

Główne formacje metalogeniczne w Polsce pod kątem występowania pierwiastków krytycznych

Stanisław Z. Mikulski¹



The main metallogenic formations in Poland in terms of the occurrence of critical elements. Prz. Geol., 73: 905–908; doi: 10.7306/2025.95

A b s t r a c t. The Zechstein copper-bearing formation is one of the most important units for metallic elements classified as critical raw materials. It is mostly due to the large resources of Cu documented and a considerable amount of refined copper recovered annually by KGHM Polska Miedź S.A. Other critical elements are not currently mined or recovered from primary deposits. They occur in various documented deposit types classified within a dozen or so metallogenic formations described in the text. The elements are the main ore minerals (e.g. Cu, W, Ti, V, Ni, P, REE, As, Ba, F, and Mg), associated minerals (e.g., Ti, V, W, Co and Bi), or enrichments in other ores or associated minerals (Ga, Ge, V, Co, Sc, La, Ce, Nd, Pd, and Pt). The following formations are worth mentioning: Zn-Pb

MVT type, Fe-Ti-V orthomagmatic type, Cu-Mo-W porphyry type, and several other formations with smaller estimated CRE resources. The metallogenic formations mentioned in the article should be the subject of detailed PSG studies for the occurrence of CRM and the possibility of their recovery in mineral processing.

Keywords: metallogenic formation, critical elements, Poland

Pierwiastki krytyczne (CRM, 2023) mają obecnie duże znaczenie dla rozwoju technologii związanych z transformacją energetyczną oraz rozwojem nowoczesnych technologii w przemyśle motoryzacyjnym, elektronicznym, zbrojeniowym, kosmicznym i chemicznym (Moss i in., 2011). Zastosowanie najnowszych kompleksowych metod laboratoryjnych w prowadzonych przez Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy (PIG-PIB) badaniach geochemicznych (ICP-MS, WD-XRF, GF-AAS) i mineralogicznych (SEM, EPMA, XRD) otworzyło nowy rozdział w zakresie rozpoznania dystrybucji pierwiastków krytycznych w złożach rud metali w Polsce (Mikulski i in., 2018). Uzyskane wyniki wskazują na obecność licznych pierwiastków śladowych, z których większość wykazuje korelację z głównymi metalami rudnymi i mogą być potencjalnie interesujące pod względem ekonomiczno-surowcowym (Mikulski i in., 2020; 2022, wraz z literaturą).

GŁÓWNE FORMACJE METALOGENICZNE W POLSCE PERSPEKTYWICZNE POD KĄTEM WYSTĘPOWANIA PIERWIASTKÓW KRYTYCZNYCH

W Polsce można wyróżnić co najmniej kilkanaście formacji metalogenicznych, które od dawna miały i/lub nadal mają istotne znaczenie dla krajowej gospodarki jako źródło surowców metalicznych (m.in. Fedak, Lindner, 1966; Rubinowski i in., 1966; Bolewski, Gruszczyk, 1977–1986; Osika, 1987 wraz z literaturą; Mikulski, 2007; Nieć i in., 2016; Szamałek i in., 2020), a w przyszłości mogą być również dodatkowym źródłem metali krytycznych (CRM, 2023) do wykorzystania w transformacji energetycznej oraz rozwoju nowoczesnej produkcji przemysłowej w krajach Unii Europejskiej (Speczik i in., 2022; Chmielewski, Oszczepalski, 2025, wraz z literaturą).

W artykule przyjęto, że jako formację metalogeniczną należy rozumieć naturalne, przestrzenne i czasowe rozmieszczenie złóż mineralnych powstałe w wyniku rozwoju regionalnych procesów w podobnych warunkach geologiczno-złożowych, tektonicznych oraz geodynamicznych. Procesy te doprowadziły do uformowania genetycznie powiązanych złóż mineralnych o zbliżonym składzie chemicznym kopalin oraz goszczących w podobnych utworach skalnych.

Na obecnym etapie rozpoznania należy przyjąć, że zdecydowanie największe znaczenie ma:

- ❑ siarczkowa miedziowo-srebrna formacja cechuszyńska na Dolnym Śląsku (ryc. 1), zawierająca w złożach (typ SSC – *Stratabound Sediment hosted Copper deposit*) dodatkowo znaczne zasoby pierwiastków krytycznych i/lub towarzyszących (Co, Ni, V, Mo, Zn, Pb, Se, Re, S). Jednak przede wszystkim ze względu na udokumentowane duże zasoby metali (głównie Cu, Ag; Szuflicki i in., 2025) oraz nowoczesną i dobrze rozwiniętą infrastrukturę KGHM Polska Miedź S.A. w zakresie górnictwa, przeróbki oraz metalurgii rud siarczkowych. Istotne znaczenie ma także duża coroczna produkcja przemysłowa miedzi elektrolitycznej i srebra, a także renu, selenu oraz siarczynu Ni, ołowiu i metali szlachetnych (Szuflicki i in., 2025).

Mniejsze znaczenie – aktualnie nie jest prowadzona działalność wydobywcza – wykazuje:

- ❑ siarczkowa formacja cynkowo-ołowiowa (typ MVT – *Mississippi Valley Type deposit*), występująca głównie w utworach węglanowych triasu środkowego oraz w mniejszym stopniu w skałach dewonu w obszarze śląsko-krakowskim, w których są obecne w podwyższonych ilościach pierwiastki towarzyszące

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; stanislaw.mikulski@pgi.gov.pl; ORCID ID: 0000-0002-9941-5630





Ryc. 1. Lokalizacja różnych typów genetycznych złóż rud metali perspektywicznych dla wystąpień metali krytycznych na tle wybranych jednostek metalogenicznych w Polsce (zestawiono na podstawie: Fedak, Lindner, 1966; Osika, 1987; Mazur i in., 2006; Maliszewska i in., 2016; Krzemińska, Krzemiński, 2017; Mikulski, Oszczepalski, 2017; Szamałek i in., 2017; Narkiewicz, 2021)

Fig. 1. Location of various genetic types of metal ore deposits prospective for the occurrence of critical metals against the background of selected metallogenic units in Poland (compilation based on: Fedak, Lindner, 1966; Osika, 1987; Mazur et al., 2006; Maliszewska et al., 2016; Krzemińska, Krzemiński, 2017; Mikulski, Oszczepalski, 2017; Szamałek et al., 2017; Narkiewicz, 2021)

(Cd, Ag, Tl, S) oraz krytyczne (Ga, Ge, Ba, As). Złoża siarczkowe Zn-Pb oraz tlenowe (Zn-galmany) regionu śląsko-krakowskiego były przedmiotem wielowiekowej eksploatacji. W ostatnim 50-leciu udokumentowano również kilka nowych złóż siarczkowych Zn-Pb w tym rejonie, które nie zostały jak dotychczas zagospodarowane, pomimo znacznych zasobów Zn i Pb, a także stałej obecności domieszek metali krytycznych w rudach siarczkowych i tlenowych.

Wśród innych, zasługujących na szczególną uwagę, formacji metalogenicznych, w których zostały udokumentowane złoża rud metali o znacznych zasobach, są:

- ❑ tlenkowa formacja magnetytowo-ilmenitowa z wanadem (typ ortomagmowy) związana z mezoproterozoicznym suwalskim kompleksem AMCG (anortozyt-mangeryt-charnokit-granit), której towarzyszą znaczne szacunkowe zasoby Cu, Co, Ni oraz Zn (związane z mineralizacją siarczkową), a także Sc (towarzyszący mineralizacji tlenkowej);
- ❑ formacja siarczkowa $Cu \pm Mo \pm W$ (złoża porfirowe, sztokwerkowe oraz skarnowe) związana z karbońskimi felzytowymi intruzjami występującymi wzdłuż strefy tektonicznej Kraków–Lubliniec oraz w Sudetach;
- ❑ formacja karbonantytowa z REE w strefie wystąpień karbońskich intruzji alkalicznych na platformie wschodnioeuropejskiej oraz w Sudetach. Jednak jak dotychczas w ww. formacjach nie prowadzono działalności górniczej ze względu na bardzo różne uwarunkowania i ograniczenia.

Na obecnym etapie rozpoznania mniejsze znaczenie pod względem wystąpień pierwiastków krytycznych mają następujące formacje metalogeniczne:

- ❑ formacja stratyfikowanych złóż kasyterytowo-siarczkowych wzbogaconych w Bi, Co, Cu, In, Zn oraz Pb występująca w utworach paleozoicznych w Sudetach;
- ❑ formacja dolnoordowickich czarnych łupków wzbogaconych w U, V i Mo stwierdzona głównie na obniżeniu podlaskim;
- ❑ formacja ilmenitowo±magnetytowa z wanadem związana z dewońskim środkowo-sudeckim kompleksem ofiolitowym;
- ❑ formacje siarczkowe polimetaliczne±arsenowo±zło-tonośne związane z rozwojem procesów pomagmowo-hydrotermalnych wokół karbońskich intruzji w waryscydach w południowej Polsce (typ żyłowy, kontaktowo-metasomatyczny, skarny), wzbogacone w As, Au, Cu, lokalnie w Ag, Zn, Pb, Co, Bi, Sn i Te. Niektóre złoża zaliczane do tej formacji były przedmiotem okresowego wydobywania (głównie złota, arsenu i miedzi) już od czasów średniowiecza do lat 30.,

a wyjątkowo do lat 60. ubiegłego stulecia. Zaniechane głównie ze względu na wyczerpanie zasobów i/lub skomplikowaną budowę geologiczną i trudności w wydobywaniu głębiej zalegających rud. Pomimo iż są to złoża małe, to jednak bogate w metale krytyczne i szlachetne;

- ❑ karbońskie tufity i/lub wulkanoklastyki wzbogacone w glin (boksyty) rozpoznane w wierceniach archiwalnych. Wzbogacenia w glin występują pod przykryciem utworów mezozoicznych-kenozoicznych np. na wyniesieniu podlasko-lubelskim;
- ❑ formacje utlenione (tzw. Rote Fäule) w utworach permskich wzbogacone lokalnie w Au oraz PGE;
- ❑ paleozoiczne i/lub mezozoiczne formacje barytowo±fluorytowo±uranowo±siarczkowe w Sudetach i Górach Świętokrzyskich. Były one przedmiotem eksploatacji górniczej w ubiegłym stuleciu, zaniechanej ze względu na niskie ceny tych surowców oraz wyczerpanie rud. Jednak znane są także inne złoża oraz strefy rudne w złożach zaniechanych o dużym potencjale surowcowym;
- ❑ górnortriasowo-dolnojurskie formacje paleogleb wzbogacone w REE;
- ❑ formacje osadowe w tym fosforytonośne i/lub syderytoneśne w utworach mezozoicznych i kenozoicznych wzbogacone w $REE \pm U \pm Th$;
- ❑ kenozoiczne formacje złóż magnezytu i/lub
- ❑ wietrzeniowych złóż niklu (typ saprolitowy) z domieszkami Co, Cr, V i Mn występujące na bloku przedsudeckim;
- ❑ formacje polimetaliczne związane z kenozoicznym wulkanizmem w Karpatach.

PODSUMOWANIE

W Polsce spośród aktualnej listy pierwiastków metalicznych zaliczanych do surowców krytycznych zdecydowanie największe znaczenie i potencjał pod kątem ich występowania ma cechsztyńska formacja miedzionośna. Zostały w niej udokumentowane duże zasoby miedzi (zasoby bilansowe ok. 56,7 mln Mg), przy czym w obszarze dotychczasowej działalności górniczej KGHM *Polska Miedź* S.A. na monoklinie przedsudeckiej zasoby bilansowe Cu w sześciu czynnych kopalniach wynoszą ok. 26,47 mln t, które przy obecnym poziomie produkcji miedzi elektrolitycznej z wsadów własnych (383,70 tys. Mg w 2024 r., Szuflicki i in., 2025) powinny wystarczyć na co najwyżej 50–60 lat. W procesie produkcji z pierwiastków krytycznych są również odzyskiwane niewielkie ilości siarczynu niklu (ok. 2,36 tys. t) oraz Pt i Pd (Szuflicki i in., 2025). Inne pierwiastki krytyczne nie są przedmiotem wydobywania oraz odzysku z pierwotnych złóż w Polsce. Występują one w różnych udokumentowanych typach złóż, tworząc w nich

kopalinę główną (Ni, As, Ba, F, Mg, REE), towarzyszącą (Ti, V, W, Co, Bi) lub wzbogacenia w innych minerałach rudnych (Ga, Ge, V, Co, Sc). Porównanie średnich koncentracji pierwiastków, występujących w bilansowych rudach z różnych formacji metalogenicznych w Polsce, w stosunku do ich klarku w skorupie ziemskiej, wykazało w wielu przypadkach silne wzbogacenie w pierwiastki krytyczne (Mikulski i in., 2018, wraz z literaturą). Wśród szacunkowych znacznych zasobów metali krytycznych stwierdzono m.in.: Cu, Co, V, Ba, As, Ni i Bi tworzące w niektórych formacjach metalogenicznych wysokie koncentracje, ale również znacznie mniejsze zasoby pierwiastków występujących w postaci stałych domieszek w minerałach rudnych, jak np.: Ga, Hf, Nb, Sc, La, Ce, Nd, Ge, Pd i Pt (Mikulski i in., 2020, 2021, 2022, wraz z literaturą).

Aktualnie przygotowany Krajowy Program Poszukiwań Surowców Krytycznych bazuje częściowo na wynikach wcześniej przeprowadzonych prac, jednak obejmuje znacznie większą liczbę surowców mineralnych (34 wg listy CRMACT'24; Rozporządzenie, 2024) niż dotychczas brano pod uwagę w jakichkolwiek opracowaniach w zakresie krajowych perspektyw wystąpień pierwiastków krytycznych. Przedmiotem dalszych prac państwowej służby geologicznej (PSG) pod kątem perspektywicznych wystąpień złóż surowców krytycznych będą najbardziej perspektywiczne formacje metalogeniczne w Polsce.

LITERATURA

- BOLEWSKI A., GRUSZCZYK H. (red.) 1977–1986 – Seria Surowce mineralne świata. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- CHMIELEWSKI A., OSZCZEPALSKI S. 2025 – Perspective for copper-silver deposits in Poland: current resources and future exploration opportunities. *Przegląd Geologiczny*, 73 (3): 229–259.
- CRM, 2023 – Projekt rozporządzenia surowców krytycznych i strategicznych dla gospodarki Unii Europejskiej wraz z zaktualizowaną listów surowców krytycznych, 16.02.2023 r.; https://single-market-economy.ec.europa.eu/system/files/2023-03/COM_2023_160_1_EN_ACT_part1_v7.pdf
- FEDAK J., LINDNER M. 1966 – Metalogeneza Sudetów. Instytut Geologiczny Prace, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- KRZEMIŃSKA E., KRZEMIŃSKI L. 2017 – Mapa geologiczna podłoża krystalicznego polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej 1 : 1 000 000. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- MALISZEWSKA A., JACKOWICZ E., KUBERSKA M., KIERNOWSKI H. 2016 – Skały permu dolnego (czerwonego spągowca) zachodniej Polski – monografia petrograficzna. Prace Państwowego Instytutu Geologicznego, 204: 1–115.
- MAZUR S., ALEKSANDROWSKI P., KRYZAR., OBERC-DZIEDZIC T. 2006 – The Variscan Orogen in Poland. *Geological Quarterly*, 50: 89–118.
- MIKULSKI S.Z. 2007 – The late Variscan gold mineralization in the Kaczawa Mountains, Western Sudetes. *Polish Geological Institute Special Papers*, 22.
- MIKULSKI S.Z., OSZCZEPALSKI S. 2017 – Kopaliny Metaliczne. [W:] Nawrocki J., Becker A. (red.), *Atlas Geologiczny Polski*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa: 86.
- MIKULSKI S.Z., OSZCZEPALSKI S., SADŁOWSKA K., CHMIELEWSKI A., MAŁEK R. 2018 – Występowanie pierwiastków towarzyszących i krytycznych w wybranych udokumentowanych złożach rud Zn-Pb, Cu-Ag, Fe-Ti-V, Mo-Cu-W, Sn, Au-As i Ni w Polsce. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 472: 21–52.
- MIKULSKI S.Z., OSZCZEPALSKI S., SADŁOWSKA K., CHMIELEWSKI A., MAŁEK R. 2020 – Trace Element Distributions in the Zn-Pb (Mississippi Valley-Type) and Cu-Ag (Kupferschiefer) Sediment-Hosted Deposits in Poland. *Minerals*, 10, 75.
- MIKULSKI S.Z., SADŁOWSKA K., WISZNIEWSKA J., MAŁEK R. 2022 – Vanadium and Cobalt Occurrence in the Fe-Ti-V Oxide Deposits Related to Mesoproterozoic AMCG Complex in NE Poland. *Applied Sciences (MDPI)*, 12 (12), 6277.
- MOSS R.L., TZIMAS E., KARA H., WILLIS P., KOOROSHY J. 2011 – Critical metals in strategic energy technologies. Assessing rare metals as Supply-chain bottlenecks in low-carbon energy technologies. [W:] *European Commission Joint Research Centre Institute for Energy and Transport; Publication Office of the European Union, Luxembourg*: 162.
- NARKIEWICZ M. 2021 – Geologiczna historia Polski. Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.
- NIEĆ M., RADWANIEK-BAK B., LENIK P. 2016 – Szkic metalogenii polskich Karpat – modele i możliwości występowania złóż rud. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 467: 9–40.
- OSIKA R. (red.) 1990 – *Geology of Poland. Mineral Deposits*, t. 6. Instytut Geologiczny, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- ROZPORZĄDZENIE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY (UE) 2024/1252 z dnia 11 kwietnia 2024 r. w sprawie ustanowienia ram na potrzeby zapewnienia bezpiecznych i zrównoważonych dostaw surowców krytycznych oraz zmiany rozporządzeń (UE) nr 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1724 i (UE) 2019/1020. *Dz.U.UE.L.2024.1252*.
- RUBINOWSKI Z., KOWALCZEWSKI Z., LENARTOWICZ L., WROBLEWSKI T. 1966 – Metalogeneza trzonu paleozoicznego Gór Świętokrzyskich. Instytut Geologiczny Prace, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- SPECZIK S., SZAMAŁEK K., WIERCHOWIEC J., ZIELIŃSKI K., PIETRZELA A., BIENKO T. 2022 – The new Northern Copper Belt of south-western Poland: a summary. *Acta Geologica Polonica*, 72: 469–477.
- SZAMAŁEK K., SZUFLICKI M., MALON A., TYMIŃSKI M. (red.) 2017 – *Mineral Resources of Poland*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- SZAMAŁEK K., SZUFLICKI M., MIZERSKI W. (red.) 2020 – Bilans perspektywicznych zasobów kopalin w Polsce wg stanu 31.12.2018 r. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- SZUFLICKI M., MALON A., TYMIŃSKI M. (red.) 2025 – Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2024 r. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.

Praca wpłynęła do redakcji 13.10.2025 r.

Akceptowano do druku 17.10.2025 r.