



Możliwości występowania skandu w Polsce

Tomasz Bieńko¹, Andrzej Chmielewski¹

T. Bieńko



A. Chmielewski

Prospects for scandium occurrence in Poland. Prz. Geol., 74: 482–494; doi: 10.7306/2026.40

Redaktor prowadzący: Stanisław Wolkowicz

A b s t r a c t. Scandium has found wide industrial applications only recently, and it was first listed as a critical element in the third edition of the European Commission's Critical Raw Materials List in 2017. Demand for scandium has increased in recent years due to the introduction of lightweight and durable Sc-Al alloys, which are used in the automotive, aviation, and space industries. Production of scandium is highly concentrated in China. An estimated 50% of global supply comes from the Bayan Obo deposit in China and from Russia. The growing demand for scandium in industries vital to economic and strategic security, combined with risk of supply disruptions and the absence of domestic alternatives, has raised serious concerns.

For this reason, the European Union has recognized scandium exploration and resource assessment as one of the tasks aiming for raw materials security. As scandium has not previously been investigated in Poland from a deposit-oriented, strategic raw material perspective, available data on this metal are very limited, and Polish legislation does not currently define criteria for scandium deposits. The search for new occurrences of scandium, as a critical element for both the Polish and the EU economy, is therefore a key task of the Polish Geological Survey. The article presents a synthesis of information obtained during the preparation of the National Critical Raw Materials Exploration Program. It includes a review of known scandium occurrences in Poland and worldwide, and offers a concise summary of recommended directions for future research and exploration.

Keywords: scandium, critical raw materials, geological potential, Sudetes, mineral exploration

Średnia zawartość skandu w skorupie ziemskiej wynosi 14–22 g/t (Rudnick, Gao, 2015). Rozmieszczenie Sc^{3+} w jej skałach jest nierównomierne – szacuje się, że w górnej części skorupy ziemskiej koncentracje skandu są mniejsze niż w dolnej (odpowiednio 7 i 25 g/t; Wedepohl, 1995). Pod względem geochemicznym i krystalochemicznym skand (Sc^{3+}) znajduje się w grupie metali o zbliżonym powinowactwie elektronowym, takich jak: żelazo (Fe^{2+}), tytan (Ti^{4+}), itr (Y^{3+}), cyrkon (Zr^{4+}), glin (Al^{3+}) i ciężkie pierwiastki ziem rzadkich (HREE³⁺; Wedepohl, 1995; Kempe, Wolf, 2006). Skand należy do pierwiastków litofilnych, zachowuje się kompatybilnie względem krzemianów i glinokrzemianów, należy do minerałów wczesnie krystalizujących w procesach magmowych. Podstawowymi minerałami skałotwórczymi wzbogaconymi w skand są pirokseny (średnio 100 g/t Sc w klinopiroksenach) i amfibole (średnio 50 g/t Sc) oraz ilmenit (średnio 92 g/t Sc; Kempe, Wolf, 2006), a także biotyt, muskowit, granaty, turmalin, hematyt i ilmenit (np. Paulo, Krzak, 2015).

Minerały własne skandu rozpoznano w kilku lokalizacjach na świecie. Do najbardziej znanych należą kamieniołomy pegmatytu na Madagaskarze oraz w Norwegii (w regionach Iveland-Evje i Tordal), gdzie występują thortveityt ($\text{Sc}_2\text{Si}_2\text{O}_7$) i kolbeckit ($\text{ScPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; Williams-Jones, Vasyukova, 2018). W wymienionych miejscach minerały skandu są składnikami eksploatowanych kruszyw naturalnych i kamieni blocznych, lecz nie są wydobywane jako kopalin główna. Minerałami skandonośnymi są także:

- kangit ($\text{Sc,Ti,Al,Zr,Mg,Ca}_2\text{O}_3$;

- warkit $\text{Ca}_2(\text{Sc,Ti}^{3+},\text{Al,Mg,Zr})_6\text{Al}_6\text{O}_{20}$;
- pretulit $\text{Sc}(\text{PO}_4)$;
- allendeit $\text{Sc}_4\text{Zr}_3\text{O}_{12}$;
- nioboheftjernit ScNbO_4 ;
- bonacinait $\text{Sc}(\text{AsO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;
- jervisyt $\text{NaScSi}_2\text{O}_6$;
- davisyt CaScAlSiO_6 .

Skand występuje także w minerałach rzadkich, na przykład w wolframicie, minerałach z grupy kolumbitu, berylu i cyrkonie (Paulo, Krzak, 2015).

TYPY ZŁOŻ I RODZAJE KOPALIN
ZE SKANDEM NA ŚWIECIE

Do tej pory nie przedstawiono zunifikowanej klasyfikacji złóż skandu (Williams-Jones, Vasyukova, 2018; Wang i in., 2021; Liu i in., 2025), a geochemia procesów złóżotwórczych tego pierwiastka wciąż jest słabo rozpoznana. Złoża, w których skand odgrywa istotną rolę jako pierwiastek towarzyszący, można podzielić na magmowe i wietrzeniowe. Podwyższone koncentracje skandu są znane z kilku formacji metalogenicznych (Mikulski, 2025):

- magmowe kompleksy maficzne i ultramaficzne stref subdukcji (intruzje typu uralско-alakańskiego, ang. *Ural-Alaskan-type intrusions*);
- strefy wietrzenia kompleksów maficznych, ultramaficznych ze złożami niklu i kobaltu typu laterytowego oraz karbonatytowych z pierwiastkami ziem rzadkich;

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; tomasz.bienko@pgi.gov.pl; andrzej.chmielewski@pgi.gov.pl; ORCID ID: T. Bieńko – 0000-0001-5975-2918; A. Chmielewski – 0000-0002-1723-1273

- kompleksy karbonatytowe i intruzje magmowych skał alkalicznych;
- hydrotermalne systemy złożowe, w których skand występuje jako pierwiastek towarzyszący w żyłowych rudach cyny i wolframu.

Poza tym skand może występować w zmetamorfizowanych rudach żelaza i uranu, infiltracyjnych złożach uranowo-wanadowych, okrucowych złożach Ti-Zr-REE-Nb, skarnach berylońskich, grejzenach topazowych z wolframem, a także w zwietrzelinach z cyrkonem i ilmenitem.

SKAND W WYBRANYCH ZŁOŻACH I OBSZARACH PERSPEKTYWICZNYCH NA ŚWIECIE

Zasoby skandu udokumentowano w wielu złożach na świecie, w tym przede wszystkim w Australii, Chinach, na Filipinach, w Finlandii, Gwinei, Kanadzie, Kazachstanie, na Madagaskarze, w Norwegii, Rosji, RPA, na Ukrainie i w USA (Shelby, 2025). W niniejszym artykule scharakteryzowano wybrane wystąpienia i złoża metali, w których skand odkrywa rolę krytycznego pierwiastka towarzyszącego (tab. 1). We wszystkich opisanych przykładach wskazano zakresy zawartości tego metalu w różnego typu kopalinach. Gdy było to możliwe, wskazano również parametry definiujące złożę i jego granice (ang. *cut-off grade*), w celu zarysowania analogii pomiędzy światowymi wystąpieniami skandu a polskimi obszarami perspektywicznymi.

W Europie na uwagę zasługuje region Tordal (południowa Norwegia) ze względu na dobre rozpoznanie regionalne. W obszarze tym na powierzchni odsłania się ok. 300 ciał pegmatytowych, w których skand jest związany z granatami. Zawartość skandu w różnego typu granatach mieści się w przedziale od kilkunastu do 2197 g/t, a w skałach pegmatytowych średnia zawartość skandu wynosi 53 g/t (Steffenssen i in., 2020). Uznano, że skand pochodzi z częściowego przetopienia mezoproterozoicznych amfibolitów (średnia zawartość skandu w amfibolitach osiąga 14 g/t), a granaty zasobne w skand wykrystalizowały w początkowej fazie powstawania ciał pegmatytowych.

W Kiviniemi (wschodnia Finlandia) znajduje się jedyne w Europie wystąpienie skandu o rozpoznanych parametrach złożowych. Podwyższoną koncentrację skandu stwierdzono tam w niewielkiej (15 ha) intruzji maficznej w paleoproterozoicznym kompleksie granitoidowym (*Central Finland Granitoid Complex*). Intruzja Kiviniemi składa się z ferrodiorytów foido- i granatonośnych, leukoferrodiorytów, ferromonzodiorytów oraz diorytów piroksenitowych. Zawartość skandu w tych skałach waha się w przedziale od 50 do 281 g/t Sc (Halkoaho i in., 2020). Głównymi nośnikami skandu w złożu są minerały z grup amfibolu, piroksenu i apatytu. Szacowane zasoby złoża Kiviniemi wynoszą 13,4 mln ton rudy o średniej zawartości 162,7 g/t Sc (*cut-off* 40 g/t Sc). Wyliczenia te są jednak mało wiarygodne ze względu na ograniczoną liczbę danych. Pierwiastkami towarzyszącymi są cyrkon i itr (Halkoaho i in., 2020).

Ważnym magmowo-hydrotermalnym złożem zawierającym skand jest Zheltorechensk (Zhovti Vody) w zagłębiu górniczym Krzywy Róg na Ukrainie. Mineralizacja skandowa współwystępuje w tym obszarze z wystąpieniami uranu, wanadu i pierwiastków ziem rzadkich (Tarkha-

nov i in., 1992). Złożę udokumentowano w synklinie pociętej licznymi uskokami. Koncentrację skandu stwierdzono w strefie przemian metasomatycznych spowodowanych przepływem roztworów zasobnych w sól. Skały otoczenia – amfibolity i ferrokwarcyty – zostały silnie zmienione na skutek metasomatozy, w wyniku której powstała parageneza mineralna riebeckit–egiryn–amfibol alkaliczny–apatyt (Tarkhanov i in., 1992). Zawartość skandu zbadano w dwóch typach rudy: skandowo-wanadowej (100–200 g/t Sc, 50–120 g/t U, 400–500 g/t REE, 100–250 g/t Y, 2700 g/t V₂O₅, 150 g/t Hf) oraz skandowo-uranowej z pierwiastkami ziem rzadkich (50–100 g/t Sc, 150–600 g/t U, 600–1000 g/t REE, 20–500 g/t Y, 1700 g/t V₂O₅, 140 g/t Hf). Z badań w mikroobszarze mikrosondą elektronową wynika, że skand jest zawarty w egirynie i amfibolu alkalicznym, gdzie zastępuje jony Fe³⁺ (Tarkhanov i in., 1992).

W obwodzie murmańskim w Rosji oszacowano zasoby skandu w masywie karbonatytowo-ultramaficzno-alkalicznym Kovdor i analizowano opłacalność ich wydobywania (Kalashnikov i in., 2016). Dużą zawartość skandu w złożu Kovdor stwierdzono w baddeleyicie z kominów karbonatytowo-phoscorytowych (*phoscoryt* – skała ultramaficzna składająca się z magnetytu, apatytu i jednego z krzemionów: forsterytu, diopsydu lub flogopitu). Średnia zawartość skandu w baddeleyitach ze złoża Kovdor wynosi od 0,042% wag. Sc (phoscoryty apatytowo-magnetytowe) do 0,148% wag. Sc (karbonatyty). Poza baddeleyitem skand stwierdzono w minerałach z grupy juonniitu, pirochloru, zirconolitu i ilmenitu (Kalashnikov i in., 2016). Zasoby skandu w złożu oszacowano na 420 ton (Kalashnikov i in., 2016).

Przykładem złoża REE i skandu związanego z intruzją alkalicznych skał magmowych jest złożę Crater Lake w prowincji Quebec (Kanada). Intruzja składa się z: sjenitów, ferrosjenitów, piroksenitów, ferrosjenitów amfibolowych, ferrosjenitów oliwinowych i ferrosjenitów piroksenowych (Beland, Williams-Jones, 2023). Wysoką zawartość skandu i ΣREE stwierdzono w ferrosjenitach oliwinowych i piroksenowych. Zasoby złoża szacowane w kategorii *indicated* wynoszą 7,3 mln ton rudy o średniej zawartości 282 g/t Sc₂O₃ (ok. 184 g/t Sc), 65 g/t Dy₂O₃, 605 g/t La₂O₃, 595 g/t Nd₂O₃ i 160 g/t Pr₂O₃ (Beland, Williams-Jones, 2023). W raporcie zasobowym złoża Crater Lake nie określono granicznych parametrów kopaliny – parametry definiujące złożę i jego granice wytyczono na podstawie minimalnego parametru ekonomicznego, który wynosi 110 dolarów kanadyjskich/tonę. Mineralizację rozpoznano do głębokości 250 m p.p.t.

Systemem magmowo-hydrotermalnym wzbogaconym w skand jest obszar złożowy Erzgebirge–Cínovec (wschodnie Niemcy–zachodnie Czechy). W obszarze tym rozpoznano kilka złóż i wystąpień cyny oraz wolframu, w których kasyteryt i wolframit lokalnie zawierają znaczne ilości skandu (Kempe, Wolf, 2006). Na podstawie analiz mikrosondowych i kartowania geologicznego stwierdzono, że strefy kontaktu granitu topazowego ze zmetamorfizowanymi skałami otoczenia (grejzeny) zawierają kruszce Sn-W o zawartości skandu w zakresie 44–8800 g/t (wolframit), 5–10000 g/t (kasyteryt), 600–10300 g/t (cyrkon) oraz 31–3900 g/t (scheelit; Kempe, Wolf, 2006). Ważnymi nośnikami skandu w tym systemie są też cyrkon (do 2,5% wag. Sc₂O₃), minerały z grupy ixiolitu (do 5% wag. Sc₂O₃), minerały z grupy kolumbitu (do 3% wag. Sc₂O₃) oraz tyszczki – szereg siderofyllit–polilithionit i muskowit (Hreus

Tab. 1. Wybrane światowe złoża i wystąpienia skandu
Table 1. Selected global deposits and occurrences of scandium

Lokalizacja <i>Location</i>	Litologia <i>Lithology</i>	Zasoby geologiczne skandu [w kategorii rozpoznania], średnia zawartość Sc w złożu (minimalne parametry definiujące granice złoża) <i>Scandium resources [in the recognition category], average Sc content (cut-off grade criteria)</i>	Nośniki skandu <i>Scandium host</i>	Metale towarzyszące <i>Accompanying metals</i>	Źródło <i>Reference</i>
Kiviniemi Finlandia <i>Finland</i>	magmowe skały alkaliczne i maficzne <i>mafic and ultramafic crystalline rocks</i>	13,4 Mt śr. / av. 163 g/t Sc (40 g/t Sc)	amfibol / <i>amphibole</i> klinopiroksen <i>clinopyroxene</i> apatyt / <i>apatite</i>	Zr, Y	Halkoaho i in., 2020 Wang i in., 2021
Crater Lake Kanada <i>Canada</i>	magmowe skały alkaliczne i maficzne <i>mafic and ultramafic crystalline rocks</i>	7,3 Mt śr. / av. 282 g/t Sc (100 CAD\$/t)	klinopiroksen <i>clinopyroxene</i>	REE	Belland, Williams-Jones, 2023
Chelan USA	skały maficzne i ultramaficzne strefy subdukcji <i>subduction-zone mafic and ultramafic crystalline rocks</i>	brak zasobów <i>lack of resources</i> (61–97 g/t Sc)	klinopiroksen <i>clinopyroxene</i> amfibol <i>amphibole</i>	Ti, V, Cr	Dessimoz i in., 2012 Wang i in., 2021
Duke Island USA	skały maficzne i ultramaficzne strefy subdukcji <i>subduction-zone mafic and ultramafic crystalline rocks</i>	brak zasobów <i>lack of resources</i> (54–110 g/t Sc)	klinopiroksen <i>clinopyroxene</i> amfibol <i>amphibole</i>	brak danych <i>no data</i>	Wang i in., 2021
Wang Nam Khiao Tajlandia <i>Thailand</i>	hornblendyty i skały maficzne strefy subdukcji <i>subduction-zone hornblende and mafic crystalline rocks</i>	brak zasobów <i>lack of resources</i> (93–115 g/t Sc)	amfibol <i>amphibole</i>	brak danych <i>no data</i>	Wang i in., 2021
Dongwanzi Chiny <i>China</i>	skały maficzne i ultramaficzne strefy subdukcji <i>subduction-zone mafic and ultramafic crystalline rocks</i>	24,8 tys. ton Sc (65–99 g/t Sc)	amfibol <i>amphibole</i> klinopiroksen <i>clinopyroxene</i>	Ti, V	Xu i in., 2014 Wang i in., 2021
Gaositai Chiny <i>China</i>	skały maficzne i ultramaficzne strefy subdukcji <i>subduction-zone mafic and ultramafic crystalline rocks</i>	7,5 tys. ton Sc (88–108 g/t Sc)	klinopiroksen <i>clinopyroxene</i>	brak danych <i>no data</i>	Li i in., 2012
Flemington Australia	strefy wietrzenia skał maficznych – złoża laterytowe Ni-Co <i>Ni-Co saprolite ore related to ultramafic crystalline basement</i>	2,5 Mt [<i>measured</i>] śr. / av. 403 g/t Sc (300 g/t Sc)	zwietrzelina Fe-(Ni-Co) <i>Fe-(Ni-Co) saprolite</i>	Ni, Co	Huleatt, 2019
Sconi, Kokomo Australia	strefy wietrzenia skał maficznych – złoża laterytowe Ni-Co <i>Ni-Co saprolite ore related to ultramafic crystalline basement</i>	29,5 Mt [<i>measured, indicated and inferred</i>] śr. / av. 55 g/t Sc	zwietrzelina Fe-(Ni-Co) <i>Fe-(Ni-Co) saprolite</i>	Ni, Co	Huleatt, 2019
Nyngan Australia	strefy wietrzenia skał maficznych <i>weathering zone of mafic crystalline rocks</i>	5,7 Mt [<i>measured</i>] śr. / av. 256 g/t Sc (100 g/t Sc) 12,5 Mt [<i>indicated</i>] śr. / av. 225 g/t Sc (100 g/t Sc)	zwietrzelina żelazista skał maficznych <i>Fe-bearing mafic rock saprolite</i>	brak danych <i>no data</i>	Huleatt, 2019
Owendale Australia	strefy wietrzenia skał maficznych – złoża laterytowe Ni-Co <i>Ni-Co saprolite ore related to mafic crystalline basement</i>	7,8 Mt [<i>measured</i>] śr./av. 435 g/t Sc (300 g/t Sc) 12,5 Mt [<i>indicated</i>] śr. / av. 410 g/t Sc (300 g/t Sc)	zwietrzelina Fe-(Ni-Co) <i>Fe-(Ni-Co) saprolite</i>	Ni, Co, Pt	Huleatt, 2019
Sunrise Australia	strefy wietrzenia skał maficznych – złoża laterytowe Ni-Co <i>Ni-Co saprolite ore related to mafic crystalline basement</i>	68,8 Mt [<i>measured</i>] śr. / av. 62 g/t Sc	zwietrzelina Fe-(Ni-Co) <i>Fe-(Ni-Co) saprolite</i>	Ni, Co	Huleatt, 2019
Hurrlls Hill Australia	strefy wietrzenia skał maficznych – złoża laterytowe Ni-Co <i>Ni-Co saprolite ore related to mafic crystalline basement</i>	10,8 Mt [<i>indicated</i>] śr. / av. 41 g/t Sc	zwietrzelina Fe-(Ni-Co) <i>Fe-(Ni-Co) saprolite</i>	Ni, Co	Huleatt, 2019

i in., 2021). Szacuje się, że w rejonie Erzgebirge–Cínovec greizeny zawierające tlenki z domieszką skandu stanowią główne źródło tego pierwiastka (Hreus i in., 2021).

Dane naukowe na temat koncentracji skandu w pokrywach laterytowych powstałych z wietrzenia masywów ultrazasadowych są stosunkowo ubogie (Williams-Jones, Vasyukova, 2018; Ulrich i in., 2019; Wang i in., 2021). Informacji na temat tego rodzaju nagromadzeń skandu można szukać natomiast w raportach publikowanych przez firmy typu *junior* z branży poszukiwawczej, szczególnie z Australii.

W ostatnich latach firmy poszukiwawcze zaczęły publikować informacje o skandzie będącym pierwiastkiem towarzyszącym w złożach laterytowych Ni-Co. W artykule zaprezentowano podstawowe dane na temat wybranych projektów, w których są raportowane zasoby lub zawartość skandu. Ze względu na niewielkie znaczenie tego typu złóż w Polsce ograniczono się do 3 flagowych przykładów.

W australijskim stanie Queensland jest realizowany projekt SCONI mający na celu udokumentowanie i zagospodarowanie trzech niklowo-kobaltowych złóż laterytowych i saprolitowych zasobnych w skand: Lucknow, Kokomo i Greenvale. Złoża te powstały w wyniku wietrzenia skał perydotytowych, gabri i zmetamorfizowanych dajek maficznych. Osady laterytowe mają miąższość do 40 m. Sumaryczne zasoby wynoszą 75,7 mln ton rudy o średniej zawartości 40–55 g/t skandu, 0,6% niklu i 0,08% kobaltu, a zasoby skandu wynoszą ok. 3 tys. ton (Huleatt, 2019; Sustainable Mineral Institute, 2021).

Cenne informacje na temat skandu w złożach laterytowych pochodzą również z projektu Kalpini (Australia Zachodnia) spółki *Ardea Resources Ltd* (2017). W obszarze dokumentowania laterytowych rud Ni-Co bezpośrednio nad złożem Ni-Co stwierdzono w dwóch otworach znaczną zawartość skandu w interwale o miąższości 20 m i średniej zawartości 102 g/t Sc oraz w interwale 6 m miąższości, w którym średnia zawartość Sc wynosi 463 g/t. W profilach pozostałych otworów zawartość skandu wynosi od 50 do 65 g/t. Skałą macierzystą laterytów Ni-Co(Sc) są archaiczne kumulaty oliwinowe i ultramaficzne (Huleatt, 2019). Pokrywa laterytowa ma miąższość do 60 m i jest podzielona na dwie strefy – dolną magnezową i górną zasobną w żelazo, nikiel, kobalt i skand. Inne firmy działające w Australii Zachodniej raportują koncentracje skandu na poziomie 40–50 g/t, wydzielając strefy skandonośne w perspektywnych obszarach występowania laterytowych złóż Ni-Co (Conico Ltd., 2023).

Bardzo duże nagromadzenia skandu stwierdzono w utworach laterytowych obszaru Melrose (Nowa Południowa Walia, Australia wschodnia), w którym występują zwietrzałe skały zasadowe – piroksenity, dunity oraz gabry wzbogacone w platynę i skand (Huleatt, 2019). Miąższość pokrywy laterytowej jest niewielka – wynosi od 5 do 25 m. W profilu jednego z otworów wykonanych w celu udokumentowania laterytowej mineralizacji Ni-Co stwierdzono podwyższoną koncentrację skandu. W miejscu tym przewiercono interwał rudny o miąższości 21 m o średniej zawartości 0,11% wag. Ni; 0,07% wag. Co i 529 g/t Sc. Z obszarem Melrose graniczy złożo laterytowe Ni-Co-Sc Syerston o zasobach 162,7 mln ton rudy o średniej zawartości skandu na poziomie 79 g/t (Sunrise Energy Metals, 2024), co oznacza, że jest to jedno z największych na świecie złóż skandu.

W Australii są prowadzone także inne projekty poszukiwawcze Ni-Co±Sc, do których należą: Flemington, Holmesville, Nyngang, Owendale, Pacific Highway, Black Range, Goongarie, Kalpini, Mount Weld, Mulga Rock i Quicksilver. Większość poszukiwań jest prowadzona na obszarach występowania pokryw laterytowych wzbogaconych w Ni, Co, REE i lokalnie w Sc. Nie są to projekty nastawione wyłącznie na poszukiwanie i rozpoznawanie złóż skandu, a raczej na rozpoznanie zasobów niklu i kobaltu.

ŚWIATOWA PRODUKCJA SKANDU

Głównymi producentami skandu wytwarzanego jako produkt uboczny są: Chiny (ze złóż żelaza, REE, Ti i Zr), Kazachstan (ze złóż U), Filipiny (ze złóż Ni), Rosja (ze złóż apatyty i uranu) oraz Ukraina (ze złóż U). Największym eksporterem skandu są Chiny. Ich udział w światowym rynku tego metalu wynosi 67% (Carlo, Goodman, 2022; Salman i in., 2022; European Commission, 2023). Kraje europejskie nie mają własnych złóż skandu, toteż w 2017 r. w trzeciej wersji Listy Pierwiastków Krytycznych Komisji Europejskiej został on po raz pierwszy uznany za pierwiastek krytyczny (European Commission, 2017). W 2023 r. Komisja Europejska pozostawiła skand w grupie 34 pierwiastków krytycznych dla UE, choć nie zaliczyła go do materiałów strategicznych (European Commission, 2023).

Produkcja skandu jest procesem trudnym technologicznie, wymagającym zastosowania zaawansowanych procesów hydrometalurgicznych, obejmujących frakcjonowaną krystalizację soli i destylację chlorków, a także sublimację acetyloacetonianów. Powszechnie stosowany mechanizm ekstrakcji skandu polega na rozbięciu struktury materiałów zawierających skand poprzez ługowanie kwasem fluorowodorowym, co umożliwia przejście skandu do fazy ciekłej. Czysty skand otrzymuje się w procesie fluoryzacji jego tlenku (Sc_2O_3), a następnie wskutek redukcji kalciotermicznej fluorku skandu (ScF_3 ; Sverdrup, Sverdrup, 2024). Otrzymany produkt poddaje się stapianiu i destylacji w celu uzyskania skandu o strukturze dendrytycznej lub odlewanych sztabek skandu o czystości 99,9%.

Zawartość skandu w większości surowców zawierających ten pierwiastek jest jednak znikoma, a podczas procesu wzbogacania ługowaniu ulegają również zanieczyszczenia, takie jak Fe, Ti, Zr, Al i Si, co znacznie utrudnia późniejszy proces separacji skandu. Aby zwiększyć stężenie skandu w roztworze po ługowaniu, konieczne jest przeprowadzenie wielokrotnych etapów wzbogacania, co czyni produkcję kosztowną.

Drugim źródłem skandu jest odzysk tego pierwiastka z odpadów przemysłowych. W Europie przykładem takiego podejścia jest projekt *ScaVanger* (<https://www.scavanger.eu/index.html>), którego celem jest zagospodarowanie tlenku tytanu powstającego jako produkt uboczny w procesie wytwarzania pigmentów. W opracowanym procesie technologicznym otrzymuje się handlowe produkty w postaci tlenku skandu (Sc_2O_3) oraz fluorku skandu (ScF_3). W trakcie przeróbki odpadów jest możliwy odzysk także innych pierwiastków towarzyszących, takich jak niob i wanad.

Roczna światowa produkcja skandu metalicznego wynosi ok. 45 ton (Sverdrup, Sverdrup, 2024), a największa roczna produkcja (ok. 15 ton skandu metalicznego) pochodzi ze złoża Bayan Obo w Chinach (Wang i in., 2021). Szacuje się, że roczne zapotrzebowanie na skand

będzie w przyszłości wzrastać (Phoung i in., 2023). Rynek skandu jest obwarowany poufnością, a uzyskanie danych na temat produkcji tego metalu i handlu nim jest trudne. Pierwiastek ten nie jest uwzględniany na żadnej z dominujących giełd metali, a kontrakty pomiędzy producentami skandu i jego odbiorcami nie są publicznie dostępne. Głównymi eksporterami skandu do Unii Europejskiej są Chiny (z przemysłu dwutlenku tytanu i produkcji pierwiastków ziem rzadkich) oraz Filipiny, Kazachstan i Ukraina (z odpadów niklowo-laterytowych i odpadów z produkcji uranu).

Koszty produkcji skandu wynoszą w granicach od ok. 200 do 1500 USD/kg (Paulo, Krzak, 2015), a rynkowa cena skandu metalicznego w latach 2020–2024 była porównywalna do cen metali z grupy platynowców – wynosiła 230–270 tys. USD/kg (w latach wcześniejszych cena utrzymywała się na poziomie 185–210 tys. USD/kg). Z kolei ceny stopu Al-Sc wahały się w ostatnich latach od 340 do 360 USD/kg (Cordier, 2025).

WYSTĘPOWANIE SKANDU W POLSCE

Małe zainteresowanie skandem w przeszłości przekłada się na niewielką liczbę opracowań dotyczących geochemii tego pierwiastka w Polsce. Wyniki analiz skandu są dostępne w pojedynczych pracach z lat 70. i 80. XX w. oraz z II dekady XXI w., poświęconych weryfikacji wystąpień pierwiastków rzadkich i krytycznych (np. Mikulski i in., 2018; Mazurek i in., 2021). Z tego powodu możliwości występowania skandu w naszym kraju oceniono na podstawie literaturowych danych geochemicznych, geologicznych i tektonicznych o światowych złożach opisanych w tym artykule, wykorzystując także niewielkie zasoby rodzimych danych geochemicznych.

W granicach Polski wyróżniono 5 jednostek geologicznych, w których można się spodziewać podwyższonej zawartości skandu (ryc. 1):

1. Magmowe masywy maficzne i ultramaficzne związane z ofiolitem sudeckim (ryc. 2):

- Masyw Ślęży;
- strefa Kunów–Strzegomiany;
- masyw Jordanów Śląski;
- masyw Nowej Rudy.

2. Alkaliczny masyw karbonatytowy Tajna (w szczególności piroksenity i sienity piroksenowe – np. w profilach otworów Tajno IG-10 i Tajno IG-11).

3. Blok Gór Sowich – obszar występowania skał magmowych i metamorficznych kry gnejsowej Gór Sowich – w szczególności amfibolitów i piroksenitów oraz towarzyszących im pól pegmatytów.

4. Masyw serpentynitowy Szklar – strefy wietrzeń masywów maficznych i ultramaficznych związanych z laterytową mineralizacją Ni-Co.

5. Masyw gabrowo-serpentynitowy Kletna w masywie Śnieżnika – składający się m.in. z przeobrażonych skał maficznych.

Masywy maficzne i ultramaficzne związane z ofiolitem sudeckim

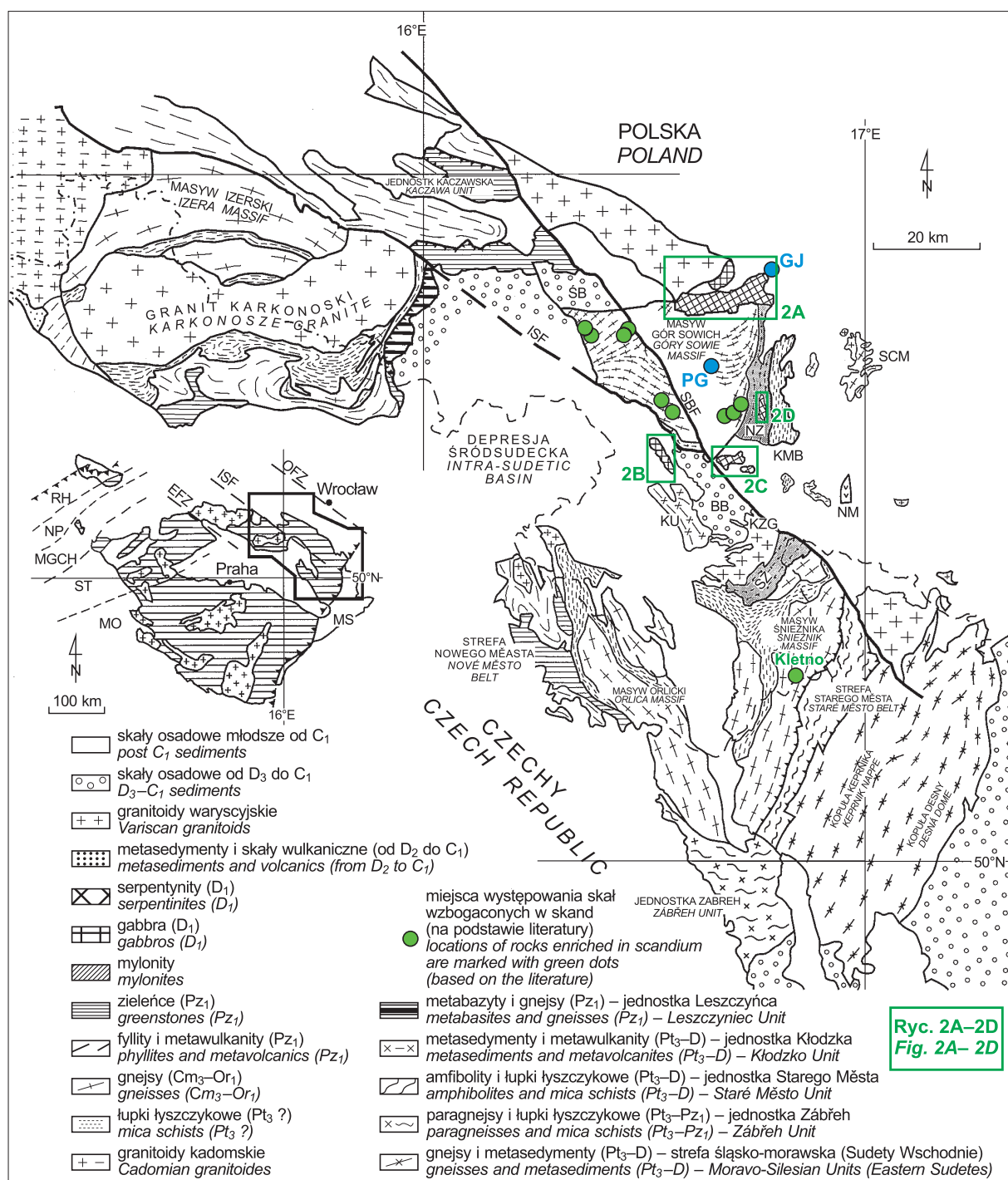
Dane o geochemii skandu w skałach ofiolitu sudeckiego są ubogie. Najwięcej informacji dotyczących nagromadzeń pierwiastków śladowych i krytycznych pochodzi z rejonu Ślęży i Kunowa. Bogatą bazę danych na temat

pierwiastków śladowych w ofiolicie sudeckim przedstawiono w pracy Floyda i in. (2002). Do badań genezy ofiolitu sudeckiego wykorzystano obszerne dane geochemiczne, jednak pierwiastki śladowe nie były rozpatrywane w kategoriach ekonomicznych. Zawartość skandu w analizowanych próbkach skał ultramaficznych masywu Ślęży wynosi od 14 do 118 g/t Sc. Badane gabra koncentrują skand w ilości od 8 do 129 g/t (najczęściej 35–55 g/t Sc). Zbadano również skały metawulkaniczne masywu Ślęży. Zawartość skandu w tych skałach jest lokalnie podwyższona – do 58 g/t Sc. Floyd i in. (2002) nie wskazali lokalizacji poboru próbek i nie skorelowali składu mineralnego z wynikami analiz chemicznych, trudno jest zatem stwierdzić, z czego wynika wysoka zawartość skandu w pojedynczych próbkach z masywu Ślęży. Wiadomo, że wybrane kumulatory ultramaficzne oraz niektóre rodzaje gabra mogą zawierać skand w ilości przekraczającej 120 g/t. Można zatem przypuszczać, że skand w tych skałach jest związany z klinopiroksenem, amfibolem, a być może też z ilmenitem, jednak potwierdzenie tego przypuszczenia wymaga dalszych analiz w mikroobszarze.

Wojtulek i in. (2019) wykazali, że sudeckie metagabra i gabra z mineralizacją magnetytowo-ilmenitową oraz gabra płonne z rejonu Ślęży są nieznacznie wzbogacone w skand. W ferrogabrach koncentracje skandu wahały się od 42 do 49 g/t Sc, natomiast w gabrach płonnych w przedziale 31–50 g/t Sc. W pracy tej przedstawiono wyniki analiz mikrosondą zawartości tlenków Fe-Ti i klinopiroksenów, niestety z pominięciem skandu. W przeciwieństwie do gabr, serpentynity z masywu Gogołów–Jordanów w rejonie Ślęży cechują się małą zawartością skandu – w zakresie od 7 do 11 g/t Sc (Wojtulek i in., 2019).

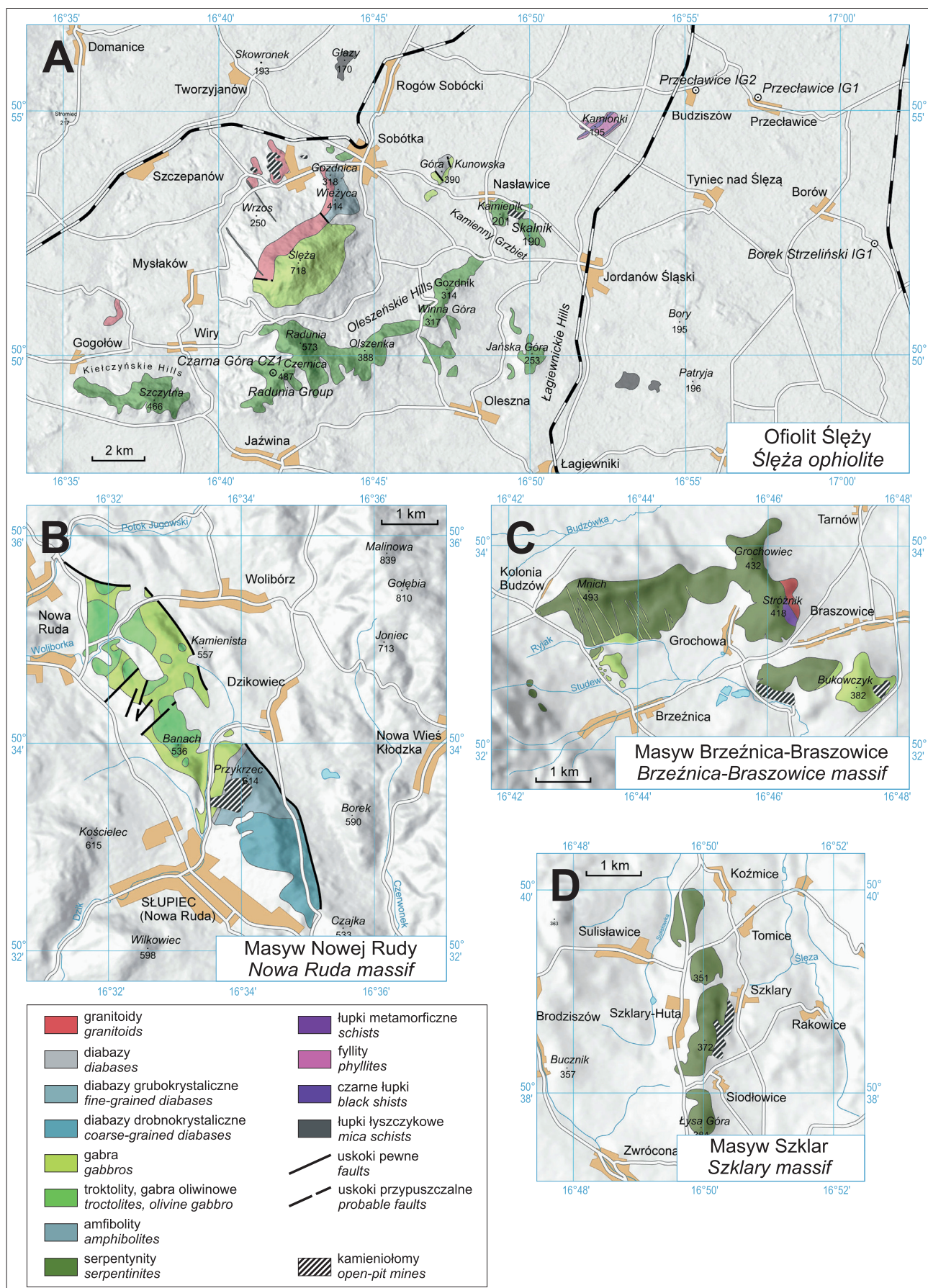
W toku realizacji projektu SEMACRET (<https://semacret.eu/>; Rosowiecka i in., 2025) pobrano próbki z masywu Ślęży oraz wycinki rdzeni z dwóch otworów wiertniczych (Kunów B-1 i Kunów B-2) wykonanych w obszarze złoża gabra Kunów. Zawartość skandu określono w 10 próbkach i stwierdzono, że jest ona relatywnie wysoka – waha się od 48 do 72 g/t Sc. Ta koncentracja skandu jest związana z gabraami zasobnymi w tytan (0,7–4,8% wag. TiO_2) i żelazo.

Ostatnio w pegmatytach granitowych przecinających amfibolity i serpentynity masywu Jordanowa Śląskiego rozpoznano minerały skandonośne z grupy epidotu (Pieczka i in., 2024a, b). Minerały te są zaliczane do grupy klinozoisytu, aktynolitu i epidotu. Zawierają do 9,54% Sc_2O_3 . Nowo zidentyfikowany minerał z grupy epidotu ze skandem otrzymał nazwę heflikit. W obszarze występowania pegmatytów w skałach amfibolitowych opisano także bogate w skand allanity, aktynolity i klinozoisyty (o zawartości Sc_2O_3 od 4,5 do 5,0%). Bardzo podobne paragenezy mineralne w analogicznych skałach stwierdzono w regionie Heftetjern–Telemark w Norwegii (Pieczka i in., 2024a). Dwie strefy leukokratyczne zawierające skand rozpoznane w odkrywcę Jordanów 1 na wschód od masywu Ślęży zapadają pod ostrym kątem i mają grubość 5 i 25 m (Pieczka i in., 2024a). Stwierdzono w nich charakterystyczną asocjację mineralną grossular–zoisyt–klinozoisyt–epidot–prehnit–diopsyd. Zarówno w najnowszych, jak i w starszych opracowaniach naukowych na temat rodingitów i amfibolitów masywu Jordanowa Śląskiego autorzy niestety ograniczyli się do analiz petrograficznych i mineralogicznych, bez zbadania składu chemicznego

Ryc. 2A–2D
Fig. 2A–2D

Ryc. 1. Lokalizacja masywów gabrowych oraz odsłonięć skał maficznych i ultramaficznych w województwie dolnośląskim na tle podziału geologicznego Sudetów (wg Aleksandrowskiego, Mazura, 2002): **BB** – basen Bardo; **EFZ** – strefa uskoku Łaby; **ISF** – uskók śródsudecki; **KMB** – kamieniecki pas metamorficzny; **KU** – jednostka metamorficzna Kłodzka; **KZG** – granit Kłodzko–Złoty Stok; **LG** – masyw granitoidów lużyckich; **MGCH** – średnioniemiecki poziom krystaliczny; **Mo** – strefa mołdawska; **OFZ** – strefa uskoku Odry; **RP** – strefa renohercyńska; **RT** – nasunięcie Ramazowej; **SB** – basen Świebodzie; **SBF** – sudecki uskók graniczny; **SCM** – masyw krystaliczny Strzelina; **ST** – strefa saksoturyńska; **SZ** – strefa ścinania Skrzynki. Stratygrafia: **Pt** – proterozoik; **Pz** – paleozoik; **Cm** – kambr; **Or** – ordowik; **D** – dewon; **C** – karbon. Obszary o znanej zawartości skandiu w maficznych i ultramaficznych skałach magmowych: **BG** – Bystrzyca Górna; **B-O** – Bielawa–Oleśnica; **GJ** – kamieniołom Gogołów–Jordanów; **PG** – Piława Górna

Fig. 1. Distribution of gabbro massifs and outcrops of mafic and ultramafic rocks in the Lower Silesia Voivodeship against the geological framework of the Sudetes (after Aleksandrowski, Mazur, 2002): **BB** – Bardo Basin; **EFZ** – Elbe Fault Zone; **ISF** – Intra Sudetic Fault; **KMB** – Kamieniec Metamorphic Belt; **KU** – Kłodzko Metamorphic Unit; **KZG** – Kłodzko–Złoty Stok Granite; **LG** – Lusitanian Granitoid Massif; **MGCH** – Mid-German Crystalline High; **Mo** – Moldanubian Zone; **OFZ** – Odra Fault Zone; **RP** – Rhenohercynian Zone; **RT** – Ramazova Thrust; **SB** – Świebodzie Basin; **SBF** – Sudetic Boundary Fault; **SCM** – Strzelin Crystalline Massif; **ST** – Saxothuringian Zone; **SZ** – Skrzynka Shear Zone. Stratigraphy: **Pt** – Proterozoic; **Pz** – Paleozoic; **Cm** – Cambrian; **Or** – Ordovician; **D** – Devonian; **C** – Carboniferous. Areas with known scandium content in mafic and ultramafic igneous rocks: **BG** – Bystrzyca Górna; **B-O** – Bielawa–Oleśnica; **GJ** – Gogołów–Jordanów quarry; **PG** – Piława Górna



Ryc. 2. Uproszczona mapa geologiczna ofiolitu sudeckiego: A – Masyw Ślęży; B – masyw Nowej Rudy; C – masyw Brzeźnica–Braszowice; D – masyw Szklar (zmodyfikowana za Wojtulek i in., 2022)

Fig. 2. Simplified geological map of the Sudetic ophiolite: A – Ślęza Massif; B – Nowa Ruda massif; C – Brzeźnica–Braszowice massif; D – Szklary massif (modified after Wojtulek et al., 2022)

skał, w szczególności koncentracji pierwiastków śladowych. Jedyna praca, w której określono koncentrację pierwiastków śladowych w rodingitach i łupkach metamorficznych z obszaru Jordanowa wskazuje, że są one ubogie w skand – zawierają od 1 do 5 g/t Sc (Dubieńska i in., 2004). Nieznana jest zawartość skandu w skałach leukokratycznych z granatami, a także w amfibolitach i serpentynitach regionu Nasławice–Jordanów Śląski. Słabo jest również rozpoznana zawartość skandu w minerałach akcesorycznych – granatach, cyrkonie i turmalinach.

Gabra i skały ultramaficzne masywu Nowej Rudy badano pod względem koncentracji pierwiastków głównych i śladowych w latach 80. XX w. (Borkowska, 1985). Skand nie był w tych badaniach istotnym przedmiotem zainteresowania, mimo że jego koncentracja w gabrach noworudzkich jest wyraźnie podwyższona. Obecność tego metalu stwierdzono w gabrach bezoliwinowych (130 g/t Sc) i oliwinowych (72 g/t Sc) ze wzgórza Kmiotek na SE od Woli-borza oraz w gabrach piroksenowych z Jugowa (65 g/t Sc). W pozostałych próbkach z masywu Nowej Rudy skand stwierdzono w ilości ok. 50 g/t. Skały masywu Nowej Rudy są jedynie nieznacznie wzbogacone w tytan, chrom i wanad (Borkowska, 1985). Wzbogacone w skand pirokseny (100–170 g/t Sc) pochodzą z próbek gabra piroksenowego (Jugów i Sokolec) oraz z troktolitów ze wzgórza Kmiotek.

Karbonatyty i alkaliczne skały magmowe masywu Tajna

Istnieje niewiele opracowań na temat koncentracji skandu w skałach alkalicznych masywu Tajna, którego strop znajduje się na głębokości 600 m (Ryka, 1992). Pojedyncze wyniki świadczą o tym, że lokalnie zawartość tego pierwiastka w masywie jest wysoka. Według Kubickiego (1992) średnia zawartość skandu w skałach masywu wynosi 120 g/t (towarzyszy jej znaczna koncentracja itru – na poziomie 540 g/t) – niestety autor nie zamieścił w pracy dokładnej charakterystyki litologicznej badanych próbek. Grabarczyk i in. (2022) oznaczyli niższą zawartość skandu w skałach tego masywu – w karbonatytach (1–3 g/t), piroksenitach alkalicznych (30–48 g/t) i w brekcji z klas-tami karbonatytowymi (15 g/t Sc). Wyjaśnienie tak dużych różnic wymaga dalszej analizy.

Blok Gór Sowich

Blok Gór Sowich, w przeważającej części gnejsowy i migmatytowy, zawiera także soczewy oraz ciała skał maficznych i ultramaficznych (Kryza, Pin, 2002). Skały te są określane jako metagabronoryty, amfibolity piroksenowe oraz hiperyty, tj. dwupiroksenowe gabra (Kryza, Pin, 2002), i interpretowane jako intruzje postorogeniczne (Morawski, 1973) lub element ofiolitu sudeckiego (Gunia, 2002). Spośród wymienionych typów skał maficznych godne zainteresowania są hiperyty i metagabronoryty, udokumentowane w centralnej i północnej części bloku Gór Sowich w postaci kilku intruzji (kilkadziesiąt–kilkaset metrów miąższości) ograniczonych uskoki. Kryza i Pin (2002) przedstawili wyniki analiz litogeochemicznych utworów maficznych bloku sowiogórskiego. Skały te mają podwyższoną zawartość skandu – w przedziale od 21 do 71 g/t Sc. Trzy próbki wzbogacone w skand (44, 49 i 71 g/t)

pobrano z okolic Bystrzycy Górnej oraz z intruzji maficznej na zachód od Zagórza Śląskiego (ryc. 2). Skały te odsłaniają się na powierzchni i były rozpoznane na szczegółowych mapach geologicznych Sudetów (Cymerman, 2026).

Masyw serpentynitowy Szklar

W masywie serpentynitowym Szklar istnieją strefy wietrzenia skał ultrazasadowych, w których stwierdzono saprolitowe złoża niklu. W ramach weryfikacji występowania pierwiastków rzadkich i krytycznych w Polsce Mikulski i in. (2018) określili koncentrację skandu w tym masywie. Jego zawartość w analizowanych próbkach mieściła się w zakresie od 2 do 40 g/t Sc – średnia arytmetyczna wynosiła 17 g/t, czyli generalnie była niska (Mikulski i in., 2018). Mimo tego uznano, że ekonomicznie interesująca jest koncentracja powyżej 15 g/t skandu (Mikulski i in., 2018). W dokumentacji geologicznej złoża rud niklu Szklary-I KGHM *Polska Miedź S.A.* przedstawił wyniki ponad 1000 analiz chemicznych (ACME Labs) skandu z rdzeni 54 otworów rozpoznawczych i 3 profili bruzdowych (Kwaśny, 2013). Z pełnych analiz chemicznych próbek wynika, że zawartość skandu w złożu Szklary-I jest niska, w zakresie 5–20 g/t, i w związku z tym należy uznać, że lokalizacja ta nie jest prognostyczna (Kwaśny, 2013).

Masyw gabrowo-serpentynitowy Kletna

Potencjalnym miejscem występowania skał wzbogaconych w skand jest masyw gabrowo-serpentynitowy Kletna w Masywie Śnieżnika (Gil i in., 2019). Stosunkowo niedawno ujawnione odsłonięcia przeobrażonych skał maficznych (metagabra, amfibolity, metadiabazy, łupki tal-kowe, serpentynity) znajdują się w kompleksie zmetamorfizowanych skał osadowych tzw. formacji strońskiej w Sudetach Środkowych. Skały zasadowe tworzą tam soczewy niewielkich rozmiarów (100–500 m długości). Wyróżniają się wśród nich hornblendyty zmineralizowane tlenkami Fe-Ti z domieszką wanadu (Gil i in., 2019). W rejonie Kletna zainteresowanie budzą hornblendyty, gdyż w trzech ich próbkach zawartość skandu stwierdzono w ilości 48, 60 i 82 g/t. Skały te cechują się również podwyższoną koncentracją wanadu (765–2055 g/t V) i tytanu (0,91–3,42% wag. Ti). Co ciekawe, współwystępujące z hornblendytami serpentynity są wzbogacone w nikiel (0,17–0,19% wag. Ni) i zawierają chrom (2000–2500 g/t Cr; Gil i in., 2019). Hornblendyty są interpretowane jako zmetamorfizowane ferrogabra.

KRYTERIA PROPONOWANE DO WYZNACZANIA OBSZARÓW PERSPEKTYWICZNYCH SKANDU W POLSCE

W Polsce nie udokumentowano dotychczas złóż skandu i dlatego w krajowym prawie nie wyznaczono kryteriów definiujących złoża skandu i jego granice. Kryteria proponowane w niniejszym opracowaniu mogą zatem stanowić jedynie wstępną propozycję, która w przypadku lepszego rozpoznania wystąpień skandu powinna zostać zweryfikowana. Kwerenda danych literaturowych dotyczących skandu w Polsce pozwoliła na wydzielenie kilku

obszarów perspektywicznych jego występowania (tab. 2). W obszarach tych skand nie może być traktowany jako kopalina główna. Jego podwyższoną koncentrację należy rozpatrywać w kontekście współwystępowania z innymi

metalami – na przykład tytanem i wanadem w skałach maficznych i ultramaficznych lub pierwiastkami ziem rzadkich i fluorem w intruzjach alkalicznych. Na obecnym etapie prac autorzy niniejszego opracowania nie podejmują

Tab. 2. Jednostki geologiczne perspektywiczne pod względem występowania skandu w Polsce
Table 2. Prospective geological units in terms of scandium occurrence in Poland

Jednostka geologiczna <i>Geological unit</i>	Charakterystyka geologiczna <i>Geological characterization</i>	Proponowana głębokość rozpoznania [m] <i>Proposed prospecting depth [m]</i>	Zawartość skandu <i>Scandium concentrations</i>		Inne pierwiastki lub też kopaliny <i>Accompanying raw materials or elements</i>	Źródło <i>Reference</i>
			w skałach <i>in rocks</i>	w minerałach <i>in minerals</i>		
Masyw Śleży i strefa Kunów–Strzegomiany <i>Śleża Massif and Kunów–Strzegomiany zone</i>	masyw ofiolitowy związany z orogেনem waryscyjskim (~402–405 Ma) litologia: gabra, serpentynity, amfibolity, granity <i>Variscan orogeny ophiolite massif (~402–405 Ma)</i> <i>lithology: gabbro, serpentinite, amphibolite, granite</i>	0–200	skały ultramaficzne <i>ultramafic rocks:</i> 14–118 g/t Sc gabra / <i>gabbro:</i> 8–129 g/t Sc maficzne skały wulkaniczne <i>mafic volcanic rocks:</i> <59 g/t Sc serpentynity <i>serpentinite:</i> 7–11 g/t Sc	brak danych <i>no data</i>	Ti, V, Fe	Floyd i in., 2002 Wojtulek i in., 2019 Rosowiecka i in., 2025
Masyw Jordanowa Śląskiego <i>Jordanów Śląski massif</i>	masyw ofiolitowy związany z orogেনem waryscyjskim (~402–405 Ma) litologia: serpentynity, amfibolity, żyły magnezytowe, żyły rodingitowe, nefryty, pegmatyty <i>Variscan orogeny ophiolite massif (~402–405 Ma)</i> <i>lithology: serpentinite, amphibolite, magnetite veins, rodingite veins, nephrite, pegmatite</i>	0–200	rodingity i łupki metamorficzne <i>rodingites and metamorphic schists:</i> 1–5 g/t Sc	bogate w skand allanity, aktynolity i klinozoisyty <i>scandium-rich allanites, actinolites and clinzoisites</i> (4,5–5,0% Sc ₂ O ₃) skandonośne minerały z grupy epidotu <i>scandinavian minerals from the epidote group</i> (do 9,54% Sc ₂ O ₃) heflikit / <i>heflikite</i>	Mg	Dubińska i in., 2004 Piecza i in., 2024a Piecza i in., 2024b
Masyw Nowej Rudy <i>Nowa Ruda massif</i>	masyw ofiolitowy związany z orogেনem waryscyjskim (~402–405 Ma) litologia: gabra, diabazy, troktolity, żyły kalcytowe, serpentynity, piroksenity <i>Variscan orogeny ophiolite massif (~402–405 Ma)</i> <i>lithology: gabbro, diabase, troctolite, calcite veins, serpentinite, pyroxenite</i>	0–200	gabra <i>gabbro:</i> 50–130 g/t Sc piroksenity <i>pyroxenite:</i> 65 g/t Sc	piroksen / <i>pyroxen:</i> 100–170 g/t Sc	V, Ti, Fe, Cr	Borkowska, 1985
Masyw Tajna <i>Tajno massif</i>	masyw alkaliczno-ultramaficzny wieku karbońskiego (~348 Ma); litologia: amfibolity, karbonatyty, piroksenity, syenity, zwietrzelina skał alkalicznych <i>Carboniferous alkaline-ultramafic massif (~348 Ma)</i> <i>lithology: amphibolite, carbonate, pyroxenite, syenite, alkaline rocks saprolite</i>	500–1800	piroskenity alkaliczne <i>alkaline pyroxenites:</i> 30–48 g/t Sc w skale / <i>in rock</i> 120 g/t Sc	brak danych <i>no data</i>	REE, F, Ti	Grabarczyk i in., 2022 Kubicki, 1992

się wskazania minimalnej zawartości ekwiwalentnej skandu oraz minimalnego tonażu złoża. Proponowane jest rozpatrywanie parametrów definiujących złoża kopaliny

głównej i jego granic oraz ewentualne szacowanie zasobów skandu jako kopaliny towarzyszącej, zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 1 lipca 2025 r.

Tab. 2. Jednostki geologiczne perspektywiczne pod względem występowania skandu w Polsce – cd.

Table 2. Prospective geological units in terms of scandium occurrence in Poland – cont.

Jednostka geologiczna <i>Geological unit</i>	Charakterystyka geologiczna <i>Geological characterization</i>	Proponowana głębokość rozpoznania [m] <i>Proposed prospecting depth [m]</i>	Zawartość skandu <i>Scandium concentrations</i>		Inne pierwiastki lub też kopaliny <i>Accompanying raw materials or elements</i>	Źródło <i>Reference</i>
			w skałach <i>in rocks</i>	w minerałach <i>in minerals</i>		
Blok Gór Sowich – intruzje maficzne i ultramaficzne <i>Góry Sowie block</i> – mafic and ultramafic intrusions	intruzje maficzne i ultramaficzne w metamorficznym bloku Gór Sowich – część północna i centralna litologia: metagabronoryty, amfibolity piroksenowe i hiperyty <i>mafic and ultramafic intrusions within metamorphic Góry Sowie block – northern and central part</i> litology: meta-gabbro, pyroxene amphibolite	0–200	gabra i hiperyty <i>gabbro and hyperites</i> : 21–71 g/t Sc	brak danych <i>no data</i>	brak danych <i>no data</i>	Kryza, Pin., 2002
Blok Gór Sowich – pegmatyty (Pilawa Górna) <i>Góry Sowie block</i> – pegmatites (Pilawa Górna)	soczewy i dajki pegmatytowe (383–370 Ma i 370 ± 4 Ma) w gnejsach, granulitach i migmatytach bloku Gór Sowich litologia: pegmatyty, amfibolity, migmatyty, gnejsy 383–370 Ma i 370 ± 4 Ma <i>pegmatite lenses and dikes within Góry Sowie gneiss, granulite and migmatite</i> litology: pegmatite, amphibolite, migmatite, gneiss	0–200	brak danych <i>no data</i>	kolumbit <i>columbite</i> : 0,08–0,27% Sc ₂ O ₃ iksjolit, ferrowodginit: <i>ixiolite, ferrowodginite</i> : 0,06–1,00% Sc ₂ O ₃ pirochlor <i>pyrochlore</i> : 0,00–0,12% Sc ₂ O ₃ granat / garnet: <0,23%Sc ₂ O ₃	skaleń <i>feldspar</i> , Nb, Ta, Li	Pieczka i in., 2024a
Masyw serpentynitowy Szklar – złoża niklu Szklary-I <i>Szklary serpentinite massif</i> – Szklary-I nickel deposit	strefa wietrzenia skał ultramaficznych orogenu waryscyjskiego w klimacie subtropikalnym (paleogen–neogen) litologia: rudy tlenkowe i krzemianowe Ni-Co, serpentynity, dunity, harzburgity, ilherzolity, lamprofiry, aplity, gnejsy <i>Paleogene–Neogene weathering zone of Variscan orogen ultramafic rocks</i> litology: Ni-Co saprolite ore, serpentinite, dunite, harzburgite, lherzolite, lamprophyre, aplite, gneiss	0–200	rud Ni-Co <i>Ni-Co ore</i> : 2–41 g/t Sc (PIG-PIB) <15 g/t Sc (KGHM)	brak danych <i>no data</i>	Ni, Co	Mikulski i in., 2018 Kwaśny, 2013
Masyw Kletna <i>Kletno massif</i>	zmetamorfizowane soczewy gabrowo-serpentynitowe w Masywie Śnieżnika litologia: metagabra, amfibolity, hornblendyty, metadiabazy, łupki talkowe, serpentynity <i>metamorphosed gabbro-norite-serpentinite lenses within the Śnieżnik massif</i> litology: meta-gabbro, amphibolite, hornblende, meta-diabase, talc schist, serpentinite	0–200	hornblendyty <i>hornblendites</i> : 48–82 g/t Sc	brak danych <i>no data</i>	V, Ti, Fe (Ni, Cr)	Gil i in., 2019

w sprawie dokumentacji geologicznej złoża kopaliny, z wyłączeniem złoża węglowodorów (Rozporządzenie, 2015).

OBSZARY PERSPEKTYWICZNE POD WZGLĘDEM WYSTĘPOWANIA SKANDU W POLSCE

Porównując dane geochemiczne na temat wystąpień skandu w Polsce oraz dane uzyskane ze złóż, gdzie skand jest wydobywany jako składnik towarzyszący, a także obszarów perspektywicznych występowania skandu na świecie, można wyciągnąć następujące wnioski:

1) W masywach maficznych i ultramaficznych związanych z ofiolitem sudeckim zawartość skandu jest porównywalna do koncentracji skandu w gabrach, piroksenitach i skałach ultramaficznych stref subdukcji, które przez Wanga i in. (2021) zostały uznane za perspektywiczne. W Polsce pod względem pozyskania skandu jako perspektywiczne można wytypować następujące obszary:

- Masyw Ślęży;
- strefa Kunów–Strzegomiany;
- masyw Jordanowa Śląskiego;
- masyw Nowej Rudy;
- masyw serpentynitowy Kletna.

2) W polskich złożach tlenkowych i krzemianowych niklu (np. Szklary-I) zawartość skandu jest bardzo niska w porównaniu z australijskimi złożami niklu i kobaltu typu laterytowego i nie należy uznawać tych złóż za perspektywiczne. Mimo to należy sprawdzić, czy występuje podwyższona koncentracja skandu bezpośrednio nad złożem niklu (tak, jak ma to miejsce w analogicznych typach złóż w Australii).

3) Zawartość skandu w masywie Tajna jest niższa niż w analogicznych kompleksach magmowych dokumentowanych za granicą, dlatego tę jednostkę geologiczną należy uznać za mającą niewielkie znaczenie złożowe, które obniża także duża głębokość stropu skał krystalicznych i trudna do przewidzenia możliwość eksploatacji rud karbonatowych. Weryfikacja tej opinii będzie możliwa poprzez szczegółowe zbadanie piroksenitów i ijolitów składających się z piroksenów mogących zawierać znaczne ilości skandu. Szczególnie interesujący wydaje się rejon spenetrowany otworami Tajno IG-10 i Tajno IG-11, w profilach których na głębokości 700–1200 m p.p.t. stwierdzono intruzję piroksenitowo-sjenitową i piroksenitową.

4) Obszar centralnej i wschodniej części bloku Gór Sowich (rejon Piławy Górnej) pod względem metalogenicznym jest podobny do obszaru Tordal w Norwegii, gdzie lokalnie wysoką koncentrację skandu rozpoznano w pegmatytach granatonośnych w skałach amfibolitowych. Z kolei minerały bogate w skand (heflikit, skandonośne allanity i epidoty) udokumentowano w rejonie Jordanowa Śląskiego, co pozwala na porównanie tej paragenezy z obecną w regionie Heftejern–Telemark w Norwegii. Za obszary perspektywiczne w bloku Gór Sowich, mogące być istotnymi poligonami badawczymi do określenia geochemii skandu w skałach magmowych, należy uznać:

- intruzje maficzne i ultramaficzne centralnej oraz północnej części bloku Gór Sowich;
- rejon Piławy Górnej.

Koncentrację skandu w minerałach skałotwórczych stwierdzono jedynie w: skałach masywu suwalskiego, pegmatytach z rejonu Piławy Górnej oraz amfibolitach i peg-

matytach Jordanowa Śląskiego. W pozostałych obszarach nie wykryto obiecujących ilości skandu w minerałach skandonośnych: amfibolach, klinopiroksenach, granatach, tlenkach Fe-Ti czy minerałach akcesorycznych, takich jak baddeleyit, łyszczyki, kasyteryt i wolframit. Dla oceny perspektywiczności skandu w Polsce oraz precyzyjnego zidentyfikowania jego nośników kluczowe będzie zbadanie koncentracji skandu nie tylko za pomocą analiz litogeochemicznych, ale także w mikroobszarze.

Liczne dane literaturowe, szczególnie dotyczące masywów maficznych i ultramaficznych Dolnego Śląska, wydają się obiecujące (zawartość skandu powyżej 75 g/t), jednak duże rozbieżności w danych uzyskanych na przestrzeni wielu lat wymuszają ponowne przeanalizowanie koncentracji tego pierwiastka w wybranych obszarach w sposób usystematyzowany i z zastosowaniem nowoczesnych metod analitycznych.

Należy również wspomnieć o dwóch innych obszarach, w których można się spodziewać minerałów skandonośnych i skał wzbogaconych w skand, nie wymienionych w niniejszym artykule. Są to strefy metasomatozy w masywach granitowych bloku przedsudeckiego oraz skarny i grejzeny towarzyszące intruzjom magmowym w strefie małopolskiej. Oba obszary nie zostały ujęte w Krajowym Planie Poszukiwań Surowców Krytycznych. Zrezygnowano z ich szczegółowego scharakteryzowania przede wszystkim z powodu bardzo ograniczonej liczby danych geochemicznych i występowania stref mineralizacji w postaci izolowanych, rozproszonych ciał, trudnych do rozpoznania. Pomimo tego autorzy niniejszego tekstu rekomendują przeprowadzenie analizy koncentracji skandu w skałach i minerałach obu obszarów przy okazji poszukiwań innych surowców.

ZAKRES PRAC SUGEROWANY W CELU ROZPOZNANIA WYSTĄPIEŃ SKANDU W POLSCE

W celu precyzyjnego rozpoznania potencjału występowania skandu w Polsce konieczne będzie w pierwszej kolejności sprofilowanie materiału rdzeniowego z dostępnych otworów wiertniczych oraz pobór próbek z naturalnych odsłonień w wytypowanych obszarach badawczych. Najważniejszymi zadaniami będą: określenie koncentracji i zmienności geochemicznej skandu, a następnie przeprowadzenie studium petrograficzno-mineralogicznego w badanych utworach skalnych. Szczególną uwagę należy poświęcić skałom zawierającym pirokseny, amfibole i granaty, a także utworom zawierającym mineralizację tlenkową typu Fe-Ti-V oraz lokalnie polimetaliczną mineralizację siarczkową lub tlenkowo-krzemianową Cu-Ni-Co. Taka analiza pozwoli wyznaczyć lokalizacje najbardziej obiecujące pod względem koncentracji skandu w skałach. Proponowane metody prospekcyjne:

- kartowanie geologiczno-złożowe w miejscach, gdzie są obecne naturalne wychodnie skał lub w odkrywkach górniczych;
- zastosowanie metod geofizycznych w celu zbadania zmienności parametrów skał podłoża i ich nadkładu – takich jak podatność magnetyczna, gęstość i oporność;

- analityka geochemiczna (analizy litogeochemiczne próbek skalnych pozyskanych podczas kartowania geologiczno-złożowego);
- obserwacje mikroskopowe w świetle odbitym i przechodzącym;
- badania geochemiczne w mikroobszarze – mikroskop skaningowy;
- badania geochemiczne w mikroobszarze – mikrosonda elektronowa;
- badania geochemiczne w mikroobszarze – ablacja laserowa (w celu określenia domieszek, np. w minerałach kruszcowych, tlenkowych i skałotwórczych).

Następnym etapem rozpoznania surowcowego powinno być wykonanie pojedynczych otworów badawczych (wiercenia o głębokości do 200 m) w najbardziej perspektywicznych lokalizacjach i szczegółowe zbadanie materiału rdzeniowego. Do rozpoznania, w tym wiertniczego, autorzy artykułu rekomendują: Masyw Ślęży, strefę Kunów–Strzegomiany, masyw Jordanowa Śląskiego, blok Gór Sowich (rejon występowania skał maficznych i pegmatytów) oraz masyw Kletna, przy czym są zdania, że masyw Tajna należy traktować jako poligon badawczy – sugeruje się wykonanie analiz chemicznych dostępnego materiału rdzeniowego celem rozpoznania zawartości skandu w poszczególnych typach skał magmowych i w pokrywie zwietrzelinowej oraz identyfikację głównych nośników skandu.

PODSUMOWANIE

Analiza danych geochemicznych, mineralogicznych i surowcowych dotyczących skandu w Polsce i na świecie prowadzi do wniosku, że potencjalne obszary o podwyższonej zawartości tego pierwiastka w Polsce ograniczają się do Sudetów i masywu Tajna. W porównaniu do zagranicznych złóż kopalin stałych, będących obecnie głównym źródłem skandu, możliwości udokumentowania znaczących zasobów tego metalu w Polsce są oceniane jako małe, przy czym największy potencjał występowania wykazuje blok Gór Sowich i przylegające do niego fragmenty ofiolitu sudeckiego, w tym obszary Kunów–Strzegomiany, Jordanów Śląski–Naławice, Piława Górna oraz centralna i północna część bloku Gór Sowich. We wszystkich wymienionych obszarach skand należy traktować jako kopalinę towarzyszącą innym surowcom – rudom Fe-Ti±V (ofiolit sudecki) lub rudom pierwiastków ziem rzadkich (masyw Tajna). Plany ewentualnych, szerzej zakrojonych poszukiwań skandu będą uzależnione od parametrów jakościowych, zasobów i możliwości zagospodarowania kopaliny głównej. Proponowany w niniejszym artykule zakres badań jest, zdaniem autorów, wystarczający do usystematyzowania wiedzy na temat geochemii tego pierwiastka oraz przeprowadzenia pierwszego w historii, zintegrowanego, regionalnego programu rozpoznania perspektyw surowcowych skandu w Polsce.

Autorzy dziękują dwóm anonimowym Recenzentom za uwagi, które przyczyniły się do poprawy jakości tekstu. Podziękowania kierują także do prof. S. Oszczepalskiego za wnikliwą ocenę pracy oraz do dr. hab. Ł. Kruszeńskiego za pomoc w zakresie nomenklatury minerałów skandonośnych. Niniejsza publikacja została opracowana w ramach realizacji Krajowego Programu Poszukiwań Surowców Krytycznych.

LITERATURA

- ALEKSANDROWSKI P., MAZUR S. 2002 – Collage tectonics in the northeasternmost part of the Variscan Belt: the Sudetes, Bohemian Massif. Geological Society, London, Special Publications, 201: 237–277.
- ARDEA Resources Ltd. ASX Media Release 2017 – Kalpini drill results highlight cobalt-nickel mineralization, and scandium discovery. Ardea Resources Ltd. West Perth, Australia.
- BELAND C.M.J., WILLIAMS-JONES A.E. 2023 – The genesis of a potential scandium ore deposit at Crater Lake, Canada. *Chemical Geology*, 615: 121223.
- BORKOWSKA M. 1985 – Skały gabrowe masywu Nowej Rudy w Sudetach i ich minerały. *Geologia Sudetica*, 20 (1): 3–35.
- CARLO S., GOODMAN S. 2022 – Russia and Scandium's Scant Scale. U.S. International Trade Commission, Executive Briefings on Trade, June 2022; chrome-extension://efaidnbmnmmnnpbpcjpcglciefndmkaj-/https://www.usitc.gov/publications/332/executive_briefings/ebot_russia_and_scandium_scant_scale.pdf
- CONICO Ltd ASX Announcement. 2023 – Outstanding cobalt, nickel and scandium results. Conico Ltd., Perth, Australia.
- CORDIER D.J. 2025 – Scandium. USGS Mineral Commodity Summaries: 156–157.
- CYMERMAN Z. 2026 – Geological mapping of the Wielka Sowa mountain range (Sowie Góry Metamorphic Complex). *Prz. Geol.*, 74: 368–374.
- DESSIMOZ M., MÜNTENER O., ULMER P. 2012 – A case for hornblende dominated fractionation of arc magmas: The Chelan Complex (Washington Cascades). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 163 (4): 567–589.
- DUBIŃSKA E., BYLINA P., KOZŁOWSKI A., DÖRR W., NEJBERT K., SCHASTOK J., KULICKI C. 2004 – U–Pb dating of serpentinization: Hydrothermal zircon from a metasomatic rodingite shell (Sudetic ophiolite, SW Poland). *Chemical Geology*, 203: 183–203.
- EUROPEAN Commission 2017 – Third list of CRMs. European Commission, Brussels.
- EUROPEAN Commission 2023 – Study on the critical raw materials for the EU 2023 – final report; https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/study-critical-raw-materials-eu-2023-final-report_en
- FLOYD P.A., KRYZA R., CROWLEY Q.G., WINCHESTER J.A., ABDEL WAHED M. 2002 – Ślęża ophiolite: geochemical features and relationship to Lower Paleozoic rift magmatism in the Bohemian Massif. [W:] Winchester J.A., Pharoah T.C., Verniers J. (red.), *Paleozoic Amalgamation of Central Europe*. Geological Society London, Special Publications, 201: 197–215.
- GIL G., GUNIA P., BARNES J.D., SZYMAŃSKI M., JAKUBAUSKAS P., KALBARCZYK-GIL A., BAGIŃSKI B. 2019 – Origin of Talc and Fe-Ti-V Mineralization in the Kletno Deposit (the Śnieżnik Massif, SW Poland). *Minerals*, 2020, 10 (1): 13.
- GRABARCZYK A., GIL G., LIU Y., KOTOWSKI J., JAKUBAUSKAS P., BARNES J.D., NEJBERT K., WISZNIEWSKA J., BAGIŃSKI B. 2022 – Ultramafic-alkaline-carbonatite Tajno intrusion in NE Poland: A new hypothesis about the massif formation and related mineralization. *Ore Geology Reviews*, 143: 104772.
- GUNIA P. 2002 – The petrology and geochemistry of mantle-derived basic and ultrabasic rocks from the Szklary massif in the Fore-Sudetic Block (SW Poland). *Geologia Sudetica*, 33 (2): 71–83.
- HALKOAHO T., AHVEN M., RÄMÖ O.T., HOKKA J., HUUMA H. 2020 – Petrography, geochemistry, and geochronology of the Sc-enriched Kiviniemi ferrodiorite intrusion, eastern Finland. *Mineralium Deposita*, 55: 1561–1580.
- HREUS S., VÝRAVSKÝ J., CEMPÍREK J., BREITER K., VAŠINOVÁ GALIOVÁ M., KRÁTKÝ O., ŠEŠULKA V., ŠKODA R. 2021 – Scandium distribution in the world-class Li-Sn-W Činovec greisen-type deposit: Result of a complex magmatic to hydrothermal evolution, implications for scandium valorization. *Ore Geology Reviews*, 139: 104433. <https://semacret.eu>
- <https://www.scavanger.eu/index.html>
- HULEATT M.B. 2019 – Australian Resource Reviews: Rare Earth Elements 2019. Geoscience, Australia, Canberra: 11.
- KALASHNIKOV A.O., YAKOVENCHUK V.N., PAKHOMOVSKY Y.A., BAZAI A.V., SOKHAREV V.A., KONPLEVA N.G., MIKHAILKOVA J.A., GORYAINOV P.M., IVANYUK G.Y. 2016 – Scandium of the Kovdor baddeleyite-apatite-magnetite deposit (Murmansk Region, Russia): Mineralogy, spatial distribution, and potential reserves. *Ore Geology Reviews*, 72: 532–537.
- KEMPE U., WOLF D. 2006 – Anomalously high Sc contents in ore minerals from Sn–W deposits: Possible economic significance and genetic implications. *Ore Geology Reviews*, 28: 103–122.
- KRYZA R., PIN C. 2002 – Mafic rocks in a deep-crustal segment of the Variscides (the Góry Sowie, SW Poland): evidence for crustal contamination.

- tion in an extensional setting. *International Journal of Earth Sciences*, 91: 1017–1029.
- KUBICKI S. 1992 – Zarys budowy geologicznej masywu Tajna. *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, 139: 7–13.
- KWAŚNY L. 2013 – Dokumentacja geologiczna złoża rud niklu „Szklary I” w kat. C1 w miejsc. Szklary, Tomice, gmina Ząbkowice Śląskie, Ciepłowody, powiat ząbkowicki, woj. dolnośląskie. KGHM Polska Miedź S.A., Lubin.
- LIU S.-L., LIU X., FAN H.-R., BUTCHER A.R., LAHAYE Y., MICHALLIK R.M., JOLIS E.M., LUKKARI S., YANG K.-F., WANG Q.-W., QIU Z.-J., SHE H.-D. 2025 – Scandium distribution in the Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, China: a multi-scale geochemical perspective. *Ore Geology Reviews*, 177: 106466.
- MAZUREK S., ROSZKOWSKA-REMIN J., SZAMAŁEK K., TYMIŃSKI M., MALON A. 2021 – Surowce mineralne deficytowe dla polskiej gospodarki. *Przegląd Geologiczny*, 69 (5): 273–286.
- MIKULSKI S.Z. 2025 – Główne formacje metalogeniczne w Polsce pod kątem występowania pierwiastków krytycznych. *Przegląd Geologiczny*, 73 (10): 905–908.
- 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.
- MORAWSKI T. 1973 – The Sowie Góry area and its petrological problems. [W:] Smulikowski K. (red.), *Revue des problemes geologiques de zones profondes de l’écorce terrestre an Basse Silésie*, 15th Session AZOPRO, 6–16 September 1973. Wyd. Geol., Warszawa: 44–58.
- PAULO A., KRZAK M. 2015 – Skand. [W:] *Metale rzadkie*. Wydawnictwa AGH, Kraków: 246–258.
- PAULO A., STRZELSKA-SMAKOWSKA B. 2004 – Skand na przełomie XX i XXI wieku. *Przegląd Geologiczny*, 52 (4): 286–290.
- PHOUNG S., WILLIAMS E., GAUSTAD G., GUPTA A. 2023 – Exploring global supply and demand of scandium oxide in 2030. *Journal of Cleaner Production*, 401: 136673.
- PIECZKA A., KRISTIANSEN R., STACHOWICZ M., DUMAŃSKA-SŁOWIK M., GOŁĘBIEWSKA B., SĘK M.P., NEJBERT K., KOTOWSKI J., MARCINIAK-MALISZEWSKA B., SZUSZKIEWICZ A., SZEŁĘG E., WOŹNIAK K. 2024a – Heflikite, ideally $\text{Ca}_2(\text{Al}_2\text{Sc})(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O}(\text{OH})$, the first scandium epidote-supergroup mineral from Jordanów Śląski, Lower Silesia, Poland and from Heftefjern, Tordal, Norway. *Mineralogical Magazine*, 2024: 1–16.
- PIECZKA A., STACHOWICZ M., ELEK-PEGUDZ S., GOŁĘBIEWSKA B., SĘK M.P., NEJBERT K., KOTOWSKI J., MARCINIAK-MALISZEWSKA B., SZUSZKIEWICZ A., SZEŁĘG E., STADNICKA K.M., WOŹNIAK K. 2024b – Scandian actinolite from Jordanów Śląski, Lower Silesia, Poland: Compositional evaluation, crystal structure, and genetic implications. *American Mineralogist*, 109: 174–183.
- RIMFIRE Pacific Mining Ltd. ASX Announcement. 2024 – Latest assays demonstrate significant increase in Murga Scandium grades. Rimfire Pacific Mining Ltd., Melbourne, Australia.
- ROSOWIECKA O., BIENKO T., MIKULSKI S., WEEKES R. 2025 – New data on Fe-Ti±V mineralization from Ślęza and Strzegomiany-Kunów prospect, SW Poland: insights from geophysical surveys and geochemical exploration, EGU General Assembly 2025, Vienna, Austria, 27 Apr–2 May 2025, EGU25-16664.
- ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 1 lipca 2015 r. w sprawie dokumentacji geologicznej złoża kopaliny, z wyłączeniem złoża węglowodorów. *Dz. U.* z 15 lipca 2015, poz. 987.
- RUDNICK R.L., GAO S. 2014 – Composition of the continental crust. [W:] Turekian K.K., Holland H. D. (red.), *Treatise on Geochemistry*, 2nd edn., Oxford. Elsevier, 4: 1–51.
- RYKA W. 1992 – Geologia masywu Tajna (Północno-Wschodnia Polska). *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, 139.
- SALMAN A.D., JUZSAKOVA T., MOHSEN S. ABDULLAH T.A., LE P.-C., SEBESTYEN V., SLUSTER B., CRETESCU I. 2022 – Scandium recovery methods from mining, metallurgical extractive industries, and industrial wastes. *Materials*, 7: 2376.
- SHELBY N.J. 2025 – Scandium – Mineral Commodity Summaries 2025. United States Geological Survey, February 2026.
- STEFFENSEN G., MULLER A., MUNNIK F., FRIIS H., EREMBERT M., KRISTOFFERSEN M., ROSING-SCHOW N. 2020 – Unusual scandium enrichment of the Tordal pegmatites, south Norway. Part I: Garnet as Sc exploration pathfinder. *Ore Geology Reviews*, 126: 103729.
- SUNRISE Energy Metals ASX Announcement 2024 – Update of Syerston Scandium Project feasibility study to commence. Sunrise Energy Metals, Melbourne, Australia.
- SUSTAINABLE Mineral Institute. 2021 – Queensland New Economy Minerals Compilation: Scandium. The University of Queensland, Australia: 53.
- SVERDRUP H.U., SVERDRUP A.E. 2024 – On the Supply Dynamics of Scandium, Global Resources, Production, Oxide and Metal Price, a Prospective Modelling Study Using WORLD7. *Biophysical Economics and Sustainability*, 9: 1–22.
- SZAMAŁEK K., SZUFLICKI M., MIZERSKI W. 2020 – Bilans Perspektywicznych Zasobów Kopalni Polski wg stanu na 31.12.2018 r. Państw. Inst. Geol. – PIB, Warszawa.
- TARKHANOV A.V., KULAYEV A.R., PETRIN A.V., KOZYRKOV V.D. 1992 – The Zheltorechensk vanadium-scandium deposit. *International Geology Review*, 34 (5): 495–502.
- ULRICH M., CATHELINEAU M., MUNOZ M., BOIRON M.C., TEITLER Y., KARPOFF A.M. 2019 – The relative distribution of critical (Sc, REE) and transition metals (Ni, Co, Cr, Mn, V) in some Ni-laterite deposits of New Caledonia. *Journal of Geochemical Exploration*, 197: 93–113.
- WANG Z., LI HEI M.Y., LIU R., ZHOU M.F. 2021 – Scandium: Ore deposits, the pivotal role of magmatic enrichment and future exploration. *Ore Geology Reviews*, 128: 103906.
- WEDEPOHL K.H. 1995 – The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 1217–1232.
- WILLIAMS-JONES A.E., VASYUKOVA O.V. 2018 – The economic geology of scandium, the runt of the rare earth element litter. *Economic Geology*, 113 (4): 973–988.
- WISZNIEWSKA J., PETECKI Z. 2016 – Geologiczno-geofizyczna ocena perspektyw złożowych pierwotnych i wietrzeniowych minerałów tytanowych w rejonie ofiolitowego masywu Ślęzy w Sudetach (SW Polska). *Przegląd Geologiczny*, 64 (9): 650–656.
- WOJTULEK P.M., SCHULZ B., DELURA K., DAJEK M. 2019 – Formation of chromitites and ferrogabbros in ultramafic and mafic members of the Variscan Ślęza ophiolite (SW Poland). *Ore Geology Reviews*, 106: 97–112.
- WOJTULEK P.M., SCHULZ B., KLEMD R., GIL G., DAJEK M., DELURA K. 2022 – The Central-Sudetic ophiolites – Remnants of the SSZ-type Devonian oceanic lithosphere in the European part of the Variscan Orogen. *Gondwana Research*, 105: 343–365.

Praca wpłynęła do redakcji 17.09.2025 r.

Akceptowano do druku 8.06.2026 r.