

## Rezumat

Prezenta teză de abilitare “*Mineralogia minereurilor. Aplicații în Zăcămintele metalifere și Archeometrie*” prezintă rezultatele științifice, profesionale și academice obținute după finalizarea tezei de doctorat (aprilie 2002) și precizează principalele direcții de dezvoltare a activităților mele viitoare.

În prima parte a tezei sunt prezentate rezultatele științifice și constituie cea mai importantă secțiune a prezentei lucrări, fiind structurată în trei capitole.

Primul capitol cuprinde principalele rezultate științifice privind mineralogia zăcămintelor de minereuri, ce sunt prezentate în contextul cercetărilor actuale. Au fost selectate o serie de rezultate care ilustrează progresul obținut în cunoașterea zăcămintului Roșia Montană din perspectivă mineralogică, respectiv descoperirea și prima menționare a următoarelor telururi: hessit -  $\text{Ag}_2\text{Te}$ , silvanit -  $\text{AuAgTe}_4$ , altait –  $\text{PbTe}$ , petzit -  $\text{Ag}_3\text{AuTe}_2$ ; prima menționare a argiroditului cu telur -  $\text{Ag}_8\text{GeTe}_2\text{S}_4$ ; prima menționare a unei sulfotelururi rare - cervelleit,  $\text{Ag}_4\text{TeS}$ ; descoperirea a două ocurențe cu telururi - filonul Cârnicel și un sistem filonian cantonat în Breția Neagră, masivul Cetate. Rezultatele menționate anterior au fost confirmate prin date analitice cantitative obținute la microsonda electronică (EPMA) ce au completat informațiile obținute prin microscopie electronică (SEM) și microscopie optică. Cercetările de teren în cadrul lucrărilor miniere subterane și studiile mineralogice efectuate pe un număr foarte mare de eșantioane de minereuri mi-au permis să pun în evidență patru episoade de mineralizare în cadrul masivului Cârnic, fiecare dintre acestea fiind caracterizat de o asociație mineralogică particulară și un raport Au/Ag specific. Rezultatele obținute indică o tranziție la nivelul întregului zăcămint de la un caracter inițial bogat în Au la un caracter final bogat în Ag, respectiv o tendință de evoluție ce constă într-o îmbogățire continuă în Ag în paralel cu o diminuare simultană a conținuturilor de Au pe parcursul duratei de activitate a sistemului hidrotermal. S-a confirmat de asemenea că îmbogățirea în Te și Ge și apariția structurilor mineralizate cu gangă de minerale de Mn s-au realizat spre finalul activității hidrotermale de la Roșia Montană, fiind corelate cu un nou puls magmatic. Studiile mineralogice și de zăcămint indică existența la Roșia Montană a două zăcămintele suprapuse, unul timpuriu de tip *low sulfidation* bogat aurifer, peste care s-a suprapus un altul tardiv, de tip *intermediate sulfidation* bogat argentifer. Un alt rezultat științific important este descoperirea unui nou mineral metalic, denumit alburnit -  $\text{Ag}_8\text{GeTe}_2\text{S}_4$ , un nou membru al seriei argirodit - canfieldit. Acest nou mineral a fost descris în conformitate cu standardele internaționale și a fost validat de Asociația Mineralogică Internațională (IMA), Comisia de Minerale Noi, Nomenclatură și Clasificare (CNMNC). Descrierea noului mineral furnizează date referitoare la: ocurență, asociația mineralogică, proprietățile fizice, proprietățile optice inclusiv valorile de reflectanță, compoziția chimică, cristalografia și relațiile cu alte specii minerale.

Al doilea capitol reunește rezultatele obținute pentru zăcămintul Roșia Montană pe baza unor cercetări de teren și prin integrarea unor concepte științifice actualizate privind brecifierea și zăcămintele de minereuri. Aceste rezultate noi se referă în special la structurile de brecii, alterațiile și mineralizațiile din cariera Cetate, furnizând date noi asupra mineralizațiilor din perspectiva incluziunilor fluide, izotopilor oxigenului și vârstei radioactive. Studiul sectorului minier Găuri, situat în sud-vestul masivului Cetate, a evidențiat legătura dintre punerea în loc a unor structuri filoniene și brecifiere, precum și importanța controlului litologic asupra dezvoltării corpurilor de minereu și a depunerii mineralizațiilor hidrotermale. De asemenea, fost descrisă pentru prima dată în literatura de specialitate structura *breccia pipe* Corhuri, situată în inima masivului Cârnic. Studiul acestei structuri a permis precizarea raportului

dintre brecifierea freatomagmatică și activitatea hidrotermală responsabilă de brecifierea hidrotermală și formarea de filoane. Au fost, de asemenea, identificați factorii de control ai mineralizațiilor cu conținuturi Au-Ag ridicate.

Cel de-al treilea capitol prezintă rezultatele obținute în peste 10 ani de cercetări de arheometrie derulate în România și Franța. A fost acordată o atenție deosebită minei romane Alburnus Maior, actuala Roșia Montană. În calitate de membru al unei echipe internaționale de cercetări interdisciplinare am contribuit într-un mod semnificativ la producerea unui volum important de date noi care documentează în premieră în România, într-o manieră științifică modernă, activitatea minieră romană. A fost posibilă reconstituirea imaginii unei mine romane din perspectivă arheologică minieră prin identificarea tipurilor de lucrări miniere și descrierea echipamentelor miniere utilizate. În acest capitol sunt prezentate pe scurt rețelele miniere romane descoperite și studiate în masivele Cărnic și Păru-Carpeni. Cercetările geologice desfășurate în cadrul lucrărilor minere subterane romane de la Roșia Montană au pus în evidență nivelul ridicat de competență a minerilor ce le-a permis acestora să identifice cea mai bună strategie de exploatare și să-și organizeze/conducă activitatea minieră în concordanță cu duritatea rocilor, indicii de alterație și mineralizație și morfologia corpurilor de minereu. A fost de asemenea posibil să se reconstituie dinamica exploatării antice, să se stabilească scopul lucrărilor miniere, să se cuantifice producția obținută în cadrul unui șantier de exploatare, să se identifice cele foarte puține erori făcute de minerii romani și să se pună în evidență anumite aspecte problematice privind lucrările miniere. În același context au fost obținute primele date de izotopi ai Pb pe minereurile Au-Ag exploatare de romani, în concordanță cu o metodologie de studiu novatoare și s-au pus în evidență primele indicii privind o activitate metalurgică Au-Ag în cadrul sitului. A fost de asemenea detaliată o nouă metodologie de abordare a studiilor de trasabilitate a metalelor, care determină creșterea pertinentei rezultatelor, pe baza unor studii de caz din Franța și România. Urmând această nouă abordare metodologică a fost inițiat studiul minelor galice din Limousin, Franța. Primele rezultate ce privesc situl minier galic Les Fouilloux au precizat caracterul Au-Ag al minereului exploatat, au scos în evidență particularitățile lui mineralogice și au evidențiat semnătura sa Sb, As și Bi.

Partea a doua a tezei prezintă realizările mele profesionale în calitate de consultant sau expert prin realizarea unor studii de specialitate pentru diverși parteneri industriali. Partea a treia sintetizează realizările mele academice, trecând în revistă activitățile didactice susținute în cadrul Departamentului de Geologie, Universitatea Babeș-Bolyai, Cluj-Napoca, România și a Departamentului de Geoștiințe, Universitatea din Fribourg, Elveția.

Partea a patra a tezei precizează care sunt principalele direcții de dezvoltare a viitoarelor mele activități științifice, academice și profesionale ce pot fi concretizate pe baza competențelor validate până în prezent prin rezultatele obținute. Sunt subliniate câteva obiective pe termen scurt, în principal academice și științifice, pentru care sunt indicate și planurile de acțiune care garantează fezabilitatea lor.

## Abstract

This habilitation thesis, titled *Mineralogy of Ores. Applications in Ore Deposits and Archaeometry*, presents my scientific, professional and academic achievements acquired after completion of my PhD thesis in April 2002 and gives the main guidelines for my future activities.

The first part of the thesis, organized in three chapters, comprises the scientific achievements and represents the largest section of this work.

The first chapter deals with my scientific results regarding the mineralogy of ore deposits, which are presented in the context of present day scientific state of the art. Several scientific results were selected to illustrate the progress made in the case of the Roşia Montană ore deposits from a mineralogical point of view, *e.g.* the discovery and the first mention of the following tellurides: hessite –  $\text{Ag}_2\text{Te}$ , sylvanite –  $\text{AuAgTe}_4$ , altaite –  $\text{PbTe}$ , petzite –  $\text{Ag}_3\text{AuTe}_2$ ; the first mention of tellurium-bearing argyrodite –  $\text{Ag}_8\text{GeTe}_2\text{S}_4$ ; the first mention of the rare sulphotelluride cervelleite,  $\text{Ag}_4\text{TeS}$ ; the discovery of two telluride occurrences – the Cârnicel vein, Cârnic massif and a vein swarm in Black Breccia, Cetate massif. The mineralogical data listed above were certified by EPMA data besides other less discriminative analytical methods (SEM, optical microscopy). The field work in the underground and the mineralogical investigations carried out on many ore samples allowed me to identify four hydrothermal deposition episodes in the Cârnic Massif, each one with its specific mineral assemblage and Au:Ag ratio. These results suggest a transition from an early Au-rich environment to a late Ag-rich environment at the ore deposit scale, an evolution trend consisting of a continuous enrichment in Ag and a simultaneous depletion in Au during the lifespan of the hydrothermal system. It was also confirmed that Te and Ge enrichment and the related Mn-gangue minerals deposition took place toward the end of the hydrothermal activity in Roşia Montană, being correlated with a new magmatic pulse. The conclusion of the mineralogical and ore deposit research carried out in Roşia Montană is that the ore deposit corresponds in fact to two deposits: an early low sulfidation Au-dominated one overprinted by a late intermediate sulfidation Ag-dominated deposit. Another important scientific result is represented by the discovery of a new metallic mineral named *alburnite* –  $\text{Ag}_8\text{GeTe}_2\text{S}_4$ , a new member of the argyrodite – canfieldite series. The new mineral was described according to international standards and was validated by the International Mineralogical Association (IMA), Commission on New Minerals, Nomenclature and Classification (CNMNC). The description of the mineral provides data concerning the following: occurrence, mineralogical assemblage and physical properties, optical properties including reflectance data, chemical composition, crystallography, and relationships with other mineral species.

The second chapter summarizes the new results obtained for the Roşia Montană ore deposits, taking into consideration new field work and updated scientific concepts concerning the brecciation and ore deposits geology. These new data mainly concern the breccia structures, the alterations and the mineralizations from the Cetate open pit, giving additional results on fluid inclusions, oxygen isotopes and the radiometric age of mineralization. The study of the Găuri mining field located at the south-western edge of the Cetate massif revealed the relationships between veining and brecciation and the importance of the lithological control for the development of ore bodies and the hydrothermal ore deposition. The Corhuri breccia pipe structure located at the heart of the Cârnic massif was also described for the first time in the geological literature. Its study allowed for the pointing out of the relationships between

phreatomagmatic brecciation and overprinting hydrothermal activity responsible for hydrothermal brecciation and veining, also revealing several ore grades control factors.

The third chapter presents the results of over a decade of research in the field of Archaeometry carried out in Romania and France. Special attention was given to the Roman mine of *Alburnus Maior*, the present day Roşia Montană. As a member of an international interdisciplinary research team, I significantly contributed to the production of a vast amount of new data documenting for the first time following a modern scientific approach the Roman mining activity in Romania. It was thus possible to draw the image of a Roman mine from a mining archaeological perspective by identification of the types of mining works and identification and description of the mining equipments used. This chapter briefly presents the Roman mining networks discovered and studied in the Cărnic and Păru-Carpeni massifs. The geologic investigation of the Roman underground mines of Roşia Montană revealed the competences of the miners that allowed them to establish the best exploitation strategy and conduct the mining activity in agreement with the rock hardness, hydrothermal alteration and mineralization indexes, and morphology of the ore bodies. It was also possible to recreate the dynamic of the ancient exploitation, to decipher the scope of the mining works, to quantify the production of a stope, to identify the very few errors and to highlight some unsolved aspects of the mines. In the same context, the first Pb isotopic data have been obtained following a new methodological approach for the Au-Ag ores exploited by the Romans at Roşia Montană and also the first indices concerning the Roman Au-Ag metallurgy were acquired onsite. A new methodology which increases the significance of metal provenance studies is also detailed, based on examples from France and Romania. According to the same methodological approach, the study of the Gaul mines from Limousin, France was initiated. The first results concerning Les Fouilloux Gaul mines are briefly presented, indicating the Au-Ag character of the exploited ores and their mineralogical peculiarities as well as their Sb, As and Bi signature.

The second part of the thesis presents my professional achievements as a consultant or as an expert in providing specific studies for industry partners. The third part summarizes my academic achievements, reviewing my teaching activities at the Department of Geology, Babeş-Bolyai University, Cluj-Napoca, Romania and at the Department of Geosciences, University of Fribourg, Switzerland.

The fourth part of the thesis provides the main guidelines for my future scientific, academic and professional activities that can be sustained by my competences and are already partially validated by my present results. Several short term goals are highlighted, mostly regarding the academic and scientific goals, also indicating the action plans which will guarantee their feasibility.