични или механични методи. Химичното разлагане

на рудата е трудоемко, скъпо и слабо ефективно, докато механичните методи са по-резултатни. Механичното дезинтегриране на рудните агрегати най-често е основна процедура в обогатителния процес, последвана от гравитационно и флотационно обогатяване. По такава обогатителна схема и във фабриката на рудник Челопеч се получават гравитационен и флотационен - медно-сулфиден (доскоро и пиритен) концентрат. В тези концентрати, и особено в първия от тях златните частици са почти изцяло отделени. Чрез допълнителна лабораторна магнитна и механична гравитационна сепарация (в микропанер) от такива гравитационни концентрати, означавани като "черен пясък", бяха получени значително обогатени на златни частици тежки немагнитни фракции. Използвани бяха концентрати от отделни сменни, средно месечни и средно годишни проби от последната година, които характеризират разработваните в момента средни нива на рудните тела в находището.

Изучавани бяха и частици, отделени от рудите по химичен път.

Следните методи и процедури бяха прилагани при по-нататъшните изследвания:

- Предварителен оглед и подбор на частици от обогатения концентрат със стереомикроскоп при увеличение до $\times 120$.

- Оптично микроскопско изследване на голям брой частици в отразена светлина, последвано от систематични морфометрични измервания. Използвани бяха микроскопи NU-2 и Amplival Pol-U на Zeiss/Jena. Резултатите бяха подложени на статистически и корелационен анализ.

- Детайлно морфоложко изследване на характерни типове частици със сканиращ електронен микроскоп (SEM). Обикновено частиците бяха предварително покривани с въглероден филм. Използвани бяха електронни микроскопи JEOL Superprobe-733 с ORTEC EDS и JSM T-300 с Link EDS аналитична система. Изучени бяха стотици частици с различни увеличения, от $\times 40$ до $\times 10000$. Всички златни частици преди снимането им бяха идентифицирани и чрез качествен EDS анализ. Диагностицирани бяха

и сраснатите с тях зърна от други минерали.

- Паралелно бяха провеждани микроскопски наблюдения на полирани шлифи от включени в епоксидна смола частици, както и на рудни аншлифи.

- В ход са и систематични микросондови изследвания на химичния състав на златните частици, но тези резултати тук няма да бъдат подробно обсъждани.

Обща характеристика на самородното злато

Публикуваните досега данни, както и нашите микросондови изследвания показват, че в находище Челопеч преобладава високотемпературното самородно злато. Според нашите анализи, съдържанието на сребро е няколко тегл. % при средна пробност 957. Присъстват следи от мед и желязо, не надхвърлящи 1 тегл. %. Отделните зърна имат хомогенен състав. Неясна зоналност се установява много рядко. Относително редки са частиците със сребърно съдържание до около 10% и единични - на електрум с 20-25% сребро.

При изследване на концентратите беше установено, че основната маса на златото в находището се намира в самородна форма и не повече от 1% е свързано със сулфидите във вид на собствени минерали.

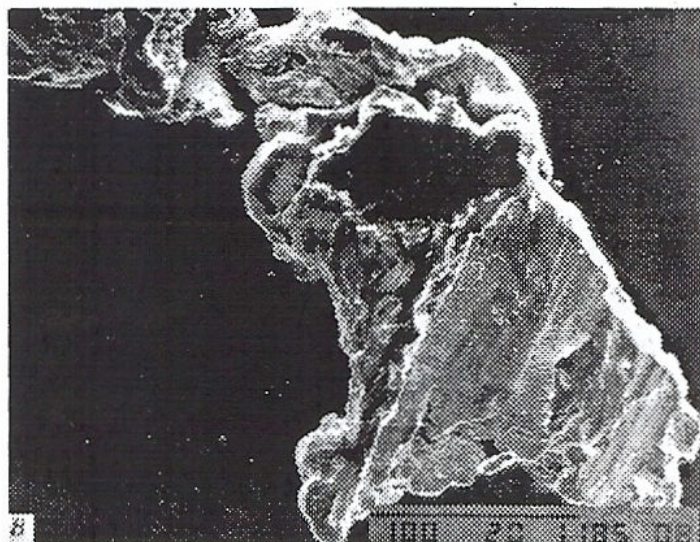
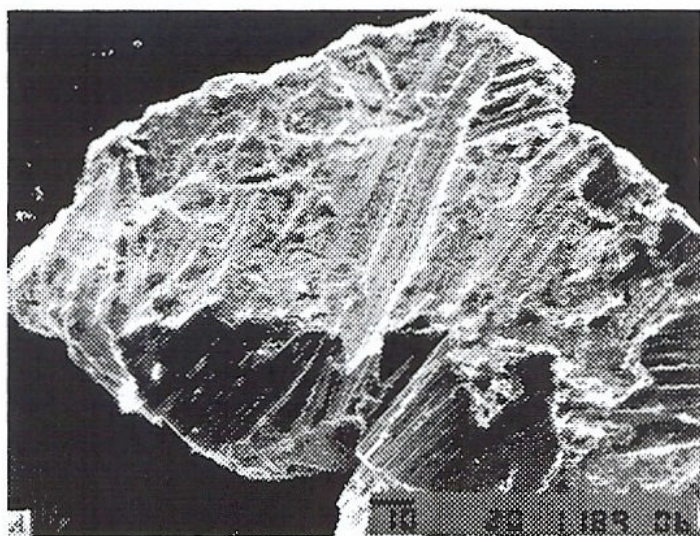
Техногенно деформирани частици

Внимателното изследване на голям брой частици с оптичен и сканиращ електронен микроскоп показва, че количеството на интензивно деформирани в процеса на обогатяването частици е учудващо малко, не надвишаващо няколко процента. Характерни особености на деформираните частици са:

- Наличие на групи от субпаралелни и слабо извити щрихи-драскотини, като явен резултат от механични деформации в контакт с твърди частици от други минерали (фиг. 1А). Щрихите принадлежат към една или повече системи на ориентация и често се налагат, покривайки цялата повърхност на зърното. В други случаи (фиг. 1В) единични каналобразни

бразди деформират само отделни части на кристала, като резултат от локално въздействие на твърди и остри малки частици (например късчета от кварц или техногенни железни стърготини).

- Наличие на плоскостни - ламинарни



Фиг. 1. Златни частици с бразди от механични деформации, получени в процеса на смилане на рудата и проявени: *A* - върху цялата повърхност; *B* - само в долната част на частицата

Fig. 1. Gold particles with scratches of mechanical deformations formed during the ore processing and revealed: *A* - on the whole surface, *B* - localized only in the lower part

структури, вероятен резултат от пластична деформация по една система октаедрични плоскости на трансляция.

- Сплескване на някои частици в резултат от интензивен едностранен натиск.

Тези деформации са очевидни артефакти с техногенен произход. В топковите мелници рудният материал престоива относително по-дълго време, и под ударното въздействие на търкалящите се и падащи топки се

дезинтегрира, благодарение на разчупването на по-крехките минерални компоненти в рудата. Отделните меки и пластични златни частици остават включени в масата на другите частици от медни сулфида и нерудни минерали, в слоя от раздробен материал. Директното ударно въздействие на мелничните топки с диаметър десет и повече сантиметра засяга всъщност неголяма част от частиците, докато по-голямата част от тях запазват оригиналната си морфология, понякога само с леки деформации, не засягащи тяхната външна форма и хабитус. Следователно, недеформираните златни частици от рудните концентрати могат да се използват като представителен материал за изчерпателно характеризиране на морфологичните особености на самородното злато в находището.

Морфология на недеформираните златни частици

За находище Челопеч са характерни различни морфоложки типове частици на самородното злато: неправилни или плоски зърна със заоблени или кристалографски очертания, дендритовидно разклонени зърна, удължени и нишковидни образувания, идиоморфни изометрични или разтеглени кристали и групи от кристали, гъбести образувания и пр. При тяхното кратко характеризиране по-долу се изхожда от степента на кристалност, а не от количественото им разпространение, което реално е твърде различно. Най-общо частиците могат да се класифицират като идиоморфни, хипидиоморфни и ксеноморфни, монокристални и поликристални.

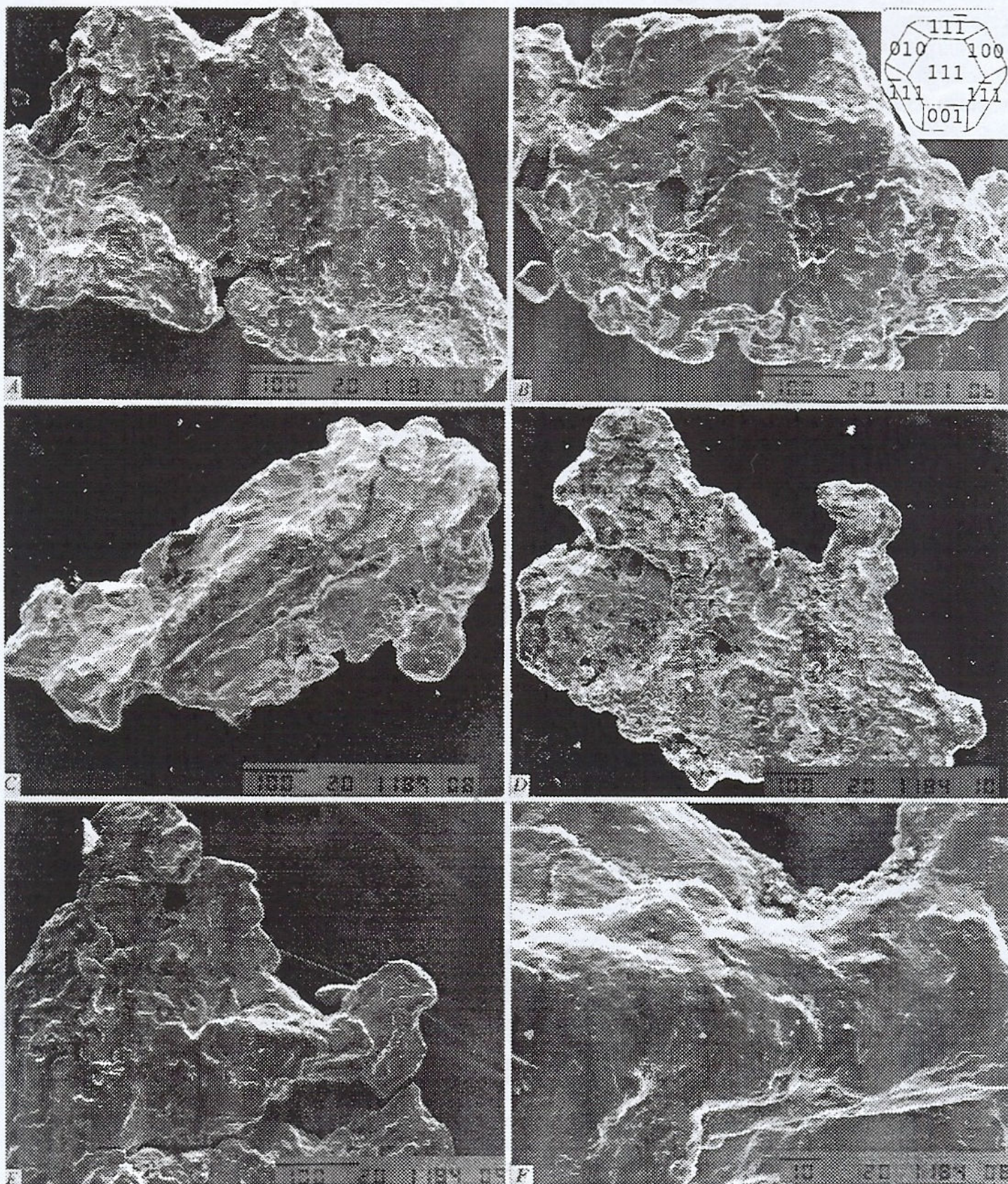
Плоски кристални частици. Най-често златните частици са плоски, с форма на по-тънки или по-дебели пластинки (фиг. 2). Статистическите морфометрични данни, обсъждани по-долу, категорично характеризират тази важна особеност, установявайки отношение на средната ширина на частиците към дебелината им от порядъка на 6-7 (средно 6,25).

Пластинките обикновено имат неправилни заоблени контури. Често обаче те включват и праволинейни участъци, очертаващи псевдохексагоналните [110] на-

правления на октаедрична (111) стена в плоскостта, на която са развити, и която може да се разглежда като хабитусна плоскост (фиг. 2В). Понякога се наблюдават и коси околни стенички $a\{100\}$ и $o\{111\}$.

Отделните пластинки са съставени от едно или повече кристални зърна, плътно сраснати или отделени с удължен шев или празнина.

Кристалните повърхности обикновено



Фиг. 2. Разнообразни по форма плочести златни частици с неравни контури и грапава или финослоиста повърхност (A-E, F - детайл от E)

Fig. 2. Flattened gold particles of different shape with uneven contours and rough or fine-layered surface (A-E, F - detail of E)

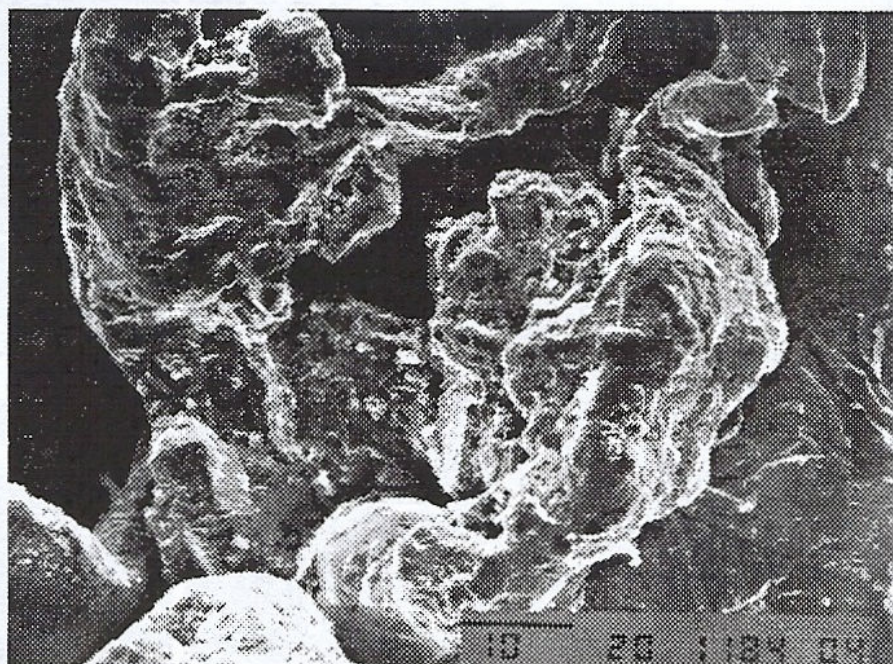
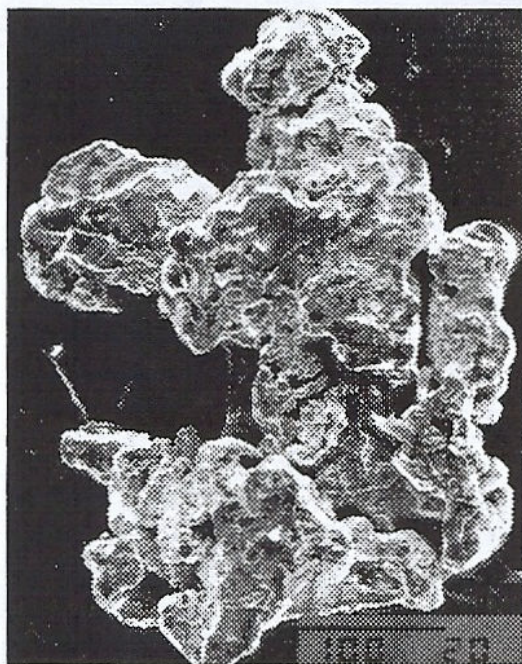
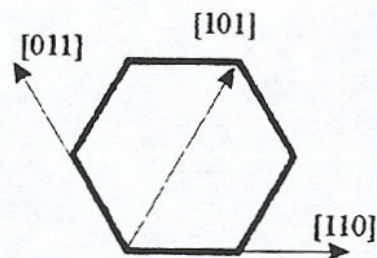
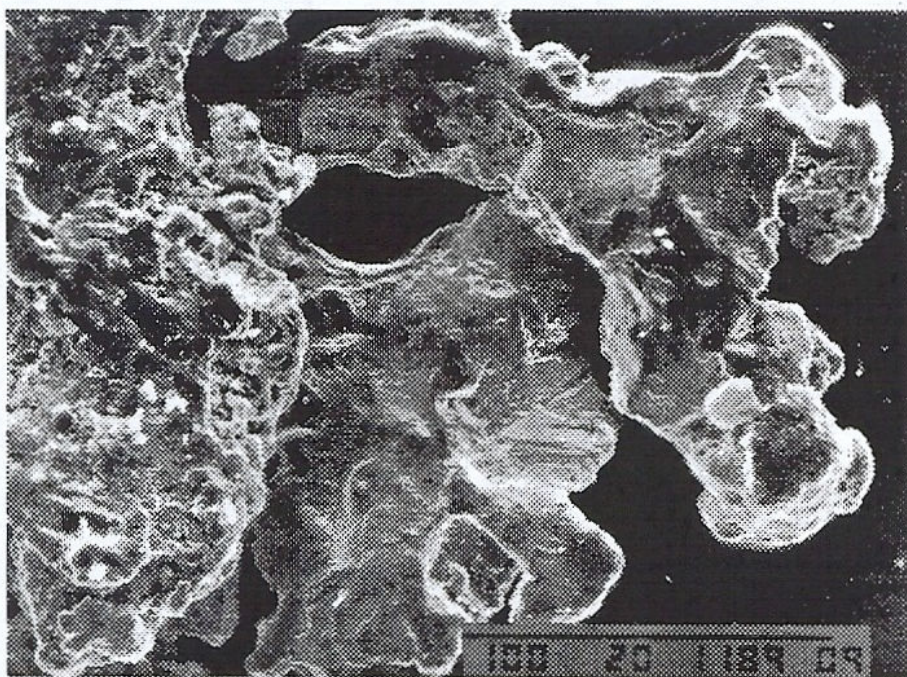
са огрубени, неравни, с вълнообразен релеф. Нерядко обаче изпъкналите им части имат фини стъпала, издаващи слоист растеж по октаедричната плоскост (фиг. 2F, 5B,C). Наблюдават се и триъгълни тераси, шриховки по [110], както и малки ямички.

Някои пластинки имат неправилни наъбени или амебовидни контури с по-обособени издадени части и заоблени или пра-

волинейни кристалографски очертания по [110] (фиг. 3A).

Пластинковидните кристали следователно имат предимно хипидиоморфна морфология.

Неправилни частици. Много от частиците са ксеноморфни и се характеризират с неправилни, пространствено развити форми и огрубена повърхност (фиг. 3B,C). Те имат монокристален или поликристален



Фиг. 3A. Част от разклонена златна частица, на места с ясни кристалографски очертания; B - неправилна, амебовидно разклонена поликристална частица с тънки неправилни нишковидни разклонения, C - детайл от B
 Fig. 3A. Part of a branched gold grain, partly with crystallographic outlines; B - irregularly developed amoeboid branched polycrystalline particle with irregular fine fibrous offshoots, C - detail of B

строеж. От тях се отделят удължени израстъци с неправилна игловидна форма.

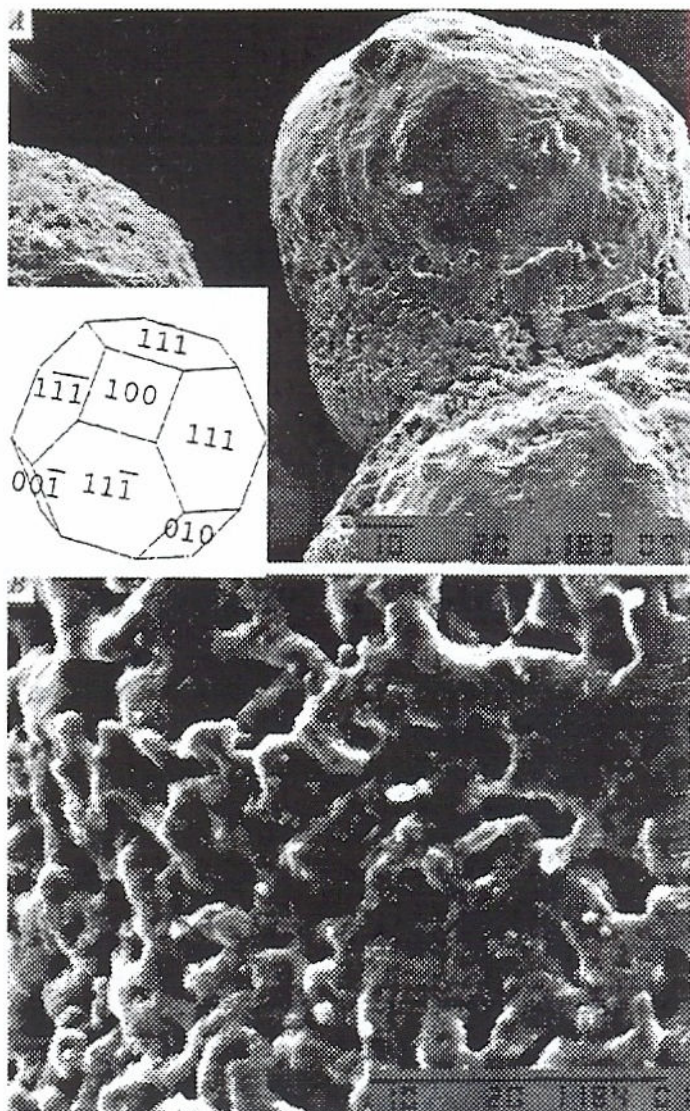
Идиоморфни изометрични кристали. Относително добре оформени идиоморфни изометрични кристали от самородно злато в находището са редки. Един от група такива кристали е показан на фиг. 4А. Кристалите са остенени от доста равномерно развити октаедрични $o\{111\}$ и кубични $a\{100\}$ стени и имат кубооктаедричен хабитус и заоблени ръбове и върхове. Преобладаващите октаедрични стени са с шестоъгълни очертания, следвайки ръбовете $[110]$ на кубооктаедъра $o:o$ и $o:a$. Някои кристали са разтеглени в различни направления. В някои случаи част от октаедричните стени имат порьозна гъбеста структура (фиг. 4В), която ще бъде обсъдена по-долу.

Удължени кристали. Някои златни частици са удължени, като отношението дължина/ширина достига до 3-4 и дори повече. Това са разтеглени кубооктаедрични кристали с нееднакво развитие на октаедрични и кубични стени. Удължението често е по направлението $[110]$. Някои от частиците имат променяща се дебелина. Отделни части от тях могат да са поудебелени или с изометрична форма. Стените им са неравни и несъвършени, понякога със заоблени издатини и малки ямички. На места се виждат и фино слоисти стъпаловидни повърхности, на пример като $[110]$ шриховка.

Някои удължени частици са дъговидно извити (фиг. 5А). На техните извити и заоблени повърхности се наблюдават и фини или по-груби стъпаловидни структури от слоист растеж по (111) (фиг. 5В,С).

Кристални срастъци по (111) . Срастването по октаедрични равнини е характерна особеност на златото. В частиците от находището такова полисинтетно срастване се наблюдава в редица случаи върху кристалните повърхности като серия от паралелни стъпала с шестоъгълни очертания по $[110]$ (фиг. 6В,С).

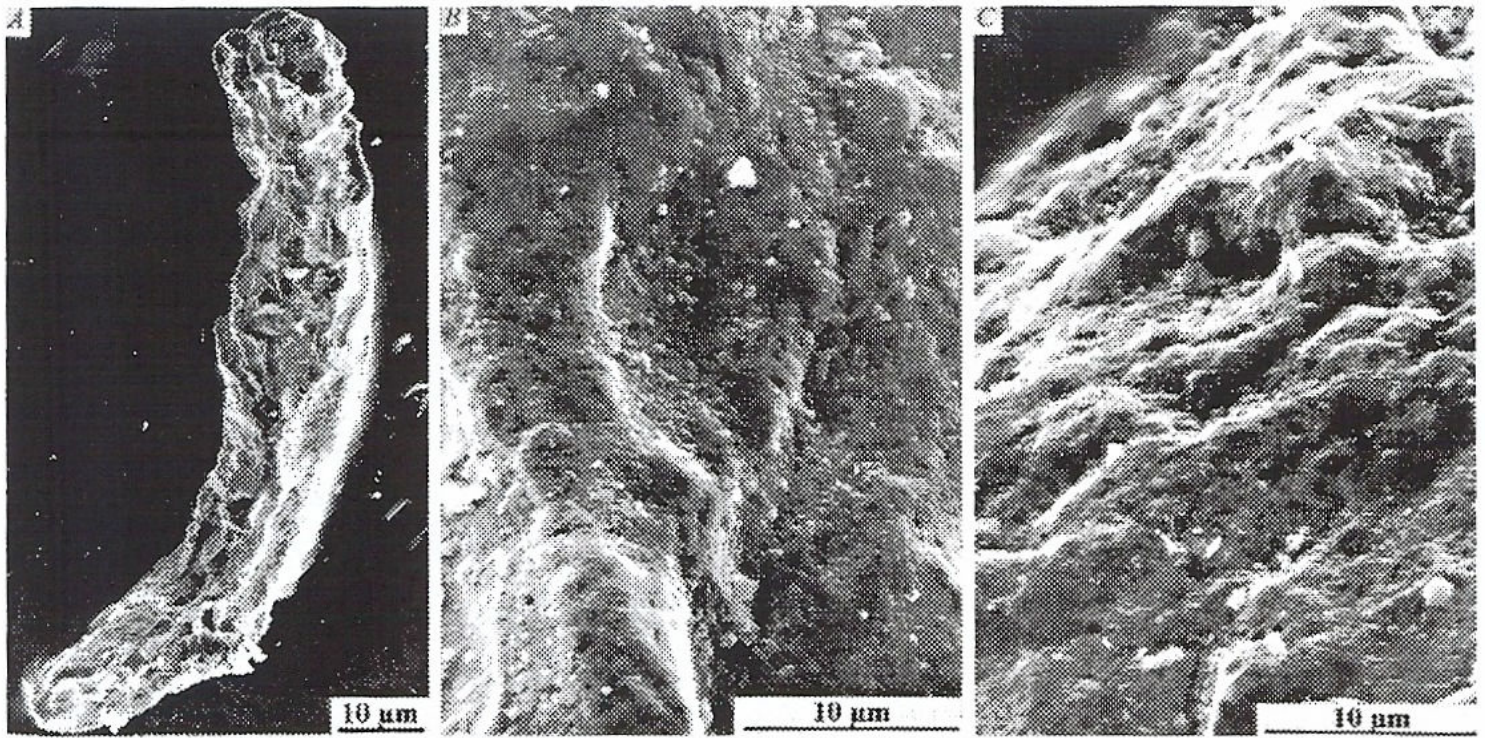
Инструктивен случай представлява удълженият златен кристал на фиг. 6А, обособена част от сложното кристално образувание на фиг. 7. Кристалът, оформен предимно от $o\{111\}$, има фино шриховани



Фиг. 4А. Изометричен кристал с кубооктаедричен хабитус и заоблени ръбове; В - порьозна гъбеста злато, развито върху октаедричната му стена, детайл
Fig. 4А. Isometric crystal of cubo-octahedral habit and rounded edges; В - porous spongy gold developed on its octahedral face, detail

околни повърхности, проява на многократно полисинтетно срастване паралелно на добре развитата предна октаедрична стена. Стъпалото с входящ ъгъл в лявата част на кристала също е ясна индикация за срастването.

Игловидни и нишковидни кристали. Идиоморфните кристали на златото понякога са придружени от своеобразни игловидни и нишковидни също монокристални образувания (фиг. 7). Златните игли израстват от издадени части на масивните кристали и понякога дори свързват срещулежащи изпъкналости. Ширината на игловидните образувания е от порядъка на 15 до 40 μm при дължина до 0,25 mm. Тяхната околна повърхност е огрубена и често



Фиг. 5. Дъговидно удължен кристал с неравна огрубена повърхност (А), и с фино-слоист микрорелеф, видим при по-високо увеличение (В и С - детайли)
 Fig. 5. Arched elongated gold particle with uneven rounded surface (A) and fine-layered microrelief revealed under higher magnification (B and C - details)

има стъпаловиден строеж, очертаващ крайните окончания на макрослоеве на растеж по октаедрични плоскости. Огъването на кристалите са дължи както на изменението в посоката на растеж, така и на пластични деформации.

Подобна е морфологията и на нишковидните златни образувания, чиято дебелина от 3-4 μm обаче е с един порядък по-малка. Нишките също имат щрихована стъпаловидна околна повърхност, очертаваща слоевете на растеж по октаедрични плоскости. Направлението на удължение по [110], ясно установяващо се в отделни участъци, постепенно се изменя поради пластична деформация на тънките нишки, придавайки им странни извити форми.

Тези особени форми на нарастване на нишковидните вискерни кристали свидетелствуват за растеж в открити празнини, каквито в метасоматичните масивни-сулфидни орудявания са доста редки.

Фини дендрити. На повърхността на някои златни частици се наблюдават своеобразни фини дендритовидни образувания. Техните пространствено развити разклонения с микронен размер имат нееднаква ориентация, което предполага поликристален строеж на подложката им. Формата на

тези образувания свидетелства за растеж в свободно пространство, очевидно ограничено по обем.

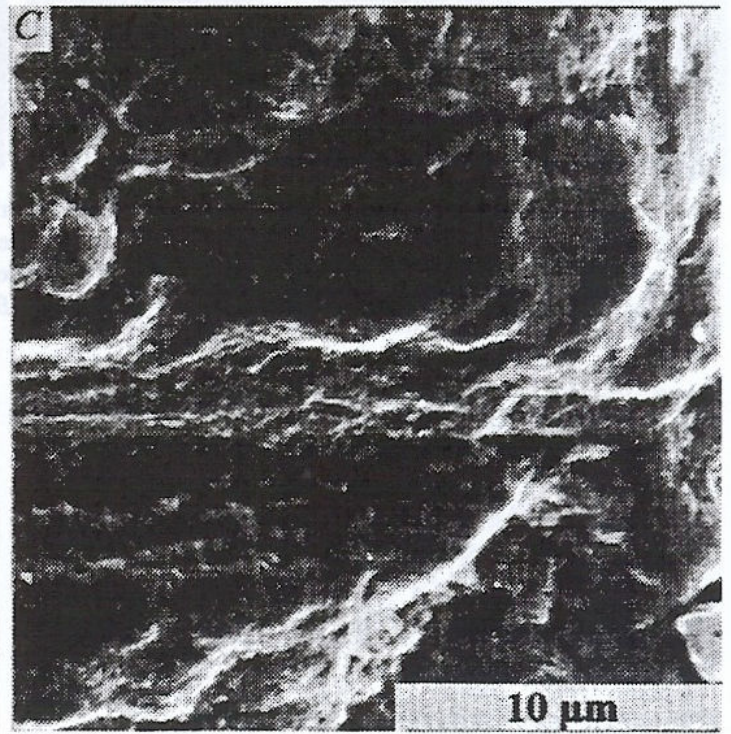
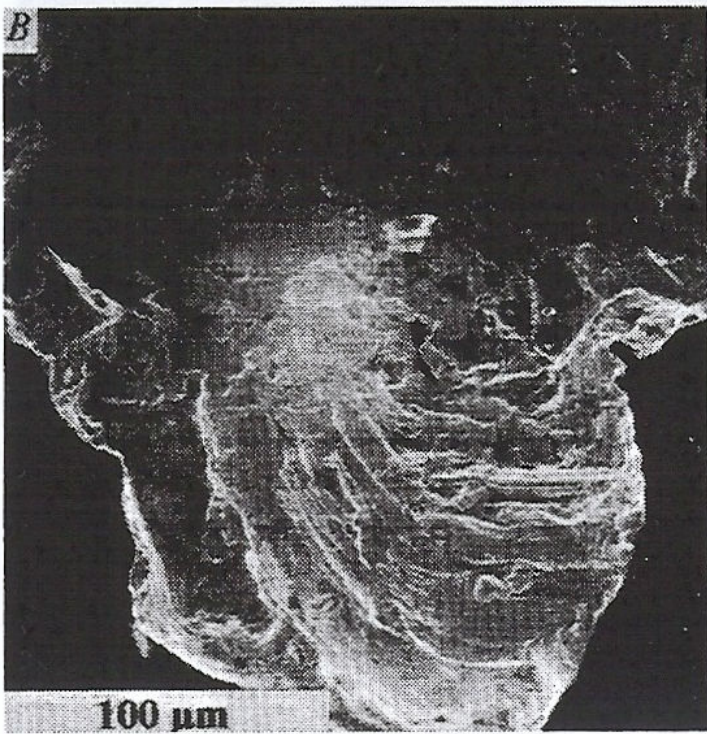
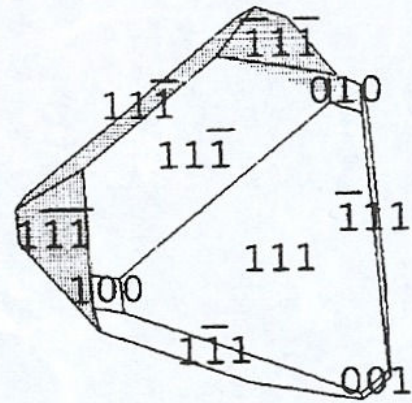
Поресто злато. Порестото (гъбесто) злато, известно от много други минерални находища, в Челопеч се среща рядко. Характерна е проявата му при идиоморфните кристали (фиг. 4), където то се развива предимно върху октаедричните стени на кубооктаедрите.

Наблюденията с голямо увеличение (фиг. 4В) показват, че тази своеобразна гъбеста структура представлява пространствена мрежа от фини, къси и неправилни нишковидни израстъци, без определена ориентация, обхващаща голям обем от също неправилно разклонени пори. Дебелината на нишките не е по-голяма от 1 μm и дължината им е от подобен микронен размер.

В редица други частици също се установяват неголеми повърхностни области с гъбест строеж.

Сраствания на златото с други минерали

Самородното злато асоциира с разнообразни сулфидни, силикатни и сулфатни минерали и интимните сраствания на час-



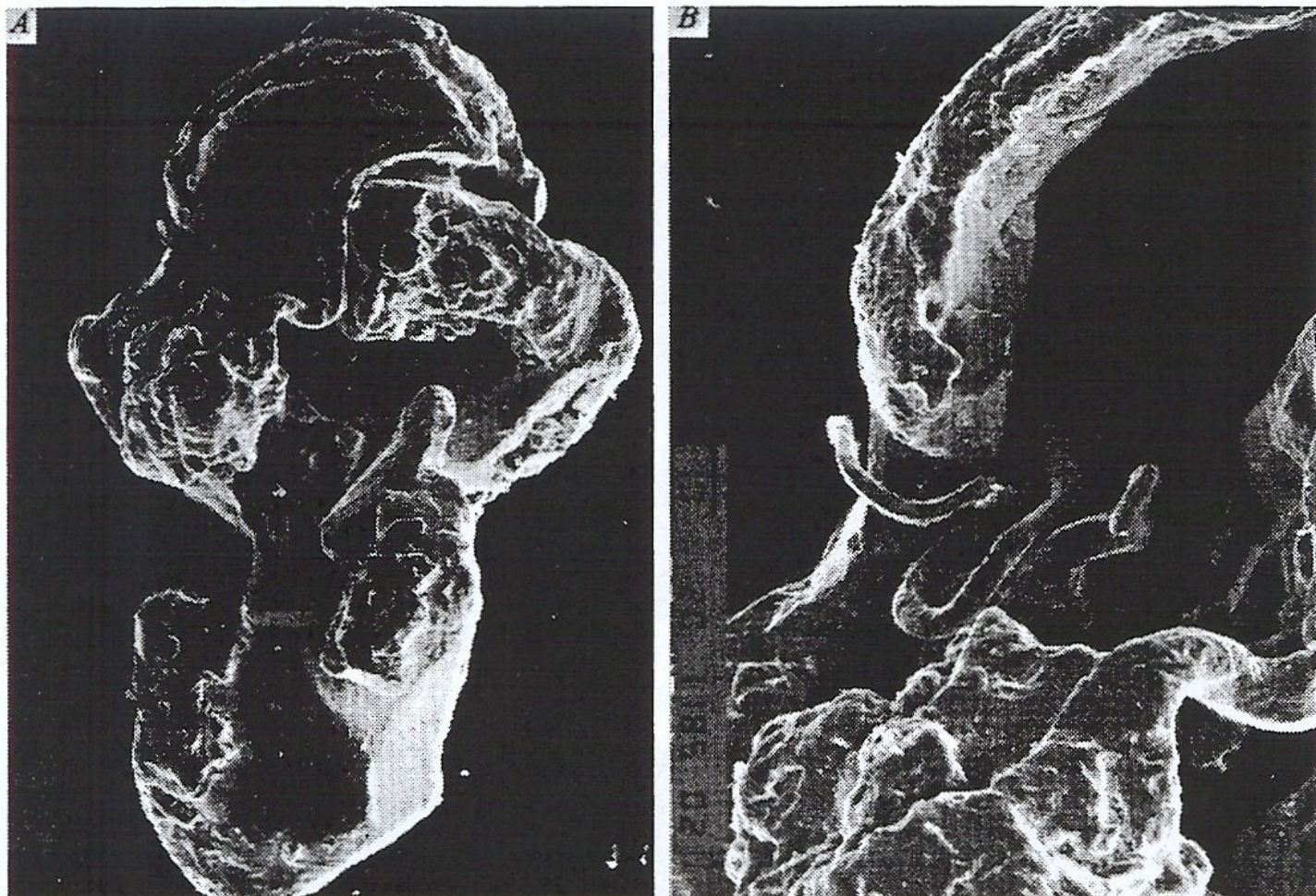
Фиг. 6. Полисинтетно срастване по една система октаедрични (111) плоскости, проявено като интензивна шриховка върху околните кристални повърхности: *A* - разтеглен октаедричен кристал с входящ ъгъл (вляво), дължащ се на срастването; *B* - изглед; *C* - детайли от повърхността на частица с псевдохексагонални очертания
 Fig. 6. Polysynthetic twinning along one system of octahedral (111) planes traced as intensive striation on the neighbouring crystal surfaces: *A* - distorted octahedral crystal with re-entrant angle (on the left) due to twinning; *B* - view; *C* - surface details of a particle with pseudo-hexagonal outlines

тиците му с тях са естествени и повсеместни, както показват микроскопските и SEM наблюдения.

По-интересни наблюдавани взаимоотношения на злато с други минерални зърна, идентифицирани чрез качествен EDS

анализ, са например:

- Сраствания с пирит, при което пиритните стени оставят плоски или шриховани отпечатаци върху повърхността на златото;
- Сраствания с медни сулфиди - борнит,



Фиг. 7. Неправилно развит златен кристал с огънати игловидни (по-дебели) и нишковидни (по-тънки) монокристални образувания, развити върху изпъкналите му части: *A* - общ изглед; *B* - детайл
 Fig. 7. Irregularly developed gold crystal with thicker, wire-like and thinner, fine-fibrous single crystal formations, growing out of its protruded upper parts: *A* - general view; *B* - detail

ковелин, халкозин, които определят релефа на повърхността на частиците.

- Сраствания с алумосиликатни минерали, включени в златото;
- Сраствания с барит, кристалчета на които са обхванати от златни израстъци с нишковидна форма (фиг. 8).

Размери на златните частици

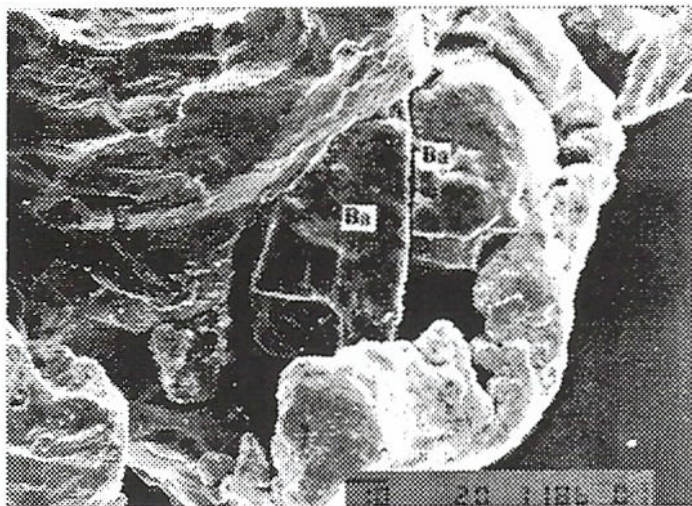
Както се вижда дори и при бегло прегледане, златните частици, имат предимно плоски, по-рядко неправилни и удължени форми. За характеризиране на техните геометрични съотношения и размери бяха извършени систематични измервания на голям брой частици, като резултатите бяха статистически обработени.

С отражателен микроскоп бяха измерени следните метрични характеристики за отделните частици: дължина (L), ширина (B) и дебелина (T). Тези измерения всъщ-

ност определят размерите на един паралелепипед (LBT), в който е вписана частицата, а обемът ѝ, в първо приближение (обикновено с известен недостиг), може да се сравни с обема на вписания триосен елипсоид, $V = \pi/6(LBT)$.

Чрез пресмятания бяха определени следните средни метрични характеристики:

- Еквивалентен диаметър, D , дефиниран като диаметъра на сфера, вписана в куб с обем, равен на този на измерения паралелепипед, т.е. $D = \sqrt[3]{LBT}$. При характеризиране на златните частици от канадски разсишни находища Giusti (1986) използва еквивалентен диаметър, $ED = \sqrt[3]{(6/\pi)(LBT)}$, който представлява диаметърът на сфера с обем, равен на този на измерения паралелепипед. Всъщност този обем е с $\sqrt[3]{6/\pi} = 1,24$ по-голям от този на вписаната сфера и съответно на вписания триосен елипсоид и дава по-лошо приближение от приетото тук.



Фиг. 8. Фрагменти от разцепен баритов кристал (Ba), обхванати от злато

Fig. 8. Fragments of a cleaved barite crystal (Ba) included in gold

- Морфоложният фактор на Корей (Corey), $F = T \sqrt{LB}$, използван за описване степента на сплеснатост на частици със среден диаметър LB и имащ малки стойности при сплесканите форми (Giusti, 1986). В практиката съществуват и други морфометрични коефициенти за описване на формите, каквито са например реципрочният коефициент на формата и плоскостният коефициент (Шило, 1985).

Средните значения на измерените величини са съответно 159, 106 и 18,4 μm , при 200 измервания и стандартна грешка 3,5 %. Те характеризират относително едри частици на самородното злато. Средната определена стойност за еквивалентния диаметър на частицата е 65 μm (фиг. 9A). Корей факторът има средна стойност 0,16, която е индикатор за значителната сплеснатост на частиците (фиг. 9B). Средното съотношение дължина/ширина на частиците, което възлиза на 1,64, показва доста ясна двумерна анизометрия в хабитусната им плоскост. Това относително удължение няма кристалографска обусловеност.

Анализът на получените величини установява достатъчно ясни корелации между метричните характеристики на частиците, с коефициенти на корелация от 0,76 при двойката $L-B$, до 0,50 при $B-T$. Тези връзки всъщност изразяват сходството във формата при по-едрите и по-дребни частици.

Корелационните връзки са представени с „мехурчестата“ диаграма на фиг. 10, която показва, че с увеличение на дължината и

ширината на частиците (по условие, винаги $L \geq B$), нараства и тяхната дебелина, изразена чрез диаметъра на мехурите.

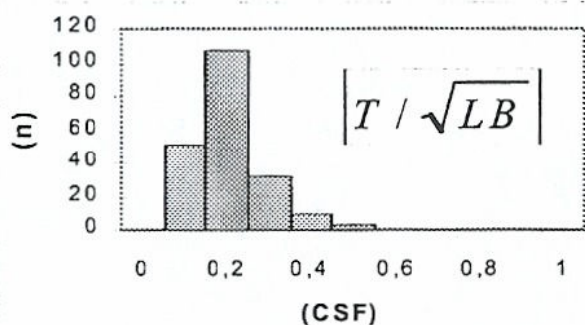
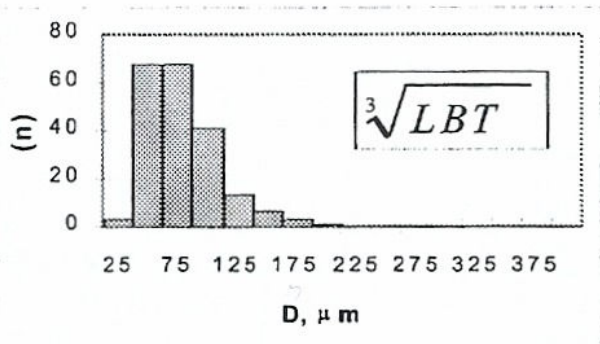
Обсъждане

Морфологията на златните частици в голяма степен зависи от условията и мястото на кристализацията и следователно може да се използва за тяхното изясняване.

За разлика от много други находища (Петровская, 1973; Латыш, 1984) в Челопеч не са наблюдават типични скелетно-дендритни образувания или фуниевидни скелетни кристали. Добре оформените идиоморфни кристали, каквито възникват при свободна кристализация в открито пространство, са относителна рядкост (фиг. 4, 7). Това е естествено за масивно-сулфидните рудни тела на находището, формиранни основно по метасоматичен път. Все пак в ограничени по обем и количество малки празнинки са могли да съществуват подходящи условия и там са се отложили такива кристали. Също там, при затруднено подхранване и дифузионен режим са образувани игловидните и нишковидни кристали (Вопев, 1990), както и гъбестото злато (фиг. 4B).

Главният тип частици с плоска и слабо удължена форма (фиг. 2) по всяка вероятност са се зародили и израснали в плоски тънки пукнатини, цепителни плоскости и междузърнови празнини, изпълвайки ги и частично замествайки някои от околните минерали. Така тяхната морфология отразява геометрията на растежното пространство. От друга страна, кристалографските особености на златото, с кубична най-плътна опаковка и октаедрични най-плътни стени, способства за специфичната собствена ориентация на плочестите по (111) кристали.

Слоевите на растеж следват най-големите октаедрични хабитусни стени на плоските кристали. Растежът им обаче протича неравномерно поради ограниченото и неправилно пространство. До известна степен грубите кристални повърхности отразяват и процеса на неравномерно заместване на по-лесно реагиращите



Фиг. 9. Хистограми, показващи: *A* - разпределението на средния размер, *D*, на 200 измерени зърна, и *B* - морфоложкия Корей фактор (Corey shape factor - CSF), спрямо броя на измерванията; ниската стойност на CSF характеризира значителната сплеснатост на частиците

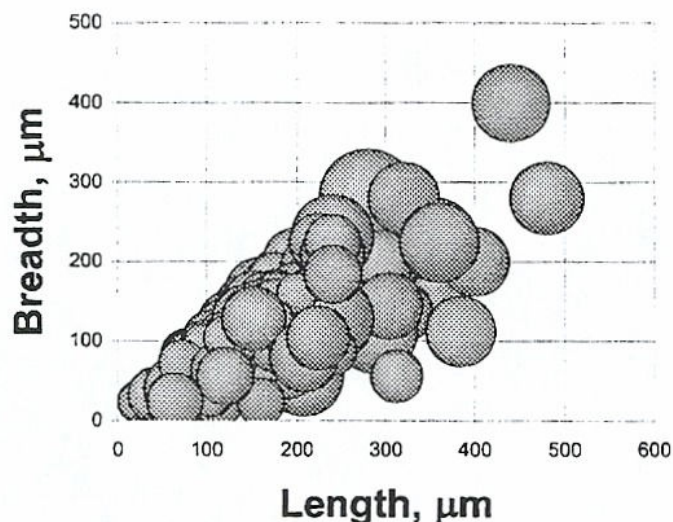
Fig. 9. Histograms showing: *A* - the mean crystal size, *D*, for 200 measured grains, and *B* - the Corey shape factor, CSF, in relation to the frequency, *n*; the low CSF values characterize the considerable flatness of the particles

медни сулфиди, с включване на някои поинертни минерали или със запазване на плоски отпечатъци от техните стени.

Неправилните, дендритовидно разклонени и амебовидни кристални и поликристални образувания са формирани в неправилни и разклоняващи се пукнатинни пространства.

При наличие на по-големи открити участъци и празнини, отделни части на неправилните или плочести кристални частици развиват правилно кристалографско остеняване и съответни кристалографски контури. Наличието на малки отворени празнини около включенията от други минерали в златото (барит - фиг. 8, пирит, алумосиликати, медни сулфиди) също доказва ролята на свободното пространство при растежа. Тази роля за първи път се допуска от Терзиев (1968).

Така геометричните и кристалографски особености на кристалите на самородното



Фиг. 10. „Мехурчеста“ диаграма: дължина (*L*) / ширина (*B*) / дебелина (*T* - изразена чрез диаметъра на кръговете-мехури), показваща корелацията между трите измерения

Fig. 10. „Bubble“ diagram: length (*L*) / breadth (*B*) / thickness (*T*, marked by the bubble diameter) showing the correlation between the three dimensions

злато отразяват локалните условия на формирането му.

Морфоложкото изучаване на златните частици от Челопеч - едно типично хидротермално масивно-сулфидно находище, и сравняването им с характеризираниите в литературата частици от разсипни находища, претърпели различно продължителен воден транспорт, както и с разсипното злато конкретно от Панагюрския район (Богданова, 1975) дава възможност за:

1. Преобладаващата и при двата типа частици общо плочеста форма не може да се свързва с механични деформации при водния транспорт, който в първия случай липсва. Най-вероятно, тази форма има първичен характер и отразява особеностите на кристализация на златото в коренните му находища.

2. Повърхностите на първичните частици от Челопеч имат огрубен, не рядко финослоист микрорелеф, а във външните им очертания нерядко се проявяват кристалографски ръбове. При разсипното злато повърхностите и контурите на частиците са значително по-заоблени, което доказва, че неравностите с микронен размер се изглаждат при транспорта, и то съобразно с неговата продължителност.

Повечето автори приемат, че относител-

но по-едрозорнестото злато се образува при преотлагане и частична рекристализация на по-ранно финокристално злато. Такъв процес изглежда логичен, но засега сигурни доказателства за него не можем да намерим.

Заклучение

Златото в находище Челопеч е представено предимно в самородна форма.

Голяма част от златните частици остават почти незасегнати от техногенни деформации в процесите на смилане и получаване на концентратите, което позволява систематичното изучаване на оригиналната им форма с помощта на оптична и сканираща електронна микроскопия.

Главните морфоложки типове златни частици са: плоски, разклонени и неправилни монокристални или поликристални предимно хипидиоморфни зърна, идиоморфни изометрични и разтеглени кристали, игловидни и нишковидни кристали, фини дендритовидни и гъбести образувания. Оформени са от октаедрични и кубични форми, с преобладание на първите, и предимно с огрубени и неравни повърхности. Плоските кристали са развити по октаедрична хабитусна плоскост, най-плътна в структурата на златото. Наблюдаваните елементи на послоен кристален растеж също се паралелни на тази плоскост. Широко разпространено е полисинтетното срастване по (111).

Систематичното измерване потвърждава характерната сплеснатост на частиците, при средно отношение на дебелината: средната ширина (морфоложки Корей фактор) 0,16. Средният размер (еквивалентен диаметър) на златните частици от гравитационния концентрат е 65 μm .

Плоските, удължени или пространствено разклонени неправилни форми на частиците отразяват до голяма степен геометрията на пукнатините и порите в които кристализират. При отлагане в свободно пространство възникват изометрични, удължени, игловидни и нишковидни кристали, гъбести порьозни и фини дендритовидни образувания.

Така геометричните и кристалографски

особености на кристалите на самородното злато отразяват локалните условия на формирането му. Корелация между размера на частиците и тяхната пробност не се установява.

Благодарности. Авторите изказват благодарността си към Наван Болкан Рисорсиз АД за финансовата подкрепа при извършване на настоящето изследване. За оказаното съдействие авторите са благодарни също на д-р Джо Круми и на ръководствата на мината и обогатителната фабрика, инж. Ив. Кесяков, инж. Аг. Игнатов, инж. С. Съев, инж. Е. Трифонова. Много важна беше и квалифицираната помощ на физика Ел. Мандова.

Литература

- Богданова, Р. 1975. Морфоложки особености и състав на разсипното злато от Панагюрско. - *Рудообр. процеси и минерал. находища*, 3, 3-12.
- Богданов, Б. 1987. *Медните находища в България*. С., Техника, 388 с.
- Коваленкер, В. А., Д. Цонев, В. В. Бресковска, В. Ц. Малов, Н. В. Тронева. 1986. Новые данные по минералогии медноколчеданных месторождений Центрального Средногогорья Болгарии. - В: *Метасоматизм, минералогия и вопросы генезиса золотых и серебряных месторождений в вулканических толщах*. М., Наука, 91-110.
- Ковачев, В., Д. Димов, Й. Пиров. 1988. Нов морфогенетичен тип злато от находище Челопеч и съпътстващата го минерализация. — *Год. ВМГИ*, 34, 1 — геология., 195-207.
- Латыш, И. К. 1984. *Атлас морфологии, структур и асоциаций самородного золота Украины*. Киев, Наукова думка. 296 с.
- Петровская, Н. В. 1973. *Самородное золото*. М., Наука, 330 с.
- Петрунов, Р. 1994. *Минерални парагенези и физикохимични условия на рудообразуването в находище Челопеч*. Кандидатска дисертация. ГИ БАН.
- Петрунов, Р. 1995. Рудни минерални парагенези и зоналности в находище Челопеч. — *Геохим., минерал. и петрол.*, 30, 89-98.
- Терзиев, Г. 1968. Минерален състав и генезис на рудното находище Челопеч. - *Изв. Геол. Инст. БАН*, 17, 123-187.
- Цонев, Д. 1982. Месторождение Челопеч. — *Путеводитель экскурсии*, 2, 13 Конгр. ММА, Варна, 73-90.
- Шило, Н. А. 1985. *Основы учения о россыпях*. М., Наука.

- Andrew, C. J. 1997. The geology and genesis of the Chelopech Au-Cu deposit, Bulgaria; Europe's largest gold resource. - In: *Europe's Major Gold Deposits Conf.*, Newcastle, North Ireland, Abstr. Vol. and Progr., 68-72.
- Bogdanov, K., D. Tsonev, K. Kuzmanov. 1997. Mineralogy of gold in the Elshitsa massive sulphide deposit, Sredna Gora zone, Bulgaria. - *Mineral. Deposita*, 32, 3, 219-229.
- Bonev, I. K. 1990. Whisker growth of minerals. - In: *15 Gen. Meet. IMA*, Beijing, China. Abstr., 1, 382-384.
- Bonev, I. K., I. Vesselinov. 1996. Comments on the paper by L. M. Lawrance and B. J. Griffin: Crystal features of supergene gold at Hannan South, Western Australia. - *Mineral. Deposita*, 31, 348-349.
- Giusti, L. 1986. The morphology, mineralogy, and behavior of „fine-grained” gold from placer deposits of Alberta: Sampling and implications for mineral exploration. - *Can. J. Earth Sci.*, 23, 1662-1672.
- Groen, J. C., J. R. Craig, J. D. Rimstidt. 1990. Gold-rich rim formation on electrum grains in placers. - *Canad. Mineral.*, 28, 207-228.
- Hallbauer, D. K., T. Utter. 1977. Geochemical and morphological characteristics of gold particles from recent river deposits and the fossil placers of the Witwatersrand. - *Mineral. Deposita*, 12, 293-306.
- Kuikin, S. 1998. To the genesis of massive sulfide gold-copper-pyrite deposits of Elshica type, Panagyurishte Ore Region. - *Geol. and Mineral Resources*, 5, 9-13.
- Lawrance, L. M., B. J. Griffin. 1994. Crystal features of supergene gold at Hannan South, Western Australia - *Mineral. Deposita*, 29, 391-398.
- Singer, D. A. 1995. World class base and precious metal deposits - A quantitative analysis. - *Econ. Geol.*, 90, 88-104.
- Strashimirov, S., V. Kovachev. 1994. Gold in copper deposits from the Srednogorie zone (Bulgaria). - *Bull. Geol. Soc. Greece*, - Proc. 7 Congr., 30, 3, 275-285.
- Utter, T. 1979. The morphology and silver content of gold from the Upper Witwatersrand and Ventersdorp systems of the Klerksdorp gold field; South Africa. - *Econ. Geol.*, 74, 27-44.
- Watterson, J. R. 1992. Preliminary evidence for the involvement of budding bacteria in the origin of Alaskan placer gold. - *Geology*, 20, 4, 289-384.

Приета на 28.10.1998 г.
Accepted October 28, 1998