

## ODNAWIANIE SIĘ ROZSYPISK ZŁOTONOŚNYCH PRZEDPOLA SUDETÓW WSCHODNICH

### RENEWAL OF GOLD-BEARING PLACERS FROM THE EAST SUDETIC FORELAND, POLAND

JAN WIERCHOWIEC<sup>1</sup>

**Abstrakt.** W obrębie sekwencji okruchowych przedpola Sudetów Wschodnich wyróżniono w sumie pięć różnowiekowych poziomów złotonośnych związanych z preglacjalnymi „białymi” żwirami typu serii Gozdnicy, wodnolodowcowymi piaskami i żwirami plejstocenu oraz osadami holocenijskich tarasów Złotego Potoku i Białej Głuchołaskiej. Maksymalne zawartości Au (0,4 g/m<sup>3</sup> osadu) notuje się w grubokruchowych żwirach kwarcowych, przestrzennie związanych z preglacjalną (eoplejstocenijską) doliną paleo-Białej Głuchołaskiej. Na powierzchni wyróżnionych dwóch podtypów złocin (ziarna blaszkowo-płytkowe, płaskie lub wtórnie zdeformowane oraz cementacyjno-grudkowe) rozpoznano i opisano nano- i mikrostruktury (morfotypy) Au oraz wewnętrzne tekstury (widoczne w przekroju ziaren), wskazujące na procesy tzw. odnawiania się rozsypisk złotonośnych. Są one związane z selektywnym rozpuszczaniem złota w warunkach hipergenicznych, jego wytrącaniem z roztworu i wtórną rekrytalizacją prowadzącą w rezultacie do formowania skupień złota autogenicznego. Rozpoznano dwa morfotypy złota autogenicznego: banieczkowate lub drobnorobaczkowe skupienia Au oraz krystaliczne skupienia i przerosty złota. Wspomniane morfotypy są bardzo dobrze zachowane i nie noszą oznak abrazji. Szczegółowa analiza SEM pokazuje, że pojedyncze banieczkowate nanocząsteczki z czasem zrastały się formując inkrustacje Au, a ostatecznie warstwę złota autogenicznego na powierzchni złociny pełniące rolę swego rodzaju osadnika dla nowych nanocząstek. Występowanie banieczkowatych lub drobnorobaczkowych skupień Au w paragenzie z minerałami ilastymi oraz brak jakichkolwiek oznak abrazji tych skupień wskazują, że utworzyły się one *in situ*, to jest są pochodzenia autogenicznego. Nano- i mikroskupienia złota robaczkowo-pęcherzykowego zbudowane ze złota amorficznego mogą być wynikiem koagulacji koloidów lub ich adsorpcji przez minerały ilaste wypełniające kawerny na powierzchni złocin. Krystaliczne przerosty złota są prawdopodobnie efektem rekrytalizacji złota koloidalnego wytrącanego na powierzchni złocin po depozycji w rozsypisku.

**Słowa kluczowe:** rozsypiska złotonośne, charakterystyka złota okruchowego, złoto autogeniczne, Sudety Wschodnie.

**Abstract.** Auriferous sequences in the East Sudetic Foreland include up to five gold-bearing horizons and are associated with the so-called preglacial “White Gravels”, Pleistocene and Holocene fluvial deposits overlying the Neogene sediments of the Poznań formation or Paleozoic metamorphic rocks. The significant placer potential for gold in the region lies in the preglacial (Eopleistocene) fluvial drainage system, primarily in paleo-channels of the Biała Głuchołaska River. The White Gravels, the richest gold-bearing deposits, contain up to 0.4 g/m<sup>3</sup> Au near the base of the auriferous horizon. Two visibly distinct gold sub-types are identified based on their overall morphology: 1) flaky gold, flattened or reshaped by refolding; 2) craggy, irregular grains. All the grains are alloys of gold and silver, with Te and Se occurring as trace amounts. Two distinct gold sub-types of detrital gold display surface morphotypes and internal textures of Au and Ag dissolution indicative of supergene gold modification, as well as authigenic Au formation and aggregation resulting in the renewal of gold-bearing placers. The indicative morphotypes include nano- to microparticulate bud- or bubble-like gold, as well as overgrowths and aggregates of crystalline plate-like gold. They are well preserved and lacking any signs of physical damage. Stages of the gold particles growth have been observed during the nano- to microtextural investigations of gold grains, from the isolated semi-spherical nanoparticles, agglomerates, to irregularly shaped plates of gold. The presence of nano- to microphase gold embedded in the fine-grained assemblages of clayey masses and the lack of any signs of grain surface abrasion confirmed that bud- and bubble-like Au, as well as complex aggregates of plate-like gold, must have formed *in situ*, *i.e.* are authigenic in origin. Chemical transfer may be related to both the Au precipitation from a colloidal solution as well as the adsorption by clay minerals and surface precipitation of Au on particles of mineral substrate.

**Key words:** gold placer deposits, gold characteristic, authigenic gold, East Sudetes.

<sup>1</sup> Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; e-mail: jan.wierchowiec@uw.edu.pl.

## WSTĘP

Badania okruczowej mineralizacji złotońskiej przedpola Sudetów, przeprowadzone przez autora w ciągu ostatnich kilku lat, dostarczyły nowych danych o zjawisku odnawiania się poprzednio wyeksploatowanych okruczowych złóż złota (Krendelew, 1991; Craw, 1992; Grodzicki, 1997; Wierchowicz, 2010; Reith i in., 2012; Wierchowicz i in., 2018). Wspomniane odnawianie się rozsypisk złotońskich jest powodowane procesami chemicznej mobilizacji i wtórnego wytrącania (reprecypitacji) w osadach okruczowych o różnej genezie „nowego” złota autogenicznego.

W warunkach hipergenicznych procesy mobilizacji złota zachodzą zarówno w strefach intensywnego wietrzenia late-rytowego (Mann, 1984; Wilson, 1984; Shuster i in., 2017), jak i w warunkach chłodnego klimatu peryglacialnego (Watterson, 1985; Southam, 1998; Townley i in., 2003). Występowanie w aluwialnych złożach rozsypiskowych krystalicznych agregatów złota oraz złota autogenicznego w postaci oktaedrycznych kryształów lub skupień o typowej strukturze gąbczastej na powierzchni obtoczonych złocin i samorodków wskazuje na postdepozycyjną remobilizację złota w samym rozsypisku (Freise, 1931; Clough, Craw, 1989; Youngson, Craw, 1993, 1995; Hough i in., 2008; Osovetsky, 2016). Możliwość wytrącania agregatów złota autogenicznego na powierzchni różnych minerałów i intensyfikację tego procesu, gdy osadnikiem jest metaliczne złoto, potwierdzają dane eksperymentalne (Shchegol'kov i in., 2007).

Przykłady samorodków o złożonej strukturze wewnętrznej, będącej wynikiem sklejanania (spawania) mniejszych agregatów przez złoto „nowe”, opisano z plioceniśko-czwartorzędowych rozsypisk aluwialnych Kanady (Giusti, 1986; Eyles, 1995) i Nowej Zelandii (Youngson, Craw, 1999; Falconer, Craw 2009; Reith i in., 2012). Potwierdzeniem chemicznej mobilizacji i wtórnego wytrącania złota są również współczesne znaleziska fragmentów miedzianej siatki pokrytych gąbczastymi nalotami złota czy też żelaznej łopaty z agregatami złota „nowego” na powierzchni (Albanese, 1986; Abramov i in., 1993).

## ZAKRES I METODY BADAŃ

Opróbowaniem panwiowym (szlichowym) objęto materiał z rdzeni wiertniczych i szurfów (lokalizacja na fig. 1).

Próbki panwiowe, pobierane z reguły co 0,5 m bieżącego z dających się wyodrębnić serii piaszczysto-żwirowych, po przesianiu przez sito o wielkości oczek 2,0 mm i odszlamowaniu, płukano ręcznie w stalowych czerpakach jakuczych (o poj. 12 l) do tzw. szarego szlichu. Ogółem z wierceń i szurfów pobrano i poddano analizie laboratoryjnej, ze szczególnym zwróceniem uwagi na zawartość złota okruczowego, 85 próbek panwiowych.

Prace laboratoryjne wykonano według metodyki przedstawionej w pracy Kanasiwicza (1982). Polegały one na separacji minerałów na frakcje: magnetyczną, elektromagnetyczną i niemagnetyczną za pomocą magnesu

Ventouse, rozdzieleniu frakcji niemagnetycznej wg ciężaru właściwego w cieczy ciężkiej (bromoforn) o ciężarze właściwym  $2,89 \text{ g/cm}^3$  oraz jakościowym i ilościowym oznaczeniu minerałów ciężkich w próbach panwiowych (szlichach).

Przed rozdzieleniem w bromofornie z frakcji niemagnetycznej wyseparowano złoto okruczowe. Złociny wybierano pod binokulem za pomocą pincety, stosując powiększenie do  $100\times$ . W celu dokładniejszego niż w przypadku metody szacunkowej określenia zawartości złota okruczowego w osadzie, policzono wszystkie jego ziarna w próbach panwiowych. Ciężar całkowity złota z poszczególnych prób, uzyskany przez ważenie wyseparowanych ziaren na wadze laboratoryjnej (błąd ważenia  $\pm 0,001 \text{ g}$ ), przeliczono na zawartość złota w  $\text{g/m}^3$  osadu.

Badanie struktury złocin oraz analizę składu chemicznego złota w punktach występowania nano- i mikrostruktur wskazujących na wytrącanie złota „nowego” (analizy punktowe na niepolerowanej powierzchni ziaren) przeprowadzono przy użyciu mikroskopu skaningowego Sigma VP i Ariga 60 (oba produkowane przez Zeiss, Niemcy), wyposażonego w spektrometrię EDS typu XFlash 6/10 i XFlash 6/30 firmy Bruker AXS. Napięcie przyspieszające wynosiło 20 kV, a średnica apertur 30, 60 lub 120 mm.

Wybrane ziarna złota zatapiało się w żywicy, a następnie szlifowano na papierze korundowym i polerowano dla uzyskania maksymalnie gładkiej powierzchni. Podczas polerowania zwrócono szczególną uwagę na efekty plastycznego rozsmarowywania złota, które mogą być mylone ze strukturami typowymi dla wytrąceń złota autogenicznego (Knight i in., 1999).

Na tak przygotowanej powierzchni przekroju złociny wykonywano ilościowe analizy chemiczne (EMPA) za pomocą mikroskopu elektronowego CAMECA SX Five. Reprezentatywne ziarna złota analizowano na zawartość: Ag, As, Au, Bi, Cu, Hg, Pb, Pd, Pt, Tl i Zn. Jako wzorce zostały użyte czyste metale (Au, Pd, Pt), chalkopiryt (Cu), ZnAs (Zn, As),  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  (Bi), Tl (I, Br) (Tl) i crocoite (Pb), HgTe (Hg). Warunki pracy dla EMPA to: napięcie przyspieszające – 15 kV, prąd wiązki pierwotnej – 10 nA, czas zliczania – 25 sekund. Zawartości oznaczonych pierwiastków podano w % wagowych. Błąd analizy dla różnych pierwiastków wahał się od 0,05 (Te, Se) do 0,3 (Au) % wag.

Na wybranych przekrojach złocin wykonano kilkadziesiąt analiz punktowych (w mikroobszarze) oraz mapping na przekrojach ziaren.

Dodatkowo, w celu zarejestrowania stref o różnym składzie chemicznym, wypolerowaną powierzchnię przekroju fotografowano techniką elektronów wstecznie rozproszonych (ang. *back-scattered electron photograph*). Zmienność tego składu odzwierciedlają różne odcienie szarości w otrzymanym obrazie fotograficznym. Im jaśniejsze tony, tym wyższa próba złota (mniej pierwiastków-domieszek w składzie złociny).

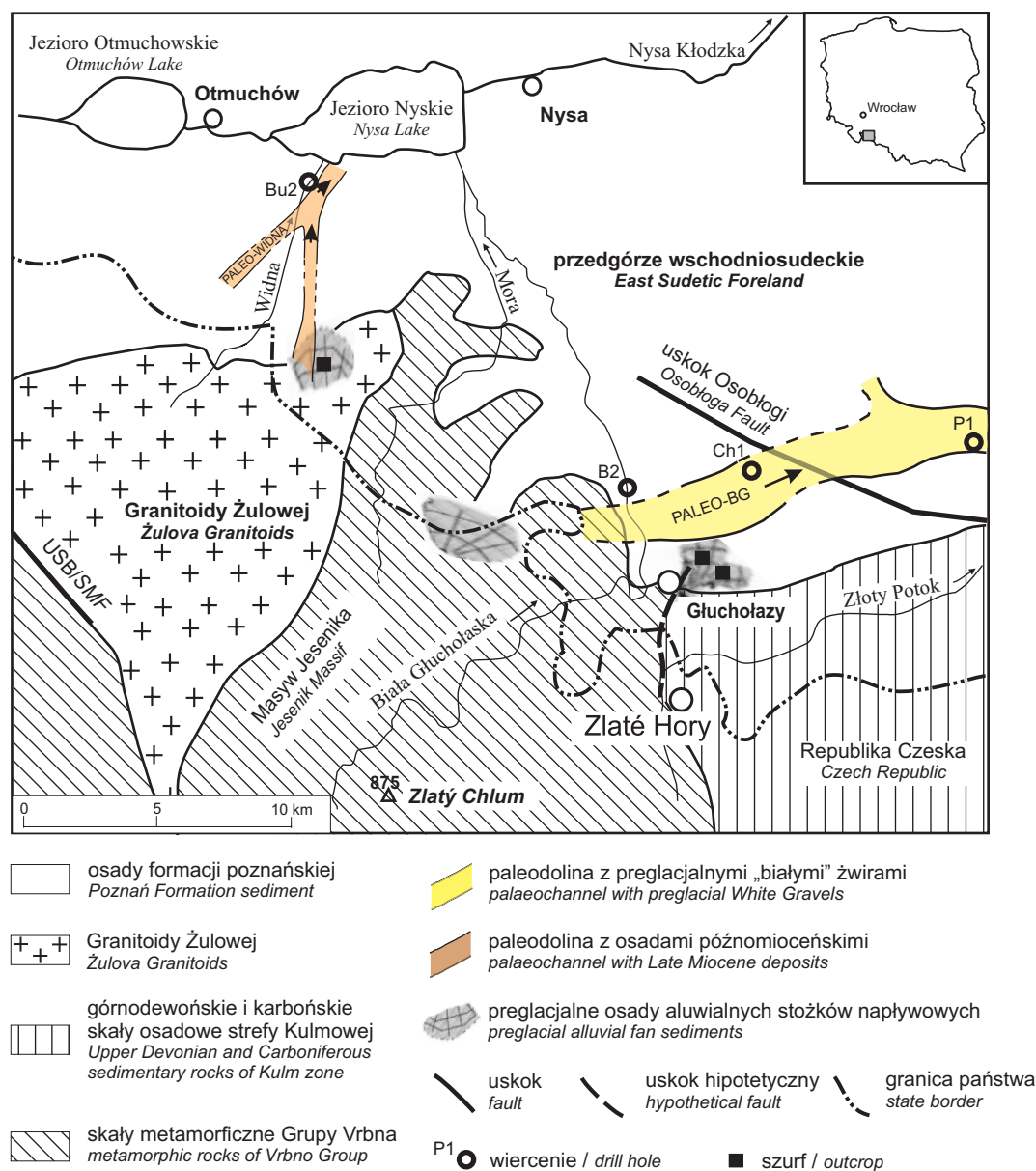
Analizy SEM i EMPA przeprowadzono w Laboratorium Nanofan Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego (Polska).

## HISTORIA GEOLOGICZNA ROZSYPISK ZŁOTONOŚNYCH

Do początków neogenu obszar przedpola Sudetów Wschodnich (fig. 1) był zdominowany przez procesy głębokiego wietrzenia podłoża krystalicznego (Badura, Przybylski, 2004). W krajobrazie tego obszaru przeważały równiny wyścielone grubymi pokrywami zwietrzelin z lokalnymi elewacjami podłoża w postaci gór wyspowych. Później-

sza sedymentacja, po strop formacji poznańskiej włącznie, utrwaliła rozwiniętą w paleogenie rzeźbę denudacyjną z dominacją wietrzenia chemicznego (Badura i in., 2004).

Śladowe ilości złota okrucowego w osadach piaszczysto-żwirowych, związanych z okresem usuwania zwietrzelin i formowania lokalnego systemu rzeczno-żwirowego (paleo-Widna; fig. 1), wskazują na niedostateczną ekspozycję skał z mineralizacją pierwotną w obrębie ówczesnej powierzchni napełnienia lub/i na niską efektywność funkcjonujących



**Fig. 1. Uproszczona mapa geologiczna Sudetów Wschodnich i ich Przedgórze (bez pokrywy osadów plejstoceno-holocenicznych) na podstawie Wierchowicz (2011), przedstawiająca przypuszczalny zasięg złotonośnych osadów paleodolin rzecznych z lokalizacją punktów próbowania panwiowego**

USB – uskoki sudecki brzeżny; BG – Biała Głucholańska

Simplified geologic map (without Pleistocene to Holocene cover) of the East Sudetes and its foreland compiled after Wierchowicz (2011) showing the approximate extent of palaeochannels with auriferous deposits and sampling sites for this study

SBF – Sudetic Boundary Fault; BG – Biała Głucholańska river

w tym czasie procesów uruchamiania złota ze skał macierzystych. Potwierdzają to również niskie (1–2 ppb) geochemiczne zawartość złota w ilasto-mułkowych utworach jeziorzyskowych, deponowanych w początkowym etapie usuwania zwietrzelin (Wierchowicz, 2000).

Rozwój tektonicznej krawędzi morfologicznej w pliocenie zróżnicował obszar na wyniesioną część górską – Sudety Wschodnie i ich przedpole – Przedgórze Paczkowskie (Badura, Przybylski, 1999). W rezultacie głębokiej, szybko postępującej denudacji Sudetów z dominacją wietrzenia mechanicznego pojawiły się nowe obszary alimentacyjne i ustabilizowały się warunki sprzyjające uruchamianiu złota ze skał pierwotnych. Wzdłuż skarpy sudeckiego uskoku brzeżnego, z systemem aktywnych przez cały pliocen uskoku blokowych rowu Paczkowa, formowały się wzbogacone w złoto okruczowe wysoczyznowe zasypania typu stożków żwirowo-piaszczystych. Są one korelowane z występującymi na przedpolu całych Sudetów molasopodobnymi osadami typu serii Gozdniczy (Kryza, Poprawski, 1987; Dyjor, 1995).

W preplejstocenie, po ustaniu ruchów tektonicznych, ukształtowała się nowa regionalna sieć rzeczna odwadniająca przedpole Sudetów Wschodnich głównie ku wschodowi (otoczaki granitoidów żulowskich i skał śródsudeckich w osadach aluwialnych paleo-Białej Głuchołaskiej; fig. 1). W warunkach chłodnego, preglacjalnego klimatu starszego plejstocenu złotonośne stożki żwirowo-piaszczyste z dużą zawartością kaolinowego materiału mułowo-ilastego były wielokrotnie przemywane i redeponowane przez paleo-Białą Głuchołaską i jej dopływy. W rezultacie, w aluwialnych „białych” żwirach wypełniających paleodoliny preplejstocenijskiej sieci rzecznej doszło do znacznego podkoncentrowania złota okruczowego i innych minerałów ciężkich, zwłaszcza epidotu, amfiboli i staurolitu (Wierchowicz, 2002, 2007).

W czasie plejstocenijskich zlodowaceń układ potencjalnie złotonośnych paleodolin był modyfikowany przez lądolód, głównie w wyniku zasypanywania ich fragmentów materiałem glacialnym i fluwioglacialnym oraz częściowej erozji i „rozcieńczenia” starszych horyzontów złotonośnych w masie osadów lodowcowych. Do założenia nowego układu systemu dolin przedpola Sudetów Wschodnich z doliną Białej Głuchołaskiej włącznie, doszło prawdopodobnie w interglacjale mazowieckim. Ostateczne jego ukształtowanie nastąpiło w interglacjale eemskim, gdy zaczął rozwijać się basen Morza Bałtyckiego, do którego skierowały się rzeki całego Przedgórze Sudeckiego (Badura, Przybylski, 2000; Badura i in., 2004).

W holocenie, po całkowitym zaniku lądolodu skandynawskiego i późniejszym ociepleniu, w złotonośnych osadach aluwialnych dolin: Widnej, Białej Głuchołaskiej, Złotego Potoku, Prudnika i innych, wyraźnie zaznacza się bezpośrednia dostawa materiału sudeckiego (kwarcyty, gnejsy, łupki kwarcytowe i fyllity). Niemniej jednak sporadyczne występowanie form gałązkowych oraz haczykowato-gąbkowych charakterystycznych dla złota żyłowego i złóż eluwalno-deluwalnych oraz brak złocin nieobtoczonych (ostrokrawędzistych) wskazują na znikomą erozję pierwotnych skał złotonośnych. Przewaga złocin blaszkowo-płytowych, przy jednocześnie dobrym obtoczeniu potwierdza, że złoto okru-

chowe ulegało głównie redystrybucji w obrębie młodszych horyzontów, bez znaczącej jego dostawy z nowych obszarów alimentacyjnych (Godlewski, Wierchowicz, 2004).

## CHARAKTERYSTYKA GEOLOGICZNO-PETROGRAFICZNA OSADÓW ZŁOTONOŚNYCH

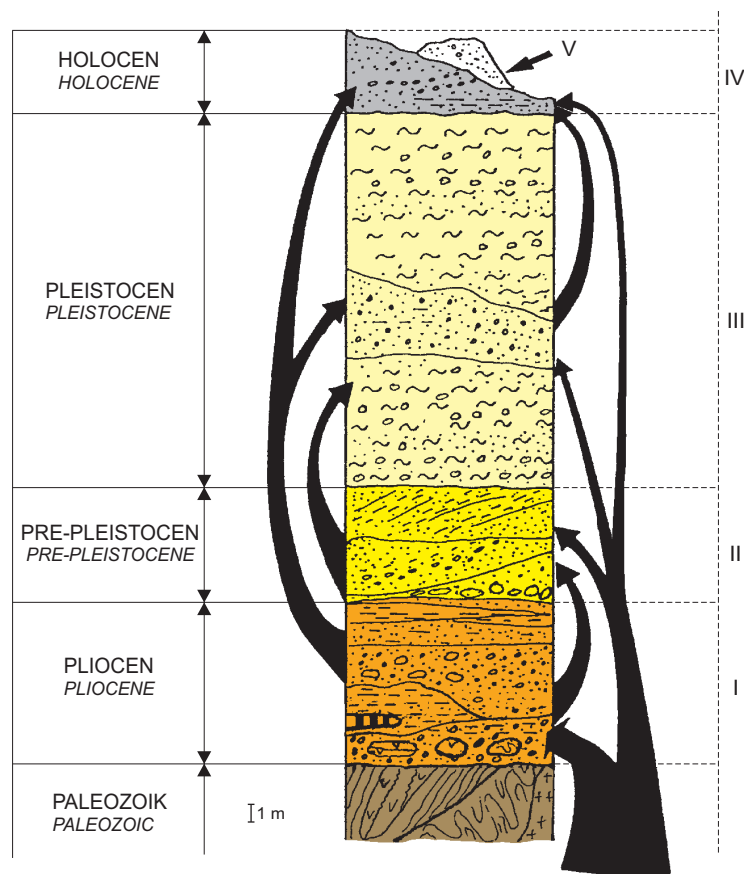
Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy materiałów publikowanych i archiwalnych (Grodzicki, 1997; Wierchowicz, 2000, 2011) w obrębie sekwencji okruczowych przedpola Sudetów Wschodnich można wyróżnić w sumie pięć różnowiekowych poziomów złotonośnych (fig. 2). Mimo tego, że wszystkie pięć nie zostały rozpoznane w jednym profilu stratygraficznym (zwykle współwystępują tylko dwa horyzonty), są one ze sobą powiązane genetycznie (Wierchowicz, 2001, 2006).

Najniższy horyzont złotonośny (I) jest związany z grubookruczowymi osadami typu serii Gozdniczy, które w rejonie Głuchołaz (fig. 1) budują wysoczyznowe zasypania typu stożków żwirowo-piaszczystych. Złoto występuje w całym profilu – w ilości od 50 do 200 złocin/m<sup>3</sup> osadu, nie osiągając wartości złożowych tj. >0,1 g/m<sup>3</sup>. Maksymalne zawartości Au w paragenezie z cyrkonem, staurolitem, granatami i innymi minerałami ciężkimi zarejestrowano w przemytych, żle wysortowanych żwirach z licznymi otoczkami mlecznego kwarcu (Wierchowicz, 2007).

Drugi horyzont złotonośny (II) wyznaczają tzw. preglacjalne, „białe” żwiry kwarcowe, przestrzennie związane z preplejstocenijską siecią rzeczną (fig. 1, 2). Są to gruboziarniste, polimiktyczne żwiry z otoczkami kwarcu, kwarcytów i granitoidów żulowskich, rozpoznane wierceńiami archiwalnymi. Zawartość złota jest zmienna – od kilkunastu do ponad 500 złocin/m<sup>3</sup> osadu i rośnie ku spągowi sekwencji. Wartości złożowe (0,12–0,37 g/m<sup>3</sup> osadu) notuje się w grubookruczowych żwirach reprezentujących faćję bruku korytowego doliny paleo-Białej Głuchołaskiej (wiercenia: Ch1, P1; fig. 1). W składzie minerałów ciężkich wzrasta udział minerałów nieodpornych na wietrzenie chemiczne (epidot, amfibol). Subrównoleżnikowy przebieg stosunkowo szerokiej i płytkiej doliny paleo-Białej Głuchołaskiej ma prawdopodobnie założenia tektoniczne i jest uwarunkowany równoleżnikowym przebiegiem uskoku blokowych związanych z południowymi ramami rowu Paczkowa (Badura, Przybylski, 1999; Wierchowicz, 2002).

Największe rozprzestrzenienie ma trzeci horyzont złotonośny (III). Jest on związany z glacialnymi osadami plejstocenu (brunatne, wodnolodowcowe piaski i żwiry oraz gliny morenowe) i cechuje się najniższymi, średnimi zawartościami złota. Metal występuje w zmiennych koncentracjach – na poziomie od kilkunastu do 60 złocin/m<sup>3</sup> osadu, z maksymalnymi zawartościami w utworach stanowiących nadkład starszych poziomów złotonośnych (wiercenie P1).

Czwarty horyzont złotonośny (IV) stanowią grubookruczowe osady tarasów holocenijskich rzek i potoków Sudetów Wschodnich oraz ich przedpola (Widna, Biała Głuchołaska, Złoty Potok, Prudnik i inne pomniejsze) (fig. 1, 2).



**Fig. 2. Schemat stratygraficzny redystrybucji złota okrucowego w obrębie różnowiekowych poziomów złotoносnych sekwencji okrucowych przedpola Sudetów Wschodnich opisanych w tekście (Wierchowiec, 2002; zmienione)**

I, II, III ... – kolejny poziom złotoносny

Schematic stratigraphic section of auriferous sediments with redistribution paths of gold through gold-bearing horizons of the East Sudetic Foreland described in the text (after Wierchowiec, 2002)

I, II, III ... – successive gold-bearing horizon

Maksymalne zawartości złota rozsypiskowego – od 0,12 do 0,24 g/m<sup>3</sup> osadu, stwierdzono w złe wysortowanych, zaglinionych żwirach piaszczystych spągu utworów holocenu tarasów rzeki Widna w rejonie Bukowa (wiercenie Bu2) oraz Biała Głuchołaska w Bodzanowie k/Głuchołazów (wiercenie B2).

Najwyższy horyzont złotoносny (V) ma genezę antropogeniczną i jest pozostałością starych (głównie średnio-wiecznych) robót górniczych. Są to piaski i żwiry holocenu wymieszane z hałdami przemytych osadów złotoносnych ze śladowymi zawartościami niewypłukanego złota.

## CHARAKTERYSTYKA ZŁOTA OKRUCOWEGO – WYNIKI BADAŃ

### ROZMIARY ZŁOCIN

Wymiary złocin z badanych osadów złotoносnych przedpola Sudetów Wschodnich bardzo rzadko przekraczają 1,0 mm. Dane o wymiarach złocin dochodzących mak-

symalnie do 2–3 mm pochodzą ze żwirów preglacialnych okolic Złatych Hor oraz osadów eluwialnych rejonu złoża Złoty Chlum (Fojt i in., 1987), natomiast źródła historyczne mówią o samorodkach przekraczających masę 1000 g. Największe z nich o wadze 1387 i 1783 g zostały znalezione pod koniec XVI w. w czasie prac związanych z drążeniem szybów i chodników w osadach preglacialnych na odcinku Głuchołazy–Zlaté Hory (Večeřa, 1996).

Rozkład uziarnienia złota okrucowego wykazuje zdecydowaną przewagę klas: 0,26–0,50 i 0,51–0,75 mm, które łącznie stanowią ponad 70% złocin (Wierchowiec, 2002).

Niezależnie od wieku i typu osadów, wyraźne odznaczanie się (naśladowanie) w składzie granulometrycznym złota okrucowego z rejonu Głuchołaz charakterystycznej „głuchołaskiej mody” 0,16–0,50 mm, poczynając od starszych osadów typu serii Gozdnicy, a na holocenijskich piaskach i żwirach dolin: Białej Głuchołaskiej i Widnej kończąc, wskazuje na procesy przemywania i redepozycji (recyklingu) starszych osadów złotoносnych. Podobne zależności w rozkładzie uziarnienia różnowiekowych horyzontów

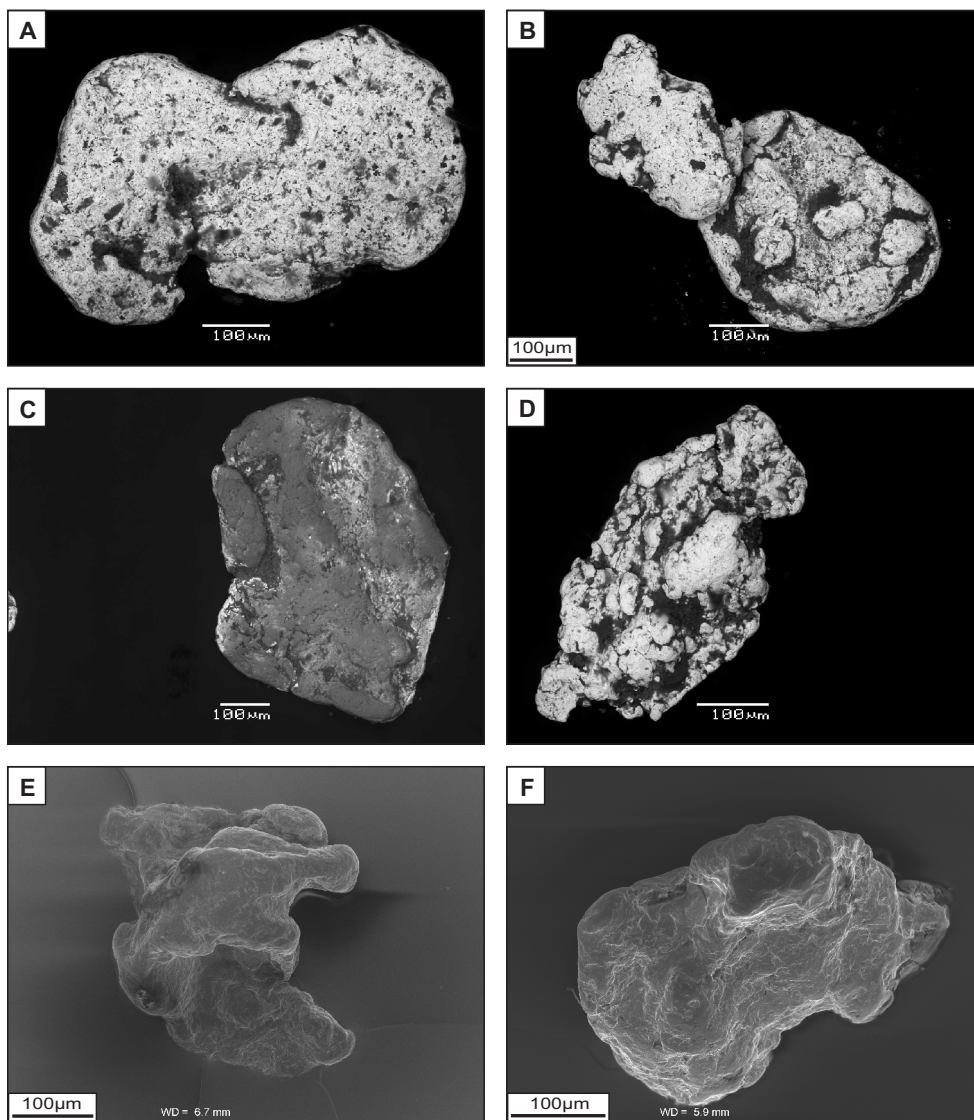
złotośnych opisano z rozsypek Otago w Nowej Zelandii (Youngson, Craw, 1995, 1999).

#### KSZTAŁT I MORFOLOGIA ZIAREN

Wyniki oznaczeń morfogenetycznych złota z osadów typu serii Gozdnicy wykazują zdecydowaną przewagę form blaszkowo-płytkowych (fig. 3A–C) oraz cementacyjno-

-grudkowych (fig. 3D–F). Pozostałe klasy morfogenetyczne: formy haczykowato-gąbkowe, gałązkowe i kropłowato-ameboidalne stanowią niespełna kilka % ogólnej liczby złocin.

W osadach zwirowo-piaszczystych preplejstocenu obserwuje się wzrost udziału płytek, blaszek i plewek, przy jednoczesnym spadku zawartości masywnych złocin cementacyjno-grudkowych. Formy haczykowato-gąbkowe, kropłowato-ameboidalne oraz gałązkowe są reprezentowane



**Fig. 3. Obraz skaningowy typowych form ziaren złota z osadów złotośnych przedpola Sudetów Wschodnich**

**A** – złocina blaszkowo-płytkowa ze strukturami kanapkowymi ze zginania maskowana procesami wtórnego spłaszczenia i obtaczania; **B** – kombinacja struktur kanapkowych ze zginania i „sklejania”; **C** – typowa struktura kanapkowa ze zginania maskowana nalotami tlenków żelaza, osie zgięć zaznaczają się prostymi odcinkami na konturze krawędzi obtoczonej złociny; **D** – forma cementacyjno-grudkowa o guzowatej powierzchni ze skupieniami uwodnionych tlenków żelaza i minerałów ilastych w zagłębieniach na powierzchni złociny; **E** – złocina cementacyjno-grudkowa o pokroju nieregularnym z mikrostrukturami z rozpuszczania ujawniającymi krystaliczną budowę ziarna Au; **F** – ziarno cementacyjno-grudkowe o wielowarstwowej strukturze krystalicznej zbudowanej z kryształów Au o płytkowym pokroju

Secondary electron micrographs (SEM) of the representative fluvial gold particles from the gold-bearing sediments of East Sudetic Foreland showing typical morphologies of gold grains

**A** – platy, reflattened “sandwich-like” particles with rounded edges; **B** – “sandwich-like” gold grains reshaped by refolding and “welding”; **C** – typical “sandwich-like” particle with straight particle edges (fold hinges) and coatings of iron oxides; **D** – irregular, composite gold particle; note depressions partly filled by iron oxyhydroxides and clayey masses; **E** – irregularly-shaped craggy gold particle with evidence of dissolution along layered crystalline structure of particle; **F** – lobate, craggy gold grain with crystalline, platelet morphology and multilayered structure

przez pojedyncze ziarna. Wzrost udziału złocin blaszkowo-płytkowych notuje się również w profilu podłużnym doliny paleo-Białej Głucholaskiej. W piaszczystych żwirach rejonu Prężynki (wiercenie P1; fig. 1) stanowią one ok. 90% wszystkich opisanych form (Wierchowiec, 2002).

Złociny z neoplejstocenijskich piasków i żwirów, występujących w nadkładzie osadów doliny paleo-Białej Głucholaskiej, mają wyłącznie postać blaszek, płytek i plewek. Obserwowany w osadach pre- i neoplejstocenu progresywny wzrost udziału złocin blaszkowo-płytkowych kosztem form cementacyjno-grudkowych jest powodowany postępującym w miarę transportu spłaszczeniem, fałdowaniem oraz obtaczaniem (ścieraniem) ziaren złota o bardziej złożonym kształcie. Sporadyczne występowanie form gałązkowych oraz haczykowato-gąbkowych charakterystycznych dla złota żyłowego i złóż eluwalno-deluwalnych lub całkowity ich brak (osady wodnolodowcowe neoplejstocenu) wskazuje na redepozycję starszych, pliocenijskich i preplejstocenijskich osadów złotośnych oraz brak procesów erozji pierwotnych skał złotośnych, dostarczających złota okruchowego o bardziej złożonych formach morfologicznych (Wierchowiec, 2011).

Złociny z holocenijskich żwirów i piasków dolin: Białej Głucholaskiej i Widnej pod względem morfologicznym upodabniają się do złota okruchowego z osadów paleo-Białej Głucholaskiej.

Dominują formy blaszkowo-płytkowe z dużym udziałem plewek. Podobieństwo form ziaren złota sugeruje procesy recyklingu starszych pliocenijsko-plejstocenijskich horyzontów złotośnych i brak w okresie holocenu nowych obszarów alimentacyjnych.

Cechy morfologiczne ziaren złota rozsypekowego zmieniają się podczas przenoszenia w osadzie i są funkcją długości transportu oraz dynamiki przepływu (Knight i in., 1999; Townley i in., 2003). Takie parametry morfologiczne jak: kształt (trójwymiarowy) i kontur złociny (dwuwymiarowy), obtoczenie, współczynnik spłaszczenia oraz stopień sfałdowania i struktury powierzchniowe są powszechnie wykorzystywane do określania genezy złocin (Youngson, Craw, 1993, 1995; Eyles, 1995). Cechy te mogą być również pomocne przy próbach rekonstrukcji związków złotośnej mineralizacji okruchowej z obszarami alimentacji (Hérial i in., 1990; Loen, 1995; Márquez-Zavalia i in., 2004).

#### DEFORMACJE MECHANICZNE ZIAREN ZŁOTA

Wśród deformacji mechanicznych dominują rozklepania, podgięcia i zagięcia krawędzi oraz sfałdowania dobrze obtoczonych złocin blaszkowo-płytkowych (fig. 3A, B). Procesy zaginania i następnie przyklepywania do powierzchni złociny prowadzą do powstawania struktur przypominających dwu lub kilku warstwową kanapkę – tzw. *sandwich structures* (Hérial i in., 1990; Wierchowiec, 2002). Wzrost udziału tego typu struktur jest intensyfikowany ekstremalnie wysokim współczynnikiem spłaszczenia i transportem na stosunkowo długim dystansie. Sfałdowania, struktury kanapkowe i inne deformacje mechaniczne złocin są często tuszowane

procesami ponownego spłaszczenia w dalszych etapach transportu. Mogą one być jednak rozpoznane na podstawie pewnych, charakterystycznych cech morfologicznych. Są to osie zgięć zaznaczające się prostymi odcinkami na konturze krawędzi obtoczonych ziaren złota (fig. 3C).

Szczegółowa analiza deformacji mechanicznych złocin wykazuje, poza osadami typu serii Gozdnicy, dość powszechne występowanie struktur kanapkowych. Są to zarówno typowe dwuwarstwowe zagięcia (struktury z zaginania; fig. 3A), często maskowane procesami późniejszego ponownego spłaszczenia, jak również struktury kanapkowe ze „sklejania”. Łączenie się form blaszkowo-płytkowych o niskim współczynnikiem spłaszczenia jest powodowane głównie procesami mechanicznego sklepywania złocin, natomiast elipsoidalne złociny blaszkowo-płytkowe o wysokim współczynnikiem spłaszczenia są zwykle sklepane natotami tlenków żelaza lub krzemionki. Pewną rolę mogą odgrywać również procesy dyfuzji atomów złota na kontakcie blaszkowych złocin po depozycji w osadzie oraz reprecypitacja złota „nowego”, dająca efekt naturalnego spawania (Eyles, 1995; Wierchowiec, 2010). Poza tym, opisano struktury bardziej złożone będące kombinacją struktur kanapkowych ze zaginania i „sklejania” (fig. 3B). Struktury kanapkowe ze zaginania są interpretowane jako wskaźnik długiego transportu i/lub procesów redepozycji oraz przemywania starszych rozsypek (Boyle, 1979; Wierchowiec, 2002). Opisane struktury ze sklepania są natomiast efektem procesów zachodzących po redepozycji złota okruchowego i dokumentują ostatni jej etap (Townley i in., 2003).

#### STRUKTURY POWIERZCHNIOWE

Poza powszechnymi strukturami uderzeniowo-wleczeniowymi o genezie mechanicznej, które zapisują procesy rozklepywania i abrazji na powierzchni złocin (Hérial i in., 1990; Wierchowiec, 2002, 2007) opisano nano- i mikrostruktury wskazujące na procesy selektywnego rozpuszczania złota w warunkach hipogenicznych, jego wytrącanie z roztworu i wtórną rekrytalizację prowadzącą w rezultacie do formowania skupień złota autogenicznego. Występują one na ziarnach złota z osadów typu serii Gozdnicy oraz z osadów młodszych i są przywiązane zarówno do złocin blaszkowo-płytkowych wtórnie zdeformowanych ze strukturami kanapkowymi ze zaginania i „sklejania” (fig. 3A–C), jak również cementacyjno-grudkowych (ziarna półostrokrawędziste, o niskim współczynnikiem spłaszczenia oraz słabym obtoczeniu; fig. 3D–F).

Niezależnie od klasy morfogenetycznej analizowanych ziaren złota na ich powierzchniach zaobserwowano mikrostruktury z rozpuszczania, które ujawniają krystaliczną budowę złocin (fig. 3E, F, 4A, B) oraz rozpoznano dwa typy nano- i mikroskupień złota autogenicznego: a) formy banieczkowate lub drobnorobaczkowe, b) krystaliczne skupienia i przerosty złota.

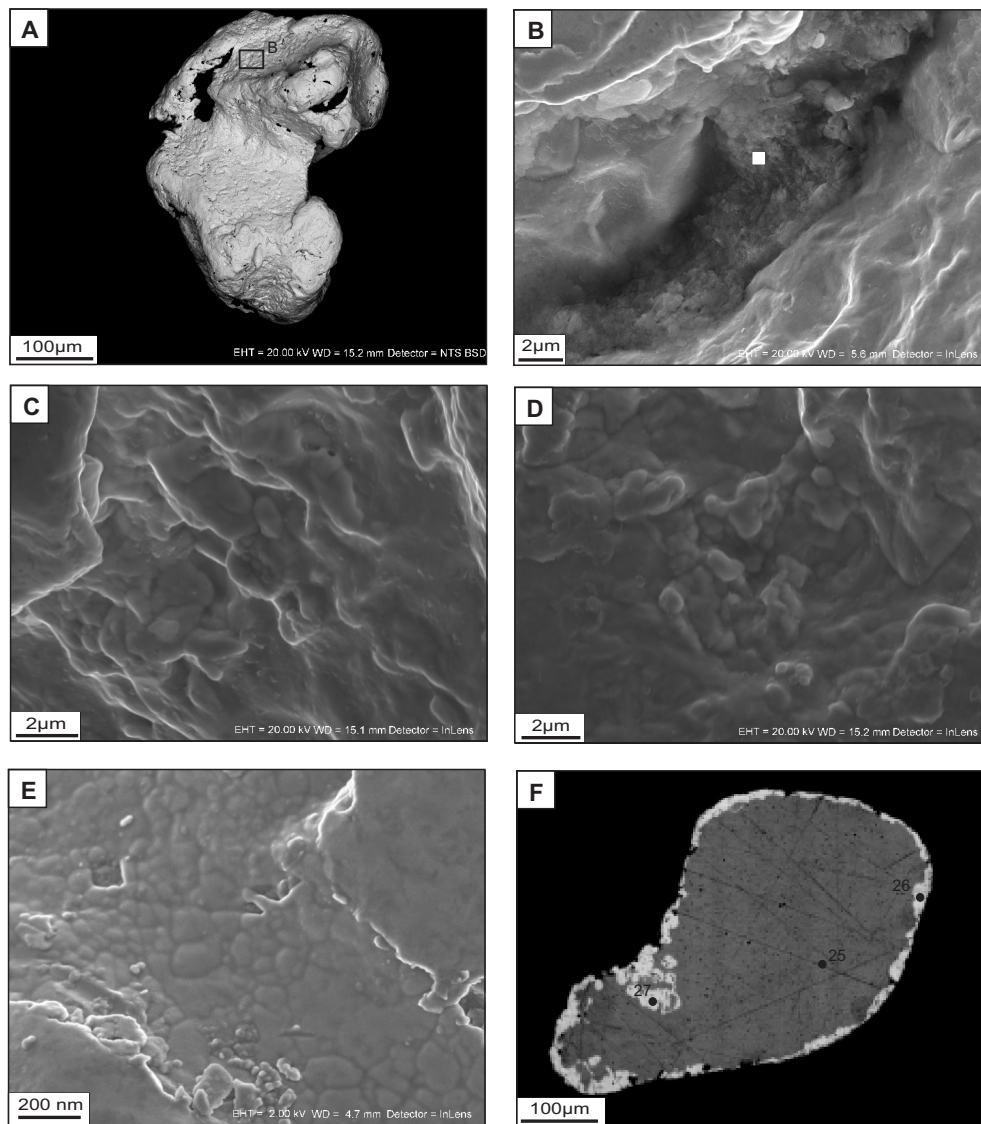
Powyższe nano- i mikroskupienia zazwyczaj obserwuje się w zagłębieniach i wklęsłościach na powierzchni złocin cementacyjno-grudkowych oraz w strefach zgięć i sfałdowań wtórnie

zdeformowanych złocin blaszkowo-platekowych. Z powodu dużej plastyczności i kowalności złota, inkrustacje złota występujące na eksponowanych powierzchniach złocin ulegają bardzo łatwo procesom niszczenia w czasie transportu. Jeśli są zachowane, zwykle noszą ślady abrazyj i rozklepywania.

Zdeformowane formy blaszkowo-platekowe mają płaskie i gładkie powierzchnie z licznymi nieregularnymi wgłębieniami i nieciągłościami, a krawędzie poszczególnych złocin są umiarkowanie lub dobrze obtoczone (fig. 4A). Wgłębienia i nierówności na powierzchniach złocin są zwykle wypełnione materiałem ilastym zmieszany z niewielkimi ilościami wodorotlenków Fe, Ti (analiza SEM-EDS; fig. 4B).

Skupienia robaczkowo-pęcherzykowe składają się z konglomeratów pęcherzyków i baniczek, w których poszczególne

złocin są umiarkowanie lub dobrze obtoczone (fig. 4A). Wgłębienia i nierówności na powierzchniach złocin są zwykle wypełnione materiałem ilastym zmieszany z niewielkimi ilościami wodorotlenków Fe, Ti (analiza SEM-EDS; fig. 4B).



**Fig. 4. Obraz skaningowy powierzchni ziarna złota blaszkowo-platekowego oraz fotografia polerowanego ziarna złota w technice elektronów wstecznie rozproszonych (fot. F)**

**A** – typowa złocina o nierównej, porowatej powierzchni; **B** – wgłębienie na powierzchni złociny z nano- i mikroskupieniami złota w paragenezie z materiałem ilastym (wycinek z fig. A); biały kwadrat wewnątrz zagłębienia – lokalizacja punktu analitycznego EDS; **C, D** – skupienia robaczkowo-pęcherzykowe wypełniające depresje na powierzchni złociny; **E** – skupienia spłaszczonych pęcherzyków Au budujące ścianki zagłębienia na powierzchni złociny (SEM wysokiej rozdzielczości); **F** – przekrój złociny z mikrografii A; nieregularne jądro złociny o podwyższonej zawartości Ag (ciemnoszare) otoczone nieciągłą obwódką czystego złota (jasnoszare)

Secondary electron micrographs (SEM) of flake gold grain surfaces and a back-scattered electron (BSE) image of a polished section (micrograph F) showing

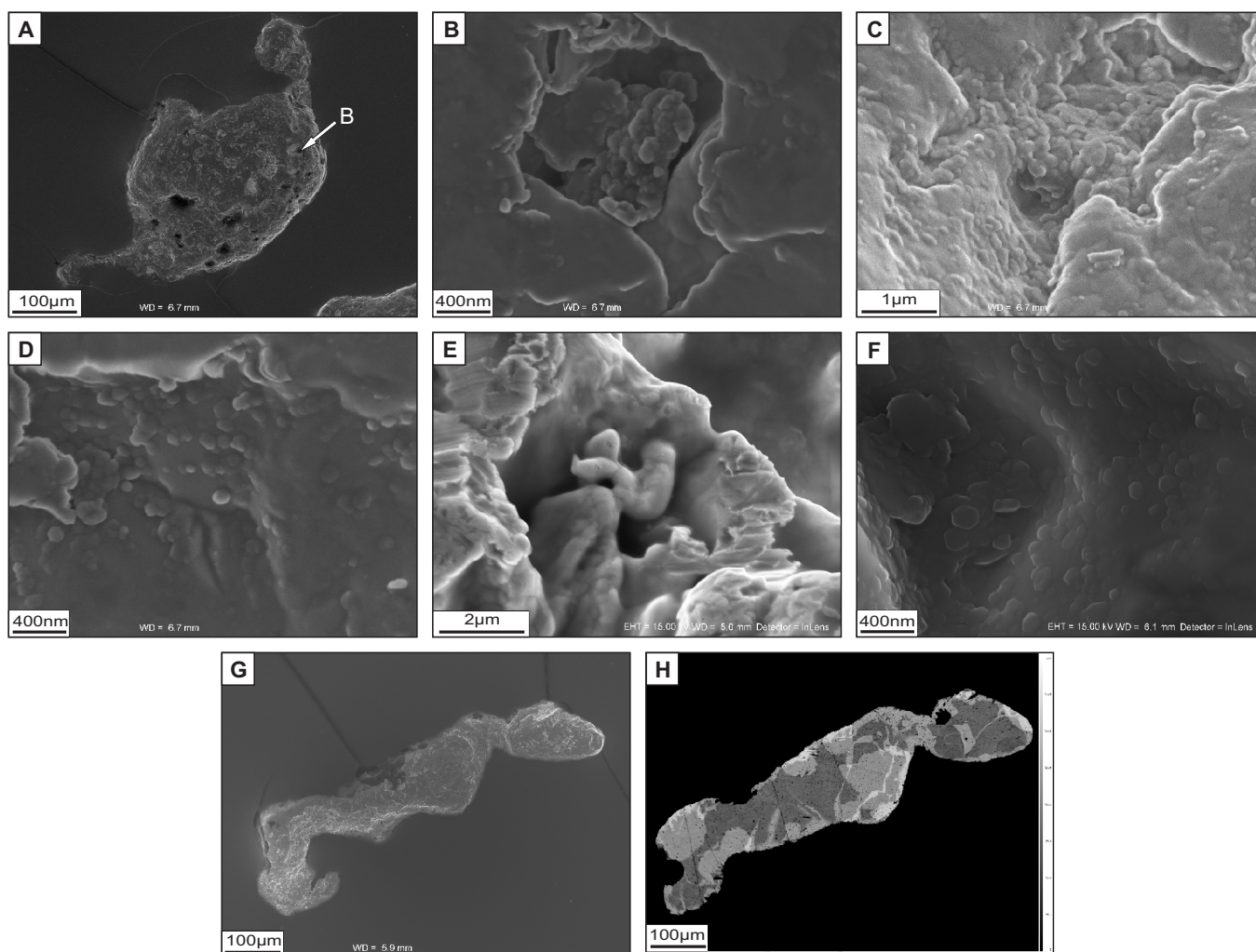
**A** – the size and typical highly textured grain surface; **B** – the concavity containing nano- and microphase gold associated with clayey material (A, inset); white square inside the concavity represents the analytical spot of EDS data; **C, D** – bubbly to bud-like forms infilling protected cavities; **E** – high-resolution SEM micrographs of flattened aggregate of bubbly forms building the walls of concavity; **F** – (section of particle shown on micrograph A) an irregular Ag-rich primary core (dark grey) discontinuously surrounded by a fine rim (light grey)



gólne banieczki (o średnicy do 200 nm) stykając się ze sobą tworzą struktury przypominające Au bakteriomorficzne (fig. 4D, 5C, E). Przestrzeń między poszczególnymi pęcherzykami i/lub banieczkami jest wypełniona złotem amorficznym składającym się z prawie czystego Au (>99% wag.). Ze względu na małe rozmiary pęcherzyków/banieczek i obecność w tle złota zawierającego domieszki Ag, była możliwa jedynie analiza jakościowa tych struktur.

Szczegółowa analiza SEM pokazuje, że poszczególne pęcherzyki i banieczki złota mają różny stopień kontaktu

z powierzchnią ziarna macierzystego. Niektóre nanocząsteczki ledwo dotykają powierzchni złociny, podczas gdy inne wrosły w warstwę powierzchniową złociny na pewną głębokość (fig. 4D, E). Fakt ten wskazuje na różny czas osadzania nanocząstek na powierzchni ziarna Au. Prawdopodobnie pojedyncze nanocząsteczki z czasem zrastały się formując inkrustacje złota amorficznego, a ostatecznie warstwę złota autogenicznego na powierzchni złociny pełniącą rolę swego rodzaju osadnika dla nowych nanocząstek Au.



**Fig. 5. Obraz skaningowy typowej morfologii złocin cementacyjno-grudkowych oraz fotografia polerowanego ziarna złota w technice BSE (fot. H)**

**A** – złocina o nieregularnym pokroju i nierównej jamistej powierzchni; **B** – skupienia robaczkowo-pęcherzykowe o pokroju płytkowym wypełniające zagłębienie na powierzchni złociny (wycinek z fig. A); **C** – pęcherzykowe nano-cząsteczki Au, lokalnie w formie skupień łańcuszkowych; **D** – pojedyncze nano-cząstki oraz agregaty złota robaczkowo-pęcherzykowego narastające na ścianie zagłębienia w złocinie; **E** – skrytokrystaliczne skupienia złota robaczkowo-pęcherzykowego w zagłębieniu powierzchni ziarna Au; **F** – krystaliczne skupienia i przerosty złota o pokroju płytkowym narastające na ściankach zagłębienia powierzchni złociny (SEM wysokiej rozdzielczości); **G** – intensywnie zdeformowana złocina cementacyjno-grudkowa; **H** – przekrój ziarna z mikrografii G; nieregularne strefy o podwyższonej zawartości Ag (ciemno- lub jasnoszare), żyłki złota wysokiej próby wnikające w wewnętrzne partie złociny lub je przecinające, otoczone nieciągłą obwódką ubogiego w Ag lub czystego złota (odpowiednio, jasno- lub białoszare)

SEM of representative craggy gold grains and BSE image of the polished section (micrograph H) showing

**A** – irregular-shaped craggy gold grain surface with concavities; **B** – flattened aggregates of bud-like and bubbly forms in the concavity (A, inset); **C** – aggregates of Au nano-particles locally forming chains of buds; **D** – individual and aggregated nano-particulate Au covering surface of the concavity; **E** – no crystalline gold morphotypes occurring in the concavity; **F** – high-resolution SEM micrographs of crystalline initial plates infilling protected cavities. Note the sharp and irregular ribs of individual plates; **G** – intensely reshaped gold particle; **H** – (section of particle shown on micrograph G) irregular Ag-rich core zones (dark gray), Ag-poor (light gray) or fine Au (white-gray) internal veinlets and patches, discontinuously surrounded by an Ag-poor or fine rim

Teoretycznie jest uzasadnione, że najmniejsze inicjalne nanocząsteczki złota, najczęściej mają kształt kulisty (Coble, Xia, 2009). Powodem tego jest nadwyżka energii powierzchniowej formujących się nanocząstek. W nanoskali dość wyraźnie ujawnia się złożona struktura skupień Au, które są agregatami skondensowanych cząstek o różnych kształtach i rozmiarach (fig. 4C–E, 5B–F).

Nanocząsteczki Au są zwykle mniej lub bardziej sferyczne, jednak czasami występują inne formy: robaczkowate, kanciaste i nieregularne. Na powierzchni badanych złocin nie zaobserwowano natomiast nanocząstek geometrycznych regularnych – trójkątnych, sześciokątnych itp.

Pojedyncze nanocząstki Au mają formę pęcherzyków i banieczek o wymiarach rzędu 50–200 nm. Większość nanocząstek ma bezpośredni kontakt z powierzchnią ziaren złota (wyrastają na powierzchniach pseudokryształów Au budujących ziarna złota rozsypiskowego); niektóre nanocząstki Au są również rozproszone w materiale ilastym wypełniającym nierówności na powierzchni ziaren złota (fig. 4B). Nanocząstki Au w kształcie pęcherzyków i banieczek, jak również rzadziej spotykane formy o pokroju nasion (fig. 4C) nie mają wyraźnie zaznaczonych ścian kryształów Au, co sugeruje, że znajdują się one na wczesnym etapie agregacji.

Krystaliczne skupienia i przerosty złota obserwowane w zagłębieniach na powierzchni badanych złocin są zbudowane z wydłużonych, cienkich (20–100 nm) płytek o zróżnicowanych wymiarach – od kilkudziesięciu nanometrów do kilku mikronów (fig. 5F). Poszczególne płytki krystalicznego złota tworzą przerosty pod różnymi kątami (fig. 5B), rzadziej są zorientowane w określonym kierunku krystalograficznym dając efekt struktury wielowarstwowej (fig. 3F, 5C). W obrazie mikroskopowym płaskie, płytkowe kryształy narastające kolejno na siebie, zaznaczają się w postaci warstw o zróżnicowanej grubości. W efekcie narastania krystalicznego złota, na powierzchni złociny powstaje delikatna struktura charakteryzująca się znaczną porowatością oraz występowaniem nano- i mikroszczelin oraz zagłębień (fig. 3E, F, 5A, B).

#### SKŁAD CHEMICZNY ZŁOTA OKRUCHOWEGO

W zdecydowanej większości badanych ziaren jedynymi pierwiastkami jakie udało się oznaczyć są: Au, Ag, Te i Se, natomiast wykrycie w nielicznych ziarnach złota zawartości: Cu, Bi i Pd na poziomie 0,1–0,2 % wag. jest niepewne. Występowanie w punktowych analizach oraz mapingu na przekrojach złocin (fig. 6) takich pierwiastków jak: Fe, Ti, Al, Si i Ca należy wiązać z inkluzjami rutylu (Fe, Ti) oraz glinokrzemianów.

Analizy punktowe (w mikroobszarze) na powierzchniach mikrostruktur wskazujących na wytrącanie złota „nowego” wykazały, że buduje je złoto bardzo wysokiej próby (zawartość Au powyżej 99,5% wag.). Z kolei oznaczenia punktowe (tab. 1) i mapping, na polerowanej powierzchni przekroju wytypowanych ziaren złota, pozwoliły na wyróżnienie dwóch generacji złota rozsypiskowego: a) niskosrebrowego (zaw. Ag  $\leq$  10% wag.) z tellurem i selenem, b) wysokosrebrowego (zaw. Ag  $>$  10% wag.) z tellurem i selenem.

Złociny niskosrebrowe stanowią generację liczniejszą i bardziej powszechną (ponad 70% badanych ziaren). Są to w przybliżeniu homogeniczne pod względem składu chemicznego, zazwyczaj obtoczone, formy blaszkowo-płytkowe oraz złociny cementacyjno-grudkowe o strukturze porowatej (fig. 5A). Złoto zawiera 0,35–1,2% wag. Ag, 0,09–0,45% wag. Te i 0,08–0,29% wag. Se, przy czym minimalne zawartości srebra towarzyszą złocinom o strukturze porowatej.

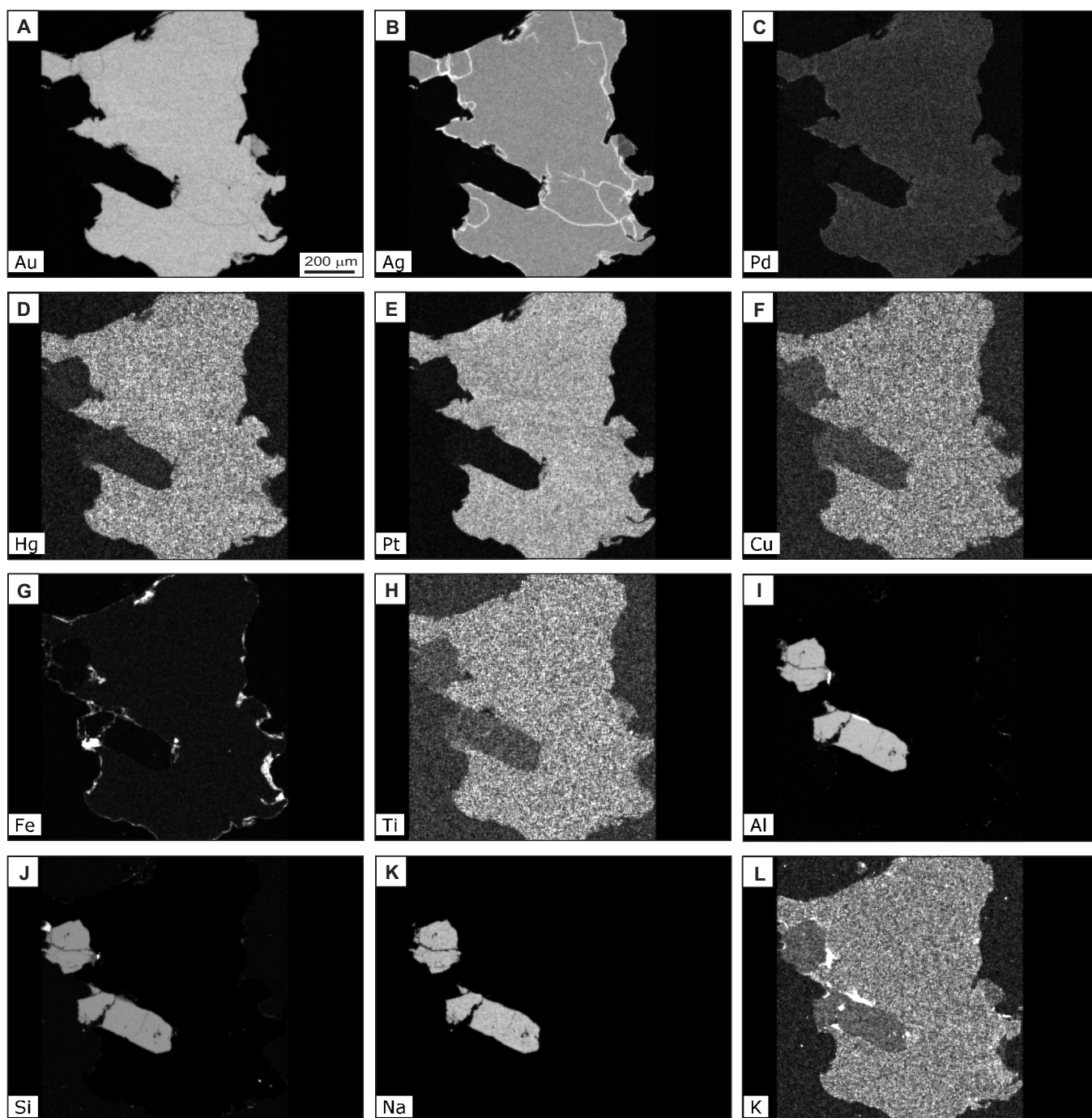
Na generację złota wysokosrebrowego z tellurem i selenem składają się niejednorodne pod względem zawartości pierwiastków-domieszek, półostrokrawędziste i półobtoczne złociny cementacyjno-grudkowe oraz ziarna blaszkowo-płytkowe z intensywnymi deformacjami mechanicznymi i strukturami kanapkowymi (fig. 5G, H).

W obrazie elektronów wstecznie rozproszonych zmienność składu złocin tej generacji na powierzchni przekroju zaznacza się występowaniem nieregularnych, ciemnoszarych stref wewnętrznych o podwyższonej zawartości srebra określanych w literaturze jako jądro (ang. *core*) oraz jasnoszarych, zewnętrznych obwódek „czystego” złota (ang. *rim*) (Desborough, 1970; Youngson, Craw, 1993, 1995; Eyles, 1995; Knight i in., 1999). Termin „obwódka” jest stosowany do opisu partii ziarna, które są położone na zewnątrz jądra dającego się wyróżnić metodami optycznymi lub analitycznymi. Otacza ona jądro częściowo, znacznie rzadziej całkowicie i charakteryzuje się obniżoną zawartością pierwiastków-domieszek, głównie srebra. Obecność zewnętrznych „obwódek” potwierdza również mapping na przekroju złocin (fig. 6B).

Na badanych przekrojach ziaren złota wysokosrebrowego zazwyczaj zaznacza się jedno, rzadziej dwa lub trzy jądra o zbliżonym składzie chemicznym i zbitej, masywnej strukturze, przedzielone strefami o obniżonej zawartości pierwiastków-domieszek. Ich kontur jest zwykle nierówny i postrzępiony, z licznymi zatokami na granicy z obwódką (fig. 4F, 5H). Jądra badanych złocin zawierają: od 11,2 do 21,4% wag. Ag, od 0,0 do 0,8% wag. Te i od 0,0 do 0,3% wag. Se, natomiast w składzie „obwódek” pierwiastki domieszki stanowią  $<$ 0,5% wag. (tab. 1).

Na przekrojach niektórych struktur kanapkowych ze zaginania, jak również ze „sklejania” w miejscach styku powierzchni złocin zaznaczają się strefy (zony) prawie czystego złota (zaw. Au  $>$ 99,0% wag.) o mniej lub bardziej porowatej strukturze (fig. 5H). Mogą one odpowiadać obwódkom wysokiej próby z etapu poprzedzającego powstanie struktur kanapkowych. Podobne zony charakteryzujące się niską zawartością pierwiastków-domieszek są również interpretowane jako struktury z wytrącania złota autogenicznego, które spawa drobne złociny w większe agregaty (Youngson, Craw, 1993; Eyles, 1995; Falconer, Craw, 2009).

Zaznaczają się również zatoki i „żyłki” złota wysokiej próby wnikające w bardziej wewnętrzne partie złociny lub nawet je przecinające (fig. 5H, 6B). Żyłki zwykle naśladują strefy o zaburzonej (w efekcie zaginania) pierwotnej strukturze krystalicznej, natomiast zatoki zbudowane ze złota o podwyższonej porowatości. W efekcie na niektórych



**Fig. 6.** Mapy rozkładu pierwiastków (Au, Ag, Pd, Hg, Pt, Cu, Fe, Ti, Al, Si, Na, K) w przekroju złociny cementacyjno-grudkowej obrazujące rozkład poszczególnych pierwiastków, związki między stopem Au-Ag i inkluzjami innych minerałów w ziarnie złota; skala czarno-biała podaje względną intensywność sygnału wiązki promieniowania rentgenowskiego w zliczeniach na sekundę

Microchemical X-ray maps of single elements (Au, Ag, Pd, Hg, Pt, Cu, Fe, Ti, Al, Si, Na, K) showing distribution of alloy components, relationships between Au-Ag alloy and inclusions of other minerals in craggy gold grain; the black and white scale gives the relative intensity of the X-ray signal in counts per second

przekrojach złocin ze strukturami kanapkowymi obserwuje się nieregularne strefy wysokosrebrowe w otoczeniu złota niskosrebrowego o zbitej strukturze, przedzielone żyłkami czystego złota (>99,0% wag. Au).

Często strefy o różnej zawartości pierwiastków-domieszek nie zaznaczają się lub granica między we-

wnętrznym jądrem, a zewnętrzną obwódką wysokiej próby jest bardzo niewyraźna. Jest to w głównej mierze wynik zbyt małych różnic w zawartości srebra (poniżej 0,5% wag.), którego zmienność nie może być zarejestrowana w obrazie elektronów wstecznie rozproszonych.

Tabela 1

**Zmienność składu chemicznego (% wag.) ziaren złota z okrucowych osadów złotonośnych przedpola Sudetów Wschodnich**

Variation in the composition (wt %) of the gold grains from the East Sudetic Foreland gold-bearing deposits

Nazwa wiercenia / ilość analiz (n)	Oznaczone metale	Jądro			Obwódka		
		minimum	maksimum	średnio	minimum	maksimum	średnio
Ch1 / n = 18	Au	81,62	97,20	93,20	94,50	99,43	98,38
	Ag	0,35	18,01	6,23	–	3,32	1,35
	Te	–	0,80	0,32	–	0,43	0,27
	Se	–	0,29	0,25	–	–	–
P1 / n = 16	Au	84,76	98,67	92,06	95,98	99,67	96,99
	Ag	0,40	15,52	7,32	–	3,61	2,62
	Te	–	0,53	0,36	–	0,28	0,21
	Se	–	0,30	0,26	–	0,20	0,18
B2 / n = 15	Au	78,09	98,32	90,86	97,19	99,32	99,20
	Ag	1,19	21,40	8,65	–	2,35	0,51
	Te	–	0,52	0,31	–	0,39	0,29
	Se	–	0,28	0,18	–	–	–
Bu2 / n = 12	Au	82,43	99,57	89,72	92,26	99,78	97,07
	Ag	0,64	17,12	9,59	–	5,07	2,46
	Te	–	0,66	0,45	–	0,35	0,26
	Se	–	0,26	0,24	–	0,24	0,21

Lokalizację miejsc pobrania próbek (wierceń) przedstawiono na figurze 1; „–” poniżej granicy oznaczalności

Location of sampling sites (drill holes) are shown in Figure 1; “–” below detection limit

## DYSKUSJA

Fakt występowania w obrębie opisywanych sekwencji okrucowych przedpola Sudetów Wschodnich złota autogenicznego oraz widocznych w przekroju ziaren Au wewnętrznych stref podwyższonej próby w formie obwódek, zatok i żyłek świadczy o rozpuszczaniu złota w warunkach hipergenicnych, jego wytrącaniu z roztworu i wtórnej rekrytalizacji.

Obserwowane niezależnie od typu morfogenetycznego złocin podwyższenie próby złota w zewnętrznych partiach ziarna, dające efekt obwódki lub zatok (czasami kilka generacji zatok o zmiennej zawartości Ag) (fig. 4F, 5H) może być powodowane selektywnym ługowaniem pierwiastków-domieszek, które prowadzi w konsekwencji do samooczyszczania złota (Desborough, 1970; Knight i in., 1999).

Za genezą puryfikacyjną przemawia nieregularny kształt stref podwyższonej próby, ostra granica między strefami o odmiennej zawartości Ag oraz brak w nich inkluzji minerałów detrytycznych. Obserwuje się również selektywne oczyszczanie złota wzdłuż osi zgięć i innych deformacji mechanicznych (stref o zaburzonej pierwotnej strukturze krystalicznej). Efektem uprzywilejowanego ługowania pierwiastków-domieszek wzdłuż tych stref są wnikaające w wewnętrzne partie złociny zatoki i żyłki złota wysokiej próby (fig. 5H).

Mechanizm samooczyszczania z powstawaniem wewnętrznych obwódek, zatok i żyłek zbudowanych z niemal czystego złota może być związany z procesem elektrochemicznego ługowania pierwiastków-domieszek (Ag, Cu). Ze względu na położenie złota w szeregu napięciowym metali za miedzią i srebrem, a przed platynowcami, w obecności utleniaczy, złoto będzie utleniane znacznie wolniej niż Cu

i Ag. Jony  $\text{Cu}^{2+}$  i  $\text{Ag}^+$  są wynoszone i ulegają rozproszeniu, natomiast złoto jest katodowo chronione (Rong, Sieradzki, 1992). Utlenienie metalicznych pierwiastków-domieszek do postaci jonowej powoduje redukcję ich rozmiarów i ułatwione elektrochemiczne ługowanie ze stopu. W wyniku postępującego procesu dochodzi do wzrostu porowatości i szybkiego rozwinięcia powierzchni ługowania z preferencją stref o zaburzonej pierwotnej strukturze krystalicznej (osie zgięć i sfałdowań). Partie złocin stopniowo oczyszczane z domieszek innych metali uzyskują charakterystyczną, porowatą strukturę zbudowaną z niemal czystego złota (Knight i in., 1999; Wierchowicz, 2010).

Na przekrojach złocin efekt obwódek wysokiej próby dają również powierzchniowe nano- i mikroskupienia złota „nowego” w postaci krystalicznych przerostów oraz inkrustacji porowatego złota amorficznego. Jest regułą, że obwódki podobnie jak nano- i mikrostruktury powierzchniowe zbudowane ze złota autogenicznego są przywiązane do nierównych, wklęsłych fragmentów ziaren i nie zachowują się na dobrze obtoczonych, eksponowanych powierzchniach złocin blaszkowo-płytkowych, z których są bardzo łatwo usuwane na skutek abrazji podczas transportu w osadzie. Fotografie w technice elektronów wstecznie rozproszonych przekrojów złocin ze strukturami wskazującymi na reprecypitację złota „nowego”, potwierdzają obecność nieregularnych stref i zatok o zmiennej zawartości Ag. Zazwyczaj obserwuje się widoczne na większości konturu ziarna, rzadziej otaczające ziarno w całości, zewnętrzne nieregularne obwódki niemal czystego złota (>99,0% wag. Au) o typowej porowatej strukturze (fig. 4F, 5H).

Opisywane autogeniczne skupienia złota robaczkowo-pęcherzykowego zbudowane ze złota amorficznego oraz

krystaliczne przerosty złota są prawdopodobnie efektem rekrystalizacji złota wytrącanego po depozycji w rozsypisku.

Do remobilizacji tego metalu dochodzi w drodze stopniowego rozpuszczania i przejścia w mobilne związki kompleksowe Au. Poza roztworami rzeczywistymi typu kompleksów, złoto może być transportowane w postaci roztworów koloidalnych oraz drobnodispersyjnych zawiesin (Benedetti, Boullegue, 1991; Hong i in., 2006; Zhu i in., 2009). Forma migracji złota jest zależna od parametrów fizykochemicznych środowiska (głównie temperatury oraz wartości pH i Eh), składu mineralnego wietrzejących skał, klimatu oraz warunków hydrogeologicznych (Webster, Mann, 1984; Dutova i in., 2006).

Wśród rozpuszczalnych związków kompleksowych złota w transporcie tego metalu w strefie hipergenicnej największą rolę przypisuje się związkom siarki (Webster, 1986; Benedetti, Boullegue, 1991; Lengke, Southam, 2006, 2007) i chloru (Mann, 1984; Machesky i in., 1991), hydrokompleksom typu  $[\text{AuOH}(\text{H}_2\text{O})]^0$  (Vlassopoulos, Wood, 1990) oraz kompleksowym związkiem organicznym (Wood, 1996; Southam, 1998; Southam, Saunders, 2005).

Rozpoznany przebieg kopalnej sieci rzecznej przedpola Sudetów Wschodnich wskazuje, że obszary alimentacyjne okrucowej mineralizacji złotośnej znajdowały się na południe od Głucholaz, w strefach wietrzenia żył z siarczkową mineralizacją polimetaliczną typu Zlaté Hory. W tego typu środowisku geochemicznym, charakteryzującym się niskim pH, podstawową formą transportu złota w rezultacie drenażu wód gruntowych są zwykle związki kompleksowe złota z siarką typu tiosiarczianów  $[\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{3-}$  i bisulfidów  $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$  (Benedetti, Boullegue, 1991). Tiosiarczany będące produktem rozkładu złotośnego piryty i arsenopiryty w kwaśnych warunkach zwietrzelin ubogich w chlor tworzą związki kompleksowe stabilne w szerokim zakresie pH (od kwaśnych po neutralno-alkaliczne). W strefach utleniania siarczków zasobnych w Au i Ag transport tych metali może przebiegać w formie kompleksu mieszanego typu  $[(\text{Au}, \text{Ag})(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{3-}$ . Kompleksy  $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$  będące produktem podobnych procesów są charakterystyczne dla środowisk bardziej redukcyjnych (Clough, Craw, 1989). Tiosiarczany i bisulfidy odgrywają również ważną rolę jako forma transportu złota i srebra w procesach formowania i wzrostu samorodków oraz precypitacji złota autogenicznego w redeponowanych osadach aluwialnych z pirytem i markasytem (Eyles, 1995; Falconer, Craw, 2009). Rozkład siarczków żelaza prowadzi do spadku pH i wzbogacenia w siarkę wód gruntowych, stymulujących procesy formowania i transportu związków kompleksowych złota.

Związki kompleksowe złota z siarką, a zwłaszcza kompleksy  $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$ , ulegają szybkiej destabilizacji wraz ze wzrostem potencjału redukcyjno-utleniającego. W wyniku utlenienia lub reakcji dysproporcjonowania złoto przechodzi do postaci koloidalnej  $\text{Au}^0$  i może ulegać wytrącaniu jako złoto „nowe” lub być absorbowane przez wodorotlenki żelaza i/lub manganu (Ran i in., 2002). Osadnikiem dla nowo wytrąconego złota są często istniejące już w osadzie złociny i samorodki.

W transporcie złota w środowisku zasolonych wód gruntowych (wysokie stężenie jonów  $\text{Cl}^-$ ) podstawową formą transportu tego metalu stają się trwałe i mobilne tylko przy niskim pH, związki kompleksowe złota z chlorem typu  $\text{AuCl}_4^-$  i  $\text{AuCl}_2^-$  (Machesky i in., 1991). W obecności uwodnionych tlenków żelaza i manganu kompleksy chlorkowe ulegają redukcji z wytrącaniem złota koloidalnego. Z tego względu ta forma transportu złota odgrywa większą rolę tylko w obszarach suchego klimatu z intensywnym wietrzenia laterytowym (Mann, 1984). W związku z powyższym w badanych osadach złotośnych ta forma transportu Au mogła mieć pewne znaczenie jedynie w okresie usuwania zwietrzelin i formowania systemu rzecznej paleo-Widnej (fig. 1).

Związki hydrokompleksowe typu  $[\text{AuOH}(\text{H}_2\text{O})]^0$  są powszechną formą migracji złota w wodach powierzchniowych, które zwykle charakteryzują się niską zawartością rozpuszczalnych form złota (Vlassopoulos, Wood, 1990; Greffé i in., 1996). Kompleksy tego typu ze względu na stabilność w szerokim przedziale zmian pH i Eh środowiska są podstawową formą transportu złota po destabilizacji kompleksów siarczanowych w strefach utleniania lub rozpadu kompleksów  $\text{AuCl}_4^-$  i  $\text{AuCl}_2^-$  na skutek wzrostu pH środowiska (Benedetti, Boullegue, 1991; Shvartsev, Dutova, 2001).

Hydrokompleksy złota w wodach powierzchniowych, jak również w środowisku wód gruntowych osadów aluwialnych ulegają redukcji do złota koloidalnego lub są absorbowane na uwodnionych tlenkach żelaza i manganu (Ran i in., 2002).

Wśród kompleksów organicznych w procesach transportu i reprecypitacji złota największą rolę przypisuje się cyjanidom typu  $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ , które po części są produktem rozkładu powszechnych w środowisku hipergenicznym związków humusowych (Eyles, 1995). Badania laboratoryjne, jak i obserwacje geologiczne potwierdzają, że znaczne ilości złota w procesach mobilizacji tego metalu są przenoszone w formie kompleksów kwasów huminowych i fulwowych (Baker, 1978; Howell i in., 1993) oraz związków organicznych będących produktem metabolizmu bakterii (Bischoff, 1994, 1997; Reith i in., 2006; Shuster i in., 2015; Kerr, Craw, 2017).

Ważną rolę w transporcie złota w środowisku wód gruntowych osadów eluwialno-aluwialnych, jak również w wodach powierzchniowych odgrywają koloidy i drobnodispersyjne zawiesiny złota (Abramov i in., 1993; Seeley, Senden, 1994; Hong i in., 2006). Częsteczki koloidalne  $\text{Au}^0$  są generowane ze związków kompleksowych w procesach chemicznego wytrącania (redukcji, reakcji dysproporcjonowania) lub w sposób mechaniczny przez ścieranie miękkich złocin i samorodków o dużym ciężarze właściwym w czasie transportu w osadzie (Boyle, 1979).

Ujemnie naładowane cząstki  $\text{Au}^0$  są transportowane w otoczce kompleksowych związków organicznych pełniących rolę warstwy ochronnej wokół hydrofobowego zolu złota (Baker, 1978). Koagulacja koloidów w wyniku zwiększenia rozmiarów cząstek i/lub dopływu elektrolitów, niszczących ochronną otoczkę kompleksów organicznych, prowadzi do wytrącania żelu złota o strukturze gąbczastej i/lub krystalizacji oktaedrycznego złota „nowego” (McCre-

ady i in., 2003). Katalizatorem tych procesów są również produkty metabolizmu i autolizy bakterii (Reith, McPhail, 2006; Fairbrother i in., 2012; Shuster i in., 2017).

Dużą rolę w remobilizacji Au w środowisku wód płynących i porowych odgrywają również drobnodispersyjne zawiesiny metastabilnych uwodnionych tlenków żelaza (getyt, ferrihydrit, limonit) i manganu oraz minerałów ilastych (Nechaev, 1985; Bowell i in., 1993; Ran i in., 2002). Wskutek dużej powierzchni aktywnej tych minerałów i silnego przyciągania elektrostatycznego (dodatnie naładowanie), złoto koloidalne jest adsorbowane i transportowane w zawieszynie (Greffé i in., 1996; Hong i in., 2006; Zhu i in., 2009). Powstające w wyniku koagulacji agregaty wodorotlenków Fe i Mn stają się kolektorem Au<sup>0</sup>. Dalsza migracja lub depozycja złota w agregatach koagulujących sorbentów jest uzależniona od warunków hydrogeologicznych środowiska (Benedetti, Boulegue, 1991).

W procesie samej reprecypitacji złota autogenicznego powierzchnia złociny staje się autokatalityczną elektrodą, na której jest osadzane złoto „nowe” (Ali, Christie, 1984). Z powodu braku elektrody srebrzej metal ten po utlenieniu do Ag<sup>+</sup>, będzie usuwany z powierzchniowej warstwy złociny przy jednoczesnym wytrącaniu rafinowanego, czystego złota. Wymaga to reakcji utleniania w połączeniu z redukcją złota, z postaci jonowej do złota metalicznego (Schmidbaur i in., 2005). Mogą to być przemiany chlorytów, które są częstym składnikiem skał łupkowych, również w badanych osadach złotonośnych przedpola Sudetów Wschodnich. W wyniku ich rozkładu powstają żelazowo-żelazowe (Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>) smektyty lub kaolinit i tlenki żelaza (Youngson, Craw, 1993), powszechne zwłaszcza w osadach typu serii Gozdniczy oraz aluwialach paleo-doliny Białej Głuchołaskiej.

## PODSUMOWANIE

W obrębie sekwencji okruchowych przedpola Sudetów Wschodnich wyróżniono w sumie pięć różnowiekowych poziomów złotonośnych związanych z preglacjalnymi, „białymi” żwirami typu serii Gozdniczy, wodnolodowcowymi piaskami i żwirami plejstocenu oraz osadami holocenijskich tarasów Złotego Potoku i Białej Głuchołaskiej. Największy potencjał złotonośny na przedpolu Sudetów Wschodnich mają „białe” żwiry kwarcowe, przestrzennie związane z preglacjalną (eoplejstocenijską) siecią rzeczczą. Wartości złożowe Au (0,4 g/m<sup>3</sup> osadu) notuje się w grubookruchowych żwirach reprezentujących fację bruku korytowego doliny paleo-Białej Głuchołaskiej.

W wyniku szczegółowych badań mineralogicznych okruchowej mineralizacji złotonośnej wyróżniono dwa podstawowe morfotypy złota: blaszkowo-platekowane (płaskie lub wtórnie zdeformowane) oraz cementacyjno-grudkowe.

Niezależnie od morfotypu oraz składu chemicznego analizowanych ziaren złota na ich powierzchni rozpoznano nano- i mikrostruktury Au zbudowane ze złota podwyższonej próby oraz widoczne w przekroju ziaren wewnętrzne tekstury wskazujące na selektywne rozpuszczanie złota

w warunkach hipergenicznych, jego migrację, a następnie chemiczne wytrącanie z roztworów i wtórną rekrytalizację.

Krystaliczne przerosty złota oraz charakterystyczne banieczkowate lub drobnorobaczkowe skupienia Au (często w paragenezie z minerałami ilastymi), które zrastając się formują inkrustacje złota amorficznego, a ostatecznie warstwę złota „nowego” na powierzchni złociny, świadczą o aktywności procesów wytrącania złota autogenicznego w opisywanych okruchowych osadach złotonośnych.

Nano- i mikroskupienia złota robaczkowo-pęcherzykowego zbudowane ze złota amorficznego mogą być wynikiem koagulacji koloidów lub ich adsorpcji przez minerały ilaste będące powszechnym składnikiem badanych osadów. Część struktur robaczkowo-pęcherzykowych ma prawdopodobnie genezę biogeniczną i jest związana z procesami życiowymi oraz autolizą bakterii. Krystaliczne przerosty złota są prawdopodobnie efektem rekrytalizacji złota koloidalnego wytrącanego na powierzchni ziaren Au po depozycji w rozsypaniu. Osadnikiem (powierzchniami kondensacji) złota „nowego” były najczęściej starsze złociny, często z oznakami abrazyj i samooczyszczania. Jest mało prawdopodobne żeby kryształy i struktury kondensacji złota amorficznego mogły przetrwać transport i nie ulec destrukcji. Powstały one po depozycji w osadzie, w ostatnim stadium „uśpienia” rozsypania. Cykliczność powyższych procesów prowadzi do formowania coraz większej masy skupień „nowego” złota w osadzie okruchowym, a w rezultacie do odnawiania się rozsypania złotonośnego.

## LITERATURA

- ABRAMOV V.Y., POTAPOV A.A., KIRYUKHIN V.A., SUDARIKOV S.M., SHEMYAKIN V.N., 1993 – The hydrogene component in alluvial gold placers. *Geochem. Internat.*, **30**: 117–124.
- ALBANESE M.D., 1986 – The Parker gold piece. *Gold Bull.*, **19**, 3: 90–91.
- ALI H., CHRISTIE I., 1984 – A review of electroless gold deposition processes. *Gold Bull.*, **17**: 118–127.
- BADURA J., PRZYBYLSKI B., 1999 – Pliocene to Middle Pleistocene fluvial series in the East Sudetic Foreland. *Quarter. Stud. Poland, Special Issue*: 227–233.
- BADURA J., PRZYBYLSKI B., 2000 – Morphologic and age correlation of terraces of main rivers in the Lower Silesia [Eng. Sum.]. Wydaw. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- BADURA J., PRZYBYLSKI B., 2004 – Evolution of the Late Neogene and Eopleistocene fluvial system in the Foreland of Sudetes Mountains, SW Poland. *Ann. Soc. Geol. Pol.*, **74**: 43–61.
- BADURA J., PRZYBYLSKI B., ZUCHIEWICZ W., 2004 – Cainozoic evolution of Lower Silesia, SW Poland: a new interpretation in the light of sub-Cainozoic and sub-Quaternary topography. *Acta Geodyn. Geomater.*, **1**, 3–135: 7–29
- BAKER W.E., 1978 – The role of humic acid in the transport of gold. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **42**, 6: 645–649.
- BENEDETTI M., BOULEGUE J., 1991 – Mechanism of gold transfer and deposition in a supergene environment. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **55**, 6: 1539–1547.
- BISCHOFF G.C.O., 1994 – Gold-adsorbing bacteria as colonizers on alluvial placer gold. *Neues Jahrb. Geol. Paläont. Abh.*, **194**: 187–209.

- BISCHOFF G.C.O., 1997 – The biological origin of bacterioform gold from Australia. *Neues Jahrb. Geol. Paläont. Monatsh.*, **6**: 329–338.
- BOWELL R.J., GIZE A.P., FOSTER R.P., 1993 – The role of fulvic acid in the supergene migration of gold in tropical rain forest soils. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **57**: 4179–4190.
- BOYLE R.W., 1979 – The geochemistry of gold and its deposits. Geological Survey of Canada, 280. Energy, Mines and Resources of Canada.
- CLOUGH D.M., CRAW D., 1989 – Authigenic gold-marcasite association – evidence for nugget growth by chemical accretion in fluvial gravels, Southland, New Zealand. *Econ. Geol.*, **84**: 953–958.
- COBLEY C.M., XIA Y., 2009 – Gold and nano-technology. *Elements*, **5**: 309–313.
- CRAW D., 1992 – Growth of alluvial gold particles by chemical accretion and reprecipitation, Waimumu, New Zealand. *New Zealand J. Geol. Geophys.*, **35**, 2: 157–164.
- DESBOROUGH G.A., 1970 – Silver depletion indicated by microanalysis of gold from placer occurrences, Western United States. *Econ. Geol.*, **65**: 304–311.
- DUTOVA E.M., BUKATY M.B., NEVOL'KO A.I., POKROVSKY D.S., SHVARTSEV S.L., 2006 – Hydrogenic concentration of gold in alluvial placers of the Egor'evsk area, Salair [Eng. Sum.]. *Geol. Geofiz.*, **47**, 3: 364–376.
- DYJOR S., 1995 – Rozwój kenozoiku na bloku przedsudeckim. Przew. LXVI Zjazdu PTG: 29–40. Wydanie spec. Ann. Soc. Geol. Pol., Wrocław.
- EYLES N., 1995 – Characteristics and origin of coarse gold in Late Pleistocene sediments of the Cariboo placer mining district, British Columbia, Canada. *Sediment. Geol.*, **95**: 69–95.
- FAIRBROTHER L., BRUGGER J., SHAPTER J., LAIRD J., SOUTHAM G., REITH F., 2012 – Supergene gold transformation: biogenic secondary and nano-particulate gold from arid Australia. *Chem. Geol.*, **320–321**: 17–31.
- FALCONER D.M., CRAW D., 2009 – Supergene gold mobility: a textural and geochemical study from gold placers in southern New Zealand. *Soci. Econ. Geolog.*, **14**: 77–93.
- FOJT B., HAUK J., VODOVÁ E., 1987 – Zlato jesenických stratiformních lozisek. Sbor. symp. Zlato v Západních Karpatech, Geol. Úst. D. Štúra. Bratislava: 36–39.
- FRIESE F.W., 1931 – The transportation of gold by organic underground solutions. *Econ. Geol.*, **26**, 4: 421–431.
- GIUSTI L., 1986 – The morphology, mineralogy, and behavior of fine-grained gold from placer deposits of Alberta: sampling and implications for mineral exploration. *Canad. J. Earth Sci.*, **23**: 1662–1672.
- GODLEWSKI A., WIERCHOWIEC J., 2004 – Detrital gold and others heavy minerals in alluvial deposits of Maruszka Stream near Burgrabice, East Sudety Mts., SW Poland [Eng. Sum.]. *Prz. Geol.*, **52**: 216–222.
- GREFFIÉ C., BENEDETTI M., PARRON C., AMOURIC M., 1996 – Gold and iron oxide associations under supergene conditions: an experimental approach. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **60**: 1531–1542.
- GRODZICKI A., 1997 – Ewolucja petrologiczna kenozoicznych osadów złotośnośnych okolic Głuchołazów w świetle teorii denudodezagregacji. *Pol. Tow. Miner., Pr. Spec.*, **9**: 97–99.
- HÉRAIL G., FORNAR G., VISKARRA G., MIRANDA V., 1990 – Morphological and chemical evolution of gold grains during formation of a polygenetic fluvial placer: the Mio-Pleistocene Tipuani placer example (Andes, Bolivia). *Chron. Rech. Min.*, **500**: 41–49.
- HONG H., TIE L., BIAN Q., ZHOU Y., 2006 – Interface characteristics between colloidal gold and kaolinite surface by XPS. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, **21**, 3: 90–93.
- HOUGH R.M., NOBLE R.R.F., HITCHEN G.J., HART R., REDDY S.M., SAUNDERS M., CLODE P., VAUGHAN D., LOWE J., GRAY D.J., ANAND R.R., BUTT C.R.M., VERRALL M., 2008 – Naturally occurring gold nanoparticles and nanoplates. *Geology*, **36**: 571–574.
- KANASIEWICZ J., 1982 – A method of quantitative interpretation of schlichts alluvial anomalies on the example of gold [Eng. Sum.]. *Prz. Geol.*, **30**, 8: 404–406.
- KRYZA J., POPRAWSKI L., 1987 – Próba rekonstrukcji plejstoceńskiego systemu dolin kopalnych południowo-zachodniej Polski. W: Problemy młodszego neogenu i eoplejstocenu w Polsce. Ossolineum, Wrocław.
- KERR G., CRAW D., 2017 – Mineralogy and geochemistry of biologically-mediated gold mobilization and redeposition in a semiarid climate, southern New Zealand. *Minerals*, **7**, 147: 1–18.
- KNIGHT J., MORISON S., MORTENSEN J., 1999 – The relationship between placer gold particle shape, rimming, and distance of fluvial transport as exemplified by gold from the Klondike District, Yukon Territory, Canada. *Econ. Geol.*, **94**: 635–648.
- KRENDELEV F.P., 1991 – Does gold grow in placers? W: Geochemical prospecting for ore deposits in taiga landscapes [Eng. Sum.]: 92–100. Nauka, Novosibirsk.
- LENGKE M.F., SOUTHAM G., 2006 – Bioaccumulation of gold by sulfate-reducing bacteria cultured in the presence of gold(I)-thiosulfate complex. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **70**, 14: 3646–3661.
- LENGKE M.F., SOUTHAM G., 2007 – The deposition of elemental gold from gold(I)-thiosulfate complexes mediated by sulfate-reducing bacterial conditions. *Econ. Geol.*, **102**, 1: 109–126.
- LOEN J.S., 1995 – Use of placer gold characteristics to locate bedrock gold mineralization. *Explor. Min. Geol.*, **4**: 335–339.
- MACHESKY M.X., ANDRADE W.O., ROSE A.W., 1991 – Adsorption of gold (III)-chloride and gold (I)-thiosulfate anions by goethite. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **55**: 769–776.
- MANN A.W., 1984 – Mobility of gold and silver in lateritic weathering profiles: Some observations from Western Australia. *Econ. Geol.*, **79**: 35–49.
- MCCREADY A.J., PARNELL J., CASTRO L., 2003 – Crystalline placer gold from the Rio Neuquén, Argentina: implications for the gold budget in placer gold formation. *Econ. Geol.*, **98**: 623–633.
- MÂRQUEZ-ZAVALIA M.F., SOUTHAM G., CRAIG J.R., GALLISKI M.A., 2004 – Morphological and chemical study of placer gold from the San Luis Range, Argentina. *Canad. Mineral.*, **42**: 55–68.
- NECHAEV Y.A., 1985 – The effect of solution composition on the adsorption of gold (III) complexes on hematite. *Geochem. Internat.*, **22**: 87–93.
- OSOVETSKY B.M., 2016 – Aggregation of nanogold particles in the environment. *Nat. Resour. Res.*, **25**, 2: 241–253.
- RAN Y., FU J., RATE A.W., GILKES R.J., 2002 – Adsorption of Au (I, III) complexes on Fe, Mn oxides and humic acid. *Chem. Geol.*, **185**: 33–49.
- REITH F., MCPHAIL D.C., 2006 – Effect of resident microbiota on the solubilization of gold in soil from the Tomakin Park gold mine, New South Wales, Australia. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **70**, 6: 1421–1438.

- REITH F., ROGERS S.L., MCPHAIL D.C., WEBB D., 2006 – Biomineralization of gold: biofilms on bacterioform gold. *Science*, **313**, 5784: 233–236.
- REITH F., STEWART L., WAKELIN S.A., 2012 – Supergene gold transformation: secondary and nanoparticulate gold from southern New Zealand. *Chem. Geol.*, **320**: 32–45.
- RONG L., SIERADZKI K., 1992 – Ductile-brittle transition in random porous gold. *Phys. Rev. Lett.*, **68**: 1168–1171.
- SCHMIDBAUR H., CRONJE S., DJORDJEVIC B., SCHUSTER O., 2005 – Understanding gold chemistry through relativity. *Chem. Phys.*, **311**, 151–161.
- SEELEY J.B., SENDEN T.J., 1994 – Alluvial gold in Kalimantan, Indonesia: a colloidal origin? *J. Geochem. Explor.*, **50**, 1–3: 457–478.
- SHCHEGOL'KOV YU.V., TAUSON V.L., MEDVEDEV V.YA., POCHKUNINA M.V., IVANOVA L.A., LIPKO S.V., 2007 – Interaction of elemental gold surface with fluids: a key to understanding mechanisms of recondensation and mobilization of gold under endogenic and exogenic conditions. *Dokl. Earth Sci.*, **413**, 2: 244–247.
- SHUSTER J., JOHNSTON C.W., MAGARVEY N.A., GORDON R.A., BARRON K., BANERJEE N.R., SOUTHAM G., 2015 – Structural and chemical characterization of placer gold grains: implications for bacterial contributions to grain formation. *Geomicrobio. J.*, **32**, 2: 158–169.
- SHUSTER J., REITH F., CORNELIS G., PARSONS J.E., PARSONS J.M., SOUTHAM G., 2017 – Secondary gold structures: relics of past biogeochemical transformations and implications for colloidal gold dispersion in subtropical environments. *Chem. Geol.*, **450**: 154–164.
- SHVARTSEV S.L., DUTOVA E.M., 2001 – Hydrochemistry and mobilization of gold in the hypergenesis zone (Kuznetsk Alatau, Russia). *Geol. Ore Dep.*, **43**, 3: 224–233.
- SOUTHAM G., 1998 – Quantification of sulfur and phosphorous within secondary gold rims on Yukon placer gold. *Geology*, **26**: 339–342.
- SOUTHAM G., SAUNDERS J.A., 2005 – The geomicrobiology of ore deposits. *Econ. Geol.*, **100**: 1067–1084.
- TOWNLEY B.K., HÉRAIL G., MAKSAEV V., PALACIOS C., DE PARSEVAL P., SEPULVEDA F., ORELLANA R., RIVAS P., ULLOA C., 2003 – Gold grain morphology and composition as an exploration tool: application to gold exploration in covered areas. *Geoch. Explor., Environ., Analysis*, **3**, 1: 29–38.
- VEČEŘA J., 1996 – Mekke doly ve Zlatých Horách. Sborník Montanisticko-geologické nadace. 2 ročník, Jeseník.
- VLAISOPOULOS D., WOOD S.A., 1990 – Gold speciation in natural waters. I. Solubility and hydrolysis reactions of gold in aqueous solution. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **54**, 1: 3–12.
- WATERSON J.R., 1985 – Crystalline gold in soil and the problem of supergene nugget formation: freezing and exclusion as genetic mechanisms. *Precam. Res.*, **30**: 321–335.
- WEBSTER J.G., 1986 – The solubility of gold and silver in the system Au–Ag–S–O<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O at 25°C and 1 atm. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **50**, 9: 1837–1846.
- WEBSTER J.G., MANN A.W., 1984 – The influence of climate, geomorphology and primary geology on the supergene migration of gold and silver. *J. Geochem. Explor.*, **22**, 1–3: 21–42.
- WIERCHOWIEC J., 2000 – Złotonośność trzeciorzędowych i czwartorzędowych osadów rzecznych na przedpolu Sudetów Wschodnich. Unpublished Ph.D. thesis. Department of Geology, The Warsaw University: 1–159.
- WIERCHOWIEC J., 2001 – Origin of placer gold occurrences in the vicinity of Głucholazy, SW Poland. *W: Mineral deposits at the beginning of the 21<sup>st</sup> century* (red. A. Piestrzyński): 835–838. Balkema Publishers, Lisse.
- WIERCHOWIEC J., 2002 – Morphology and chemistry of placer gold grains – indicators of the origin of placers: an example from the East Sudetic Foreland, Poland. *Acta Geol. Pol.*, **52**, 4: 563–576.
- WIERCHOWIEC J., 2006 – Preglacial to Holocene auriferous sediments from the East Sudetic Foreland, Poland: gold grade and exploration. *Geol. Quart.*, **50**, 2: 289–302.
- WIERCHOWIEC J., 2007 – Placer gold and other economic minerals from the remnants of palaeofan deposits in the foreland of the East Sudetes, Poland. *Acta Geol. Pol.*, **57**, 4: 523–537.
- WIERCHOWIEC J., 2010 – Gold in technogenous placers of Lower Silesia, Poland. Warsaw University Press, Warszawa.
- WIERCHOWIEC J., 2011 – Placer gold of East Sudetes and its foreland, Poland. *W: Gold in Poland* (red. A. Kozłowski, S.Z. Mikulski). *Arch. Mineral. Mon.*, **2**: 209–242.
- WIERCHOWIEC J., MIKULSKI S.Z., GAŚIŃSKI A., 2018 – Nanofoms of gold from abandoned placer deposits of Wądroże Wielkie, Lower Silesia, Poland – the evidence of authigenic gold mineralization. *Ore Geol. Rev.*, **101**: 211–220.
- WILSON A.F., 1984 – Origin of quartz-free gold nuggets and supergene gold found in laterites and soils. A review and some new observations. *Australian J. Earth Sci.*, **31**: 303–316.
- WOOD S.A., 1996 – The role of humic substances in the transport and fixation of metals of economic interest (Au, Pt, Pd, U, V). *Ore Geol. Rev.*, **11**: 1–31.
- YOUNGSON J., CRAW D., 1993 – Gold nugget growth during tectonically induced sedimentary recycling, Otago, New Zealand. *Sediment. Geol.*, **84**: 71–88.
- YOUNGSON J., CRAW D., 1995 – Evolution of placer gold deposits during regional uplift, Central Otago, New Zealand. *Econ. Geol.*, **90**: 731–745.
- YOUNGSON J., CRAW D., 1999 – Variation in placer style, gold morphology, and gold particle behavior down gravel bad-load rivers: an example from the Shotover/Arrow–Kawarau–Clutha river system, Otago, New Zealand. *Econ. Geol.*, **94**: 615–634.
- ZHU L., LETAIEF S., LIU Y., GERVAIS F., DETELLIER C., 2009 – Clay mineral-supported gold nanoparticles. *Appl. Clay Sci.*, **43**, 3–4, 439–446.

## SUMMARY

Auriferous sequences in the East Sudetic Foreland include up to five gold-bearing horizons and are associated with the so-called preglacial “White Gravels”, Pleistocene and Holocene fluvial deposits overlying the Neogene sediments of the Poznań formation or Paleozoic metamorphic rocks. The significant placer potential for gold in the region lies in the

preglacial (Eopleistocene) fluvial drainage system, primarily in paleo-channels of the Biała Głucholaska River (Fig. 1).

The White Gravels, the richest gold-bearing deposits, contain Au grades that range between 0.4 g/m<sup>3</sup> near its base, to 0.02–0.1 g/m<sup>3</sup> in its upper part and correspond to the coarsest gravel sediments in the sequence.



Placer gold from East Sudetic gold-bearing deposits is generally fine grained, usually falling into the 150–250  $\mu\text{m}$  and 250–500  $\mu\text{m}$  size fractions. Two visibly distinct gold sub-types are identified based on their overall morphology: flaky gold, flattened or reshaped by refolding and craggy, irregular grains (Fig. 3). The abundance of peculiar folded particles and “sandwich-like” gold grains is a specific feature of the White Gravel sediments. Some particles have been folded then re-flattened, or repeatedly folded. These features are typical of the grains having undergone significant fluvial transport.

All the grains are alloys of gold and silver, with Te and Se occurring as trace amounts. The electron microprobe data (Tab. 1) classify the gold grains into the following two categories: Ag-poor grains (<10 wt % Ag) and Ag-rich grains (up to 21.4 wt % Ag).

Two distinct gold sub-types of detrital gold display surface morphotypes and internal textures of Au and Ag dissolution indicative of supergene gold modification, as well as authigenic Au formation and aggregation resulting in the renewal of gold-bearing placers.

The indicative morphotypes include nano- to microparticulate bud- or bubble-like gold, as well as overgrowths and aggregates of crystalline plate-like gold (Figs. 4, 5). They are well preserved and lacking any signs of physical damage. Some of bubble-like growths are embedded in clayey

masses within crevices, suggesting that dissolution/reprecipitation processes occur at the gold grain interface.

The SEM investigation of the microtopography and internal texture of gold grains from different gold-bearing horizons revealed indications of post-depositional dissolution of Au–Ag alloys and redistribution of these components within the sediment. The grains are mostly compositionally inhomogeneous with one or more cores and the Au-rich rim, and show complex core-boundary contact outline. Some grains contain features such as Ag-poor tracks or multiple gold rich zones, which could be a consequence of the smaller particles welding (Fig. 5H).

Stages of the gold particles growth have been observed during the nano- to microtextural investigations of gold grains, from the isolated semi-spherical nanoparticles, agglomerates, to irregularly shaped plates of gold.

The presence of nano- to microphase gold embedded in the fine-grained assemblages of clayey masses and the lack of any signs of grain surface abrasion confirmed that bud- and bubble-like Au, as well as complex aggregates of plate-like gold, must have formed *in situ*, *i.e.* are authigenic in origin. Chemical transfer may be related to both the Au precipitation from a colloidal solution as well as the adsorption by clay minerals and surface precipitation of Au on particles of mineral substrate.

