

MAREK NIEĆ*

Ocena geologiczno-gospodarcza złóż wanadonośnych rud tytanomagnetytowych masywu suwalskiego

Słowa kluczowe

Wanad, złoża tytanomagnetytu, masyw suwalski

Streszczenie

W latach 1960—1990 w wyniku systematycznych prac geologiczno-poszukiwawczych i rozpoznawczych zostały odkryte i udokumentowane bardzo duże złoża wanadonośnych rud tytanomagnetytowych Krzemianka i Udryń, na podstawie kryteriów bilansowości opracowanych w 1974 r. Zasoby złóż położonych na głębokości 800—2000 m wynoszą łącznie 1,34 mld ton rudy o zawartości średnio około 28% Fe, 7% TiO_2 i 0,3% V_2O_5 . Projekty zagospodarowania złóż usytuowanych na terenach Pojezierza Suwalsko-Augustowskiego w znacznym stopniu objętego ochroną wywołały ostry sprzeciw ze względu na wybitną konfliktowość dla środowiska przyrodniczego.

Odkrycie tych złóż, które zbiegło się ze wzrostem zapotrzebowania na wanad i tytan na rynku międzynarodowym, a w kraju na żelazo dla rozbudowywanego przemysłu hutniczego, spowodowało zainteresowanie złożem i optymistyczne oceny jego wartości. Dało to podstawę do podjęcia prac studialnych nad zagospodarowaniem złoża i opracowania założeń techniczno-ekonomicznych pilotowej kopalni i zakładu przerobczego.

W tym samym okresie miał miejsce wzrost wymagań odnośnie do jakości surowców żelaza oraz uruchomienie i wzrost produkcji V_2O_5 ze złóż tytanomagnetytowych w RPA, która stała się czołowym jego dostawcą, z bogatych płytko położonych złóż. Skłania to do rewizji wcześniejszych ocen złoża.

Rudy ze złóż tytanomagnetytowych nie budzą na ogół zainteresowania jako surowiec tytanonośny i żelazonośny, ze względu na złożoną technologię ich przeróbki oraz wykorzystania hutniczego i wątpliwą w związku z tym ich opłacalność. Na podstawie przewidywanych kosztów eksploatacji i przeróbki rudy oraz oczekiwanych cen V_2O_5 , ilmenitu i koncentratu magnetytowego oszacowana została brzeżna zawartość ekwiwalentna V_2O_5 w rudzie 0,73, którą należałoby przyjąć dla okonturowania ciał rudnych. Przy takim kryterium zasoby złóż Krzemianka i Udryń wynosiłyby około 1% wcześniej dokumentowanych.

Mała wielkość zasobów, które można by uznać za bilansowe i forma ich występowania w postaci niewielkich odosobnionych ciał rudnych nie uzasadniają dokumentowania złoża jako bilansowe.

* Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.

Analiza porównawcza złóż suwalskich z eksploatowanymi złożami tego typu na świecie wskazująca na możliwość dużej podaży surowców wanadu, tytanu i żelaza z płytko położonych złóż nie wskazuje też, by zagospodarowanie złóż tak głęboko położonych jak w masywie suwalskim mogło być przedmiotem zainteresowania w dającej się przewidzieć przyszłości. Uznanie ich zatem nawet za pozabilansowe wydaje się oceną zbyt optymistyczną.

Wymagania ochrony środowiska były dotychczas podstawowym argumentem przeciwko zagospodarowaniu złóż masywu suwalskiego, których ewentualna eksploatacja jest oceniana jako wybitnie konfliktowa. Należy je traktować jako interesujący obiekt geologiczny, nie posiadający znaczenia praktycznego. Priorytet wymagań ochrony środowiska w regionie suwalskim w stosunku do gospodarczego wykorzystania złóż jest w związku z tym niezagrożony.

Wprowadzenie

W latach 1960—1990 w wyniku systematycznych prac geologiczno-poszukiwawczych i rozpoznawczych zostały odkryte i udokumentowane bardzo duże złoża wanadonośnych rud tytano-magnetytowych Krzemianka i Udryń oraz wstępnie zbadane występowanie tych rud w obszarze Jeleniewo (Znosko 1993; Parecki 1993; Siemiątkowski 1998). Złoża te zostały udokumentowane na podstawie kryteriów bilansowości (tab. 1), opracowanych w 1974 r. w sposób ujęty w Wytycznych Centralnego Urzędu Geologii (CUG 1976). Punktem wyjścia dla ich ustalenia był rachunek ekonomiczny oparty na pracach studialnych i projektowych nad zagospodarowaniem złoża, wskaźniku efektywności inwestycji oraz relacji oczekiwanych kosztów eksploatacji i przeróbki do cen uzyskiwanych metali. Rachunek ten, przeprowadzany w warunkach gospodarki centralnie planowanej, uwzględniał obowiązujące apriorycznie ustalone wskaźniki cen i kosztów. W ocenie bilansowości złóż nie uwzględniano sytuacji na światowym rynku metali, analizy podaży i popytu oraz wymagań ochrony środowiska.

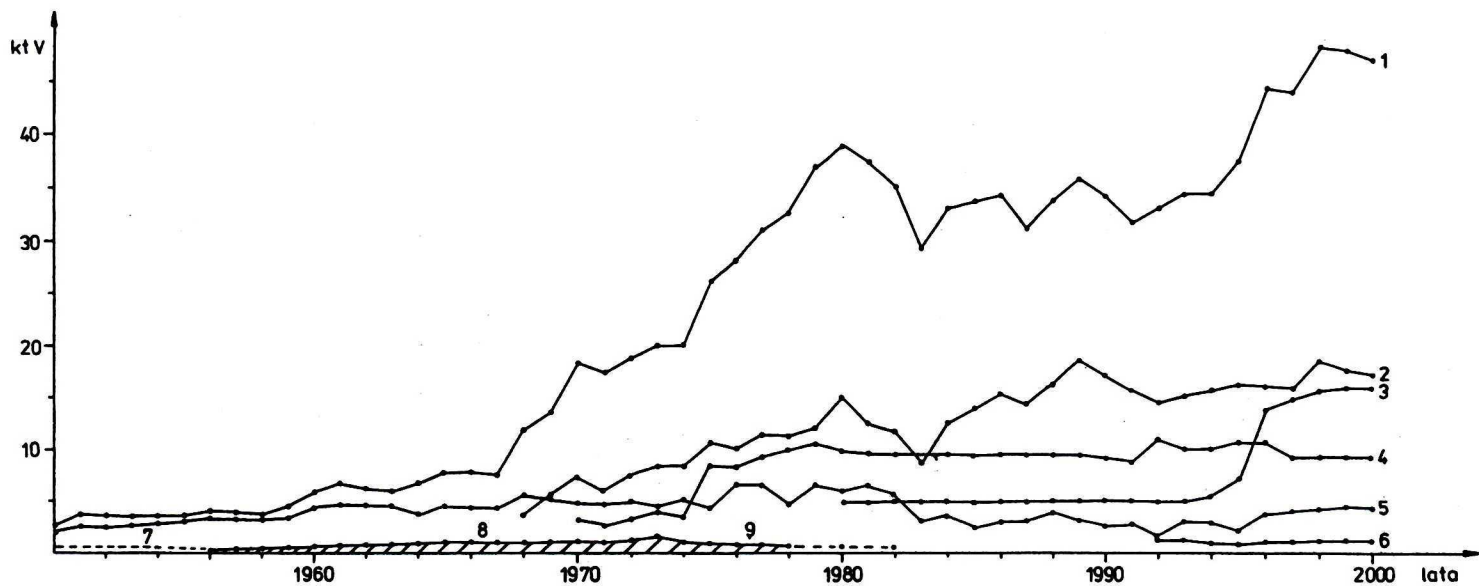
TABELA 1

Kryteria bilansowości złóż rud Fe-Ti-V
(zatwierdzone 29.06.1974, zastosowane w dokumentowaniu złóż Krzemianka i Udryń)

TABLE 1

Criteria of deposit delineation approved in 1974

Parametr	Jednostka	Wartości brzeżne dla zasobów	
		bilansowych	pozabilansowych
Maksymalna głębokość dokumentowania	m	2 300	2 300
Minimalne zasoby rudy	mln t	150	
Minimalna miąższość strefy rudnej	m	2	1
Minimalna miąższość wydzielanych przerostów	m	1,5	
Minimalna średnia zawartość Fe w złożu	%	25	
Brzeżna zawartość Fe w otworze	%	20	
Minimalna średnia zawartość TiO ₂ w złożu	%	6,3	
Minimalna średnia zawartość V ₂ O ₅ w złożu	%	0,18	



Rys. 1. Rozwój produkcji wanadu na świecie w okresie wieloletnim
 1 — świat, 2 — RPA, 3 — Chiny, 4 — Rosja, 5 — USA, 6 — Kazachstan, 7 — Namibia, Peru, 8 — Namibia, Finlandia, Norwegia,
 9 — Namibia, Finlandia, Chile, Norwegia (zaznaczono tylko produkcję Finlandii)

Fig. 1. World vanadium production
 1 — total world production, 2 — RSA, 3 — China, 4 — Russia, 5 — USA, 6 — Kazakhstan, 7 — Namibia, Peru, 8 — Namibia, Finland, Chile,
 9 — Finland, Namibia, Norway, Chile (marked Finland production only)

Projekty zagospodarowania złóż usytuowanych na terenach Pojezierza Suwalsko-Augustowskiego w znacznym stopniu objętego ochroną wywołały ostry sprzeciw ze względu na wybitną konfliktowość dla środowiska przyrodniczego (Ostrowski 1988; Kozłowski 1983, 1986, 1993; Tomaszewski i in. 1988).

Odkrycie złoża Krzemianka na początku lat sześćdziesiątych zbiegło się ze wzrostem zapotrzebowania na wanad i tytan na rynku międzynarodowym, a w kraju na żelazo dla rozbudowywanego przemysłu hutniczego. Spowodowało to zainteresowanie złożem i optymistyczne oceny jego wartości. Dało to podstawy do jego rozpoznania i projektowania zagospodarowania. Niemalą rolę odgrywała też atrakcyjność poznawcza wyników badań geologicznych inspirująca do ich prowadzenia (Podemski, Kurbiel 1988).

W tym samym okresie zaszły dwa zjawiska, których skutki mają obecnie istotne znaczenie dla oceny złoża:

- 1) wzrost wymagań odnośnie do jakości surowców żelaza,
- 2) uruchomienie w 1957 r. i wzrost produkcji V_2O_5 po 1960 r. ze złóż tytanomagnetytowych w RPA (rys. 1), która stała się czołowym jego dostawcą, z bogatych płytko położonych złóż.

Dodać do tego należy zmienne zapotrzebowanie na surowce wanadowe i tytanowe znajdujące wyraz w wahaniami ich cen.

Kompleksowy skład rud w złożach masywu suwalskiego, zawierających Fe, Ti, V oraz podrzędne ilości Cu, Ni i Co, wbrew wcześniejszym przekonaniom nie podwyższa wartości złoża, a nawet ją obniża, ze względu na trudności w uzyskaniu koncentratów o wymaganej jakości.

Obecny stan znajomości jakości rudy i możliwości jej przeróbki pozwala twierdzić, że nie ma dostatecznych podstaw do uznania jej za surowiec dla hutnictwa żelaza, jak początkowo przyjmowano. Są to rudy wanadu i tytanu o potencjalnej, lecz nieokreślonej możliwości wykorzystania. Wątpliwości budzi zarówno wartość użytkowa rud (Szuwarzyński 1991), jak i możliwość zagospodarowania bardzo głęboko położonego złoża.

Istnieje zatem potrzeba weryfikacji oceny geologiczno-gospodarczej złoża i kryteriów jego bilansowości.

2. Charakterystyka geologiczno-górnicza złóż rud Fe-Ti-V w suwalskim masywie anortozytowym

Zasoby złóż tytanomagnetytowych udokumentowanych w suwalskim masywie anortozytowym wynoszą łącznie 1,34 mld ton rudy (tab. 2) o zawartości średnio około 28% Fe (w magnetycie¹), 7% TiO_2 i 0,3% V_2O_5 (tab. 3).

Występują one na głębokości poniżej 800 m i zostały udokumentowane do głębokości 2300 m, wśród skał anortozytowo-norytowych pod nakładem zbudowanym z utworów od kambru aż po czwartorzęd. Tworzy je szereg ciał rudnych o zróżnicowanej grubości. W złożu Krzemianka mają one miąższość od 3 do 150 m. Mimo że najczęściej wynosi ona 3—11 m,

¹ W ocenie zawartości żelaza w rudzie nie uwzględnia się jego zawartości w występujących w niej piroksenach, traktowanych jako składniki płonne

TABELA 2

Zasoby złóż rud Fe-Ti-V w suwalskim masywie anortozytowym (stan na 31.12.1994, Przeniosło 1995)

TABLE 2

Indicated and inferred resources of Fe-Ti-V ore deposits in Suwałki anorthosite massif

Rodzaj zasobów	Zasoby złóż [mln t]			
	Krzemianka (C1 + C2)		Udryń (C2)	
	bilansowe	pozabilansowe	bilansowe	pozabilansowe
Ruda	1 076,60	475,20	263,50	131,30
Fe	314,90	81,40	73,30	23,10
TiO ₂	78,20		19,50	
V ₂ O ₅	3,40		0,70	

TABELA 3

Średnie zawartości metali w złożach suwalskich (Subieta 1979)

TABLE 3

Average metal contents in the ore from Suwałki massif

Metal	Średnie zawartości w rudzie bilansowej [%]	
	Krzemianka	Udryń
Fe (w magnetycie)	29,2	27,8
TiO ₂	7,26	7,4
V ₂ O ₅	0,32	0,26

to większość zasobów, bo aż 66%, występuje w ciałach rudnych o grubości ponad 11 m (Parecki 1993). Forma ciał rudnych interpretowana jest jako soczewowo-warstwowa na podstawie wyliczonego średniego kąta ich upadu 45° (Subieta 1979). Szczegółowa analiza zmienności zawartości Fe i TiO₂ sugeruje (Dobrijałowska 1987), że forma tych ciał może być w szczególności bardziej skomplikowana, soczewowo-gniazdowa. Wskazują na to też pomiary nachylenia granic ciał rudnych odbiegające od średniego kąta upadu oraz spotykane plamisto-gniazdowe tekstury rudy.

Poszczególne ciała rudne mają budowę złożoną, składają się z szeregu szlirów tytanomagnetytowo-ilmenitowych poprzedzielanych anortozytem lub norytem z niewielką zawartością minerałów rudnych bądź z nieregularnych gniazdowo-plamistych skupień rudnych tkwiących w praktycznie płonnym tle skalnym. W związku z tym obserwuje się duże zróżnicowanie zawartości składników użytecznych w profilu złoża.

Zarówno złożo Krzemianka jak i Udryń pocięte są uskokiemi o zrzutach do kilkuset metrów. Szczegóły ich tektoniki nie są jednak dobrze rozpoznane.

Podstawowymi minerałami rudnymi są: tytanonośny magnetyt (titanomagnetyt) i ilmenit. W magnetycie znaczna część TiO_2 występuje w postaci odmieszanego ulvospinelu i ilmenitu. W zależności od zawartości TiO_2 w magnetycie, przechodzącego do koncentratów magnetytowych, w złożu wydzielono kilka typów rud (Parecki 1993). Około 60% zasobów złoża Krzemianka stanowią rudy o zawartości 30—40% Fe, 6—9% TiO_2 (w tym 5,3—6,5% w tytanomagnetycie) i 0,2—0,3 V_2O_5 (Parecki 1998). Wanad jest istotnym składnikiem użytecznym rudy występującym w tytanomagnetycie w postaci domieszki izomorficznej. Minerałami akcesorycznymi są siarczki: pirotyt, pirytyt, chalkopirytyt, pentlandyt, mackinwait, kubanit i inne. Siarczki żelaza stanowią ok. 80% całości siarczków.

Złoża Krzemianka i Udryń zostały formalnie rozpoznane w kategorii C_1 i C_2 , w tym w złożu Krzemianka 67% zasobów w kategorii C_1 , a w złożu Udryń całość zasobów w kategorii C_2 . Mimo takiego zakwalifikowania zasobów, stan rozpoznania złoża Krzemianka jest niewystarczający dla projektowania jego zagospodarowania. Podstawowe niedostatki to (Gruszczuk i in. 1975; Zabierowski i in. 1986; Kozłowski 1986; Szuwarzyński 1991):

- 1) niejednoznaczność interpretacji morfologii ciał rudnych, których forma ustalona została metodą statystyczną, na podstawie przyjęcia średniego kąta nachylenia ich granic,
- 2) niezadowalający stan rozpoznania tektoniki złoża,
- 3) niedostatek danych o właściwościach fizykomechanicznych górotworu,
- 4) niewyjaśnione w pełni właściwości technologiczne rudy i możliwość uzyskania z niej koncentratów spełniających wymagania produktu handlowego.

Niedostatki te powodują, że złożo Krzemianka powinno być uznane za rozpoznane jedynie w kategorii C_2 , a do opracowania ewentualnego projektu jego zagospodarowania konieczne byłyby dalsze prace rozpoznawcze.

Optymistyczne początkowe oceny wartości gospodarczej złoża Krzemianka dały podstawę do podjęcia prac studialnych nad zagospodarowaniem złoża i opracowania założeń techniczno-ekonomicznych pilotowej kopalni i zakładu przerobczego (Zabierowski i in. 1986). Przedstawiony model kopalni przewidywał wydobycie roczne 8 mln t rudy, z której w efekcie wzbogacania otrzymywane byłoby rocznie: 2,4 mln t koncentratu magnetytowego o zawartości 65% Fe, 0,8 mln t koncentratu ilmenitowego o zawartości 45% TiO_2 , 17 tys. t koncentratu wanadowego („produktu wanadowego”) o zawartości 98% V_2O_5 , a ponadto: wysokojakościowe kruszywo bazaltowe, polerowane płyty ozdobne i bezwodny siarczan sodu. Spodziewano się także, że możliwy będzie odzysk kobaltu i niklu.

Projektowana eksploatacja złoża byłaby bardzo uciążliwa i konfliktowa w stosunku do środowiska przyrodniczego. W związku z tym przedstawiona została druga koncepcja zagospodarowania złoża spełniająca podstawowe wymagania ochrony środowiska (Sikora i in. 1987; Szczerowski, Uljasz 1988). Istotnym jej elementem jest projekt lokalizacji zakładu przerobczego pod ziemią i składowanie całości odpadów w wyrobiskach poeksploatacyjnych. Spełniałyby one rolę podsadzki. Współczynnik wykorzystania zasobów bilansowych złoża powinien wynosić 80%.

Projekt utworzenia dużego ośrodka górniczego na Suwalszczyźnie budził zasadnicze zastrzeżenia z punktu widzenia ochrony środowiska, ze względu na przewidywane funkcje turystyczno-rekreacyjne tego regionu i dużą zasobność obszarów leśnych, które dały podstawę do projektu „Zielonych płuc Polski”, a następnie „Zielonych płuc Europy” (Kozłowski 1983, 1986,

1993). Mimo opracowania koncepcji zagospodarowania złoża, która stwarzała szanse minimalizacji ujemnego oddziaływania wydobycia rudy na środowisko przyrodnicze, nadal narażone byłoby ono na głębokie przekształcenie przez konieczność tworzenia infrastruktury umożliwiającej funkcjonowanie kopalni: sieci komunikacyjnej, osiedli pracowniczych, urządzeń zaplecza technicznego i komunalnego. Spowodowałyby to nieodwracalne przekształcenie krajobrazu. Należałoby się też liczyć z nieodwracalnym przekształceniem sieci hydrograficznej i możliwością zanieczyszczenia wód powierzchniowych, które są jednym z podstawowych elementów decydujących o walorach przyrodniczych regionu (Ostrowski 1988; Tomaszewski i in. 1988).

Wyjątkowe walory przyrodnicze regionu suwalskiego stały się podstawą dla opracowania koncepcji „zielonych płuc Polski”, rozszerzonej następnie jako „zielone płuca Europy”, przez objęcie nią terenów przyległych Litwy, Łotwy, Estonii, Białorusi i Ukrainy. Jej głównym celem jest ochrona obszarów unikatowych w skali europejskiej z uwagi na różnorodność biologiczną i zdolność kumulacji węgla w biosferze. Program ekorozwoju tego regionu, który jest wyraźnie preferowany, przewiduje nielocalizowanie na tym terenie przemysłu uciążliwego dla środowiska.

Wymagania ochrony środowiska są zatem ważnym, choć nie rozstrzygającym czynnikiem w ocenie gospodarczej złóż masywu suwalskiego.

2. Źródła V, Ti, Fe i użyteczność gospodarcza ich złóż

Duża różnorodność warunków występowania i składu mineralnego złóż wanadonośnych rud magnetytowych powoduje brak ogólnie przyjmowanych kryteriów oceny użyteczności złóż tego typu.

Wykorzystywane są rudy magnetytowe o zawartości Fe już od 15% wżwyż. Tytan bywa składnikiem użytecznym jeśli występuje w formie ziarnistego ilmenitu ($>0,1$ mm), natomiast jest niepożądany, jeśli występuje w formie tytanomagnetytu (roztworu stałego $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{--FeTiO}_3$) lub eksolucyjnych ziarn ulvitu (ulvospinelu) w magnetycie. Wymagania odnośnie do zawartości V_2O_5 nie są określane. Wanad traktowany jest jako składnik użyteczny towarzyszący, jeśli może być odzyskany w procesach przeróbki rudy. Jeśli zawartości V_2O_5 w rudzie przekraczają 1—1,5%, wanad uważany jest za składnik główny rudy, decydujący o jej użyteczności.

Czołowe miejsce wśród źródeł wanadu zajmują złoża magmowe wanadonośnych magnetytów występujące w skałach zasadowych, z których pochodzi około 80% światowej produkcji (Bolewski i in. 2001). Znaczące ilości wanadu pozyskiwane są w czasie przeróbki rop naftowych (ok. 10% produkcji) i fosforytów, a w niewielkich ilościach także boksytów i osadowych rud Fe, w których występuje jako towarzyszący składnik śladowy. Źródłem wanadu były też karnotytove rudy uranu w piaskowcach odgrywające w przeszłości ważną rolę w jego podaży.

Wśród producentów surowców wanadu od połowy lat sześćdziesiątych XX w. wiodącą rolę odgrywa niezmiennie RPA, dająca do końca XX w. około 40% światowej ich produkcji (Schürman, Marsh 1998), a obecnie 36%, pochodzącej z przetwarzania wanadonośnych rud

tytanomagnetytowych. Drugim głównym producentem wanadu z podobnych rud z końcem XX w. stały się Chiny dające około 34% światowej produkcji (Bolewski i in. 2001). Znaczny, ale od kilku lat malejący udział ma również Rosja (ok. 19—20% światowej produkcji). Do ważnych producentów należą też Stany Zjednoczone. Nastąpiły tu jednak zmiany w rodzaju źródeł wanadu. Do lat osiemdziesiątych XX w. głównym surowcem wnadonośnym w USA były piaskowcowe rudy U-V, które ustąpiły miejsca produktom przetwarzania ropy naftowej. Udział wanadu pozyskiwanego z ropy naftowej w ogólnej podaży wanadu szybko rośnie i pojawiają się nowi jego producenci, np. Japonia.

Udokumentowane zasoby wanadu wynoszą około 38 mln t, z tego 35%, to jest 12,5 mln t, znajduje się w RPA, w złożach płytko położonych, do głębokości 50 m, kwalifikujących się do eksploatacji odkrywkowej ((Mineral Commodity... 2003; Grohman 1994). Istnieją zatem możliwości bardzo znacznego powiększenia tych zasobów w przypadku zainteresowania złożami głębiej położonymi. Sprawia to, że pozycja tego kraju jako wiodącego producenta wanadu ze złóż tytanomagnetytowych jest niezagrażona i będzie w przyszłości decydowała o ocenie gospodarczej takich złóż w innych krajach.

Tytan i żelazo pozyskiwane są przede wszystkim ze złóż samodzielných tych metali.

Podstawowym źródłem surowców tytanowych są złoża okruchowe rutyłu i ilmenitu, łatwe do eksploatacji metodą odkrywkową, z których również łatwy jest odzysk minerałów tytanowych. Duże znaczenie mają także złoża magmowe, w których głównym minerałem Ti jest ilmenit, występujący zwykle w towarzystwie tytanomagnetytu. Równocześnie zwrócić trzeba uwagę na bardzo duże, łatwo dostępne złoża tytanomagnetytów w kompleksie Bushweldu w RPA, które nie są wykorzystywane jako źródło surowców tytanu. Uważa się, że mogą one stanowić potencjalną jego bazę zasobową po wyczerpaniu okruchowych złóż ilmenitu (Wipplinger 1998).

Poziom zapotrzebowania na surowce tytanowe jest dyktowany przez rynek pigmentów i farb mineralnych (bieli tytanowej) zużywający około 95% produkcji surowców tytanowych oraz metalurgię, pracującą przede wszystkim na potrzeby przemysłu lotniczego (Gambogi 1995).

Udokumentowane zasoby przemysłowe kopalin tytanowych wynoszące 470 mln t TiO_2 , a geologiczne 820 mln t, zabezpieczają wieloletnie pokrycie zapotrzebowania na obecnym poziomie ((Mineral Commodity... 2003).

Źródłem rud żelaza są przede wszystkim złoża zmetamorfizowane, hematytowo-magnetytowe w kwarcytach żelazistych (Banded Iron Formation — BIF), zwłaszcza wtórnie wzbogacone w wyniku procesów metasomatycznych, a w przypowierzchniowej strefie także w wyniku procesów wietrzeniowych. Znacznie mniejszy jest udział innych typów złóż rud żelaza, magmowych i skarnowych, w których przeważają rudy magnetytowe.

Przedmiotem zainteresowania są przede wszystkim rudy bogate, zawierające ponad 50% Fe, a w szczególności o zawartości ponad 60% Fe. Rudy uboższe o zawartości nawet poniżej 30% Fe, bywają eksploatowane, jeśli są łatwo wzbogacalne i pozwalają na uzyskanie koncentratu zawierającego co najmniej 50% Fe. Wyjątkowo, w krajach europejskich (Austria, Bośni i Hercegowina, Bułgaria), eksploatowane są jeszcze rudy syderytowe, o zawartości 25—35% Fe, które stanowiły tradycyjną bazę surowcową miejscowego hutnictwa żelaza.

Złoża wanadonośnych magnetytów lub wanadonośnych tytanomagnetytów dostarczają ponad 80% produkcji światowej wanadu, około 40% światowej produkcji TiO_2 i kilka procent żelaza. Zasadniczo wyróżnić można dwa ich typy (Page 1986; Force 1986):

- 1) pokładowe w rozwarstwionych intruzjach skał zasadowych (typ Bushweldu),
- 2) soczewowo-pokładowe i gniazdowe w intruzjach anortozowo-norytowo-gabrowych.

W zależności od rodzaju skał otaczających i warunków występowania przeprowadza się niekiedy bardziej szczegółowy ich podział (Borisenko 1983; Sprawoznik 1985), który jednak nie ma znaczenia dla ogólnej oceny tych złóż.

Złoża te cechują się znacznym zróżnicowaniem zasobów od około 1 mln ton rudy do ponad 10 000 mln ton. Duże jest również zróżnicowanie jakości rudy. Zawartość Fe waha się na ogół od kilkunastu do około 45%, rzadziej do 60%, TiO_2 od kilku do kilkunastu procent i rzadziej do 45%, a V_2O_5 od około 0,1 do 2,5% (Wilson 1969; Surowce... 1982; Borisenko 1983; Cawthorn, Molyneux 1986; Mineral Deposits... 1998).

Znaczenie mają przede wszystkim duże złoża bogatych rud występujących blisko powierzchni. Czołowe miejsce zajmują tu złoża w kompleksie Bushweldu w RPA. Tworzy je 21 pokładów wanadonośnych rud tytanomagnetytowych znanych wzdłuż wychodni w pasie o długości 325 km. Znaczenie gospodarcze mają tylko najniższe pokłady rud bogatych w V_2O_5 o niezbyt wysokiej zawartości TiO_2 . We wschodnim Transwalu główny pokład rud magnetytowych ma miąższość 1,2—2,7 m i zawiera średnio 1,6% V_2O_5 . W zachodniej części Bushweldu znaczenie mają dwa pokłady o mniejszej miąższości, ale bogatsze w wanad, w których zawartość V_2O_5 wynosi średnio 1,5—2,2%. Rudy pokładu głównego zawierają 55—57% Fe, 12—14% TiO_2 , 1,4—1,7% V_2O_5 i do 0,04% S (Wilson 1969; Cawthorn, Molyneux 1986).

Złoża kompleksu bushweldzkiego dostarczają około 80% wanadu w obrocie międzynarodowym.

Duże znaczenie mają złoża rud V-Ti-Fe w Chinach, w których zawartość Fe wynosi 25—45%, TiO_2 5—15% i V_2O_5 0,2—0,5% (Mineral deposits... 1998). Malejące znaczenie mają złoża na Uralu w Rosji, gdyż występują w nich na ogół rudy ubogie, zawierające średnio 16—17% Fe, 0,8—2% TiO_2 i średnio 0,14% V_2O_5 oraz 0, x g/t Pt. Wykorzystywane są dzięki temu, że są to rudy gruboziarniste i łatwowzbogacalne (Surowce... 1982; Paulo, Radwanek-Bąk 1996).

Inne złoża wanadonośnych magnetytów eksploatowane są na mniejszą skalę, mimo że niektóre z nich (np. w kompleksie Stillwater w stanie Wyoming w USA) posiadają znaczne zasoby. Często eksploatacja tych złóż ma charakter okresowy, zależnie od popytu na wanad i tytan.

Złoża wanadonośnych rud magnetytowych eksploatowane są wyłącznie odkrywkowo. Nieliczne kopalnie podziemne były czynne w przeszłości, ale wydobywanie prowadzono jedynie do głębokości około 600 m ze złoża Otanmäki w Finlandii (Osika i in. 1970).

3. Koszty pozyskania i ceny surowców wanadu, tytanu i żelaza

Duże zróżnicowanie kosztów pozyskania surowców i wahania cen powodują, że ocena gospodarcza złóż może być dokonana tylko w sposób przybliżony. Jest to wystarczające na

etapie dokumentowania złóż, gdy przedmiotem oceny są zasoby bilansowe, rozumiane jako takie, które mogą być rozważane jako obiekt eksploatacji.

Wiarygodne ustalenie kosztów pozyskania surowców wanadu dodatkowo napotyka na trudności z powodu różnorodności ich źródeł, a cen z powodu różnorodności pozyskiwanych produktów.

W ostatnich czterdziestu latach ceny topionego V_2O_5 wyrażone w walucie stałej podlegały znacznym wahaniom (rys. 2). Można oczekiwać, że w dłuższym okresie mogą się one stabilizować na niskim poziomie z kilku powodów:

- 1) dużych rezerw produkcyjnych w RPA, gdzie eksploatowane są bogate rudy położone blisko powierzchni,
- 2) dużej podaży wanadu ze złóż chińskich,
- 3) możliwości uruchamiania produkcji wanadu z nowych złóż, występujących w dogodnych warunkach geologicznych (przede wszystkim płytko położonych rud tytanomagnetytowych),
- 4) rosnącego pozyskiwania wanadu z popiołów po spalaniu ciężkich rop oraz z katalizatorów stosowanych w przemyśle petrochemicznym.

Jako prawdopodobną oczekiwaną cenę można przyjąć co najwyżej 6—7 \$/t V_2O_5 , to jest około o połowę mniejszą od wyjątkowo osiąganą, rekordowej w 1988 roku (rys. 2). Dla oceny bilansowości złóż masywu suwalskiego przyjęto cenę w wysokości 7000 \$/t V_2O_5 .

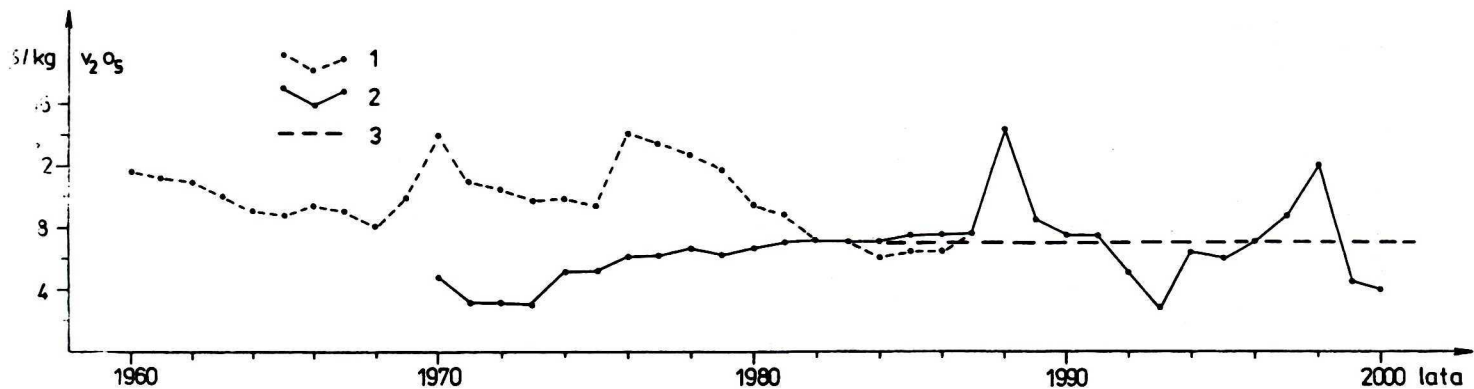
Koszty pozyskania surowców tytanowych są bardzo zróżnicowane w zależności od ich rodzaju, sposobu eksploatacji, przeróbki i miejsca pochodzenia. Dostępne dane dotyczą eksploatacji odkrywkowej, a zatem nie mają znaczenia dla oceny bilansowości złóż masywu suwalskiego. Są one niskie w przypadku ilmenitu, pozyskiwanego przede wszystkim ze złóż okrucowych, i wynoszą do kilkunastu \$/t (An Appraisal...1987),

W obrocie międzynarodowym notowane są ceny surowców pierwotnych: ilmenitu (koncentratu o zawartości standardowej 54% TiO_2) i rutylu, oraz przetworzonych: żużla tytanowego, gąbki tytanowej i bieli tytanowej. Dla oceny bilansowości złóż tytanomagnetytowych istotne znaczenie mają ceny koncentratów ilmenitu, które pozyskuje się z tych złóż. Są one też głównym surowcem tytanowym.

Do roku 1980 ceny bieżące ilmenitu stabilizowały się na poziomie 17—19 \$/t. Po 1980 roku nastąpił wzrost cen do około 70 \$/t (rys. 3), a po 1998 r. do ponad 90 \$/t. Obserwowana tendencja wzrostowa cen ilmenitu sugeruje możliwość wzrostu jego ceny nawet do 100 \$/t. Niewielki wzrost popytu na surowce tytanowe, przy dużej możliwości wzrostu ich podaży pozwala jednak przypuszczać, że ceny ilmenitu mogą się stabilizować około 70 \$/t i do dalszych obliczeń przyjęto tę jego wartość.

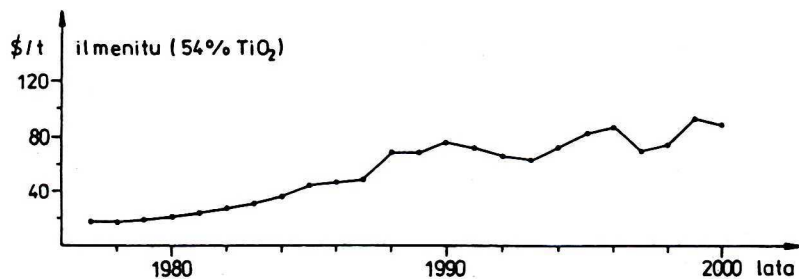
Koszty pozyskania rud żelaza w krajach prowadzących ich eksploatację są bardzo zróżnicowane w zależności od: rozmiaru eksploatacji, regionu geograficznego, jakości rudy i niezbędnych procesów przerobczych. Wyraźnie zaznacza się podział producentów rud żelaza na dwie grupy w zależności od kosztów ich pozyskania.

Pierwszą grupę tworzą kraje Afryki, Ameryki Południowej, Australia i Indie, w których koszty eksploatacji i przeróbki rudy są niskie i wynoszą łącznie do około 5 \$/t. Przedmiotem eksploatacji są tam bogate rudy, limonitowe, laterytowe oraz hematytowe i magnetytowe, w kwarcytach żelazistych (BIF — Banded Iron Formation), występujące blisko powierzchni



Rys. 2. Rys. Kształtowanie się cen V_2O_5 (topionego, 98%) w okresie wieloletnim
 1 — ceny stałe w odniesieniu do 1987 r., 2 — ceny bieżące, 3 — średnia cena V_2O_5 w okresie od 1980 do 2000 r.

Fig. 2. Long term variation of V_2O_5 prices
 1 — standardized prices to 1989 yr., 2 — current prices, 3 — average price for the period since 1980 up to 2000 yr.



Rys. 3. Rys. Kształtowanie się cen ilmenitu (54% TiO_2) f.o.b. porty australijskie w okresie wieloletnim

Fig. 3. Long term variation of ilmenite prices (54% TiO_2) f.o.b. Australian ports

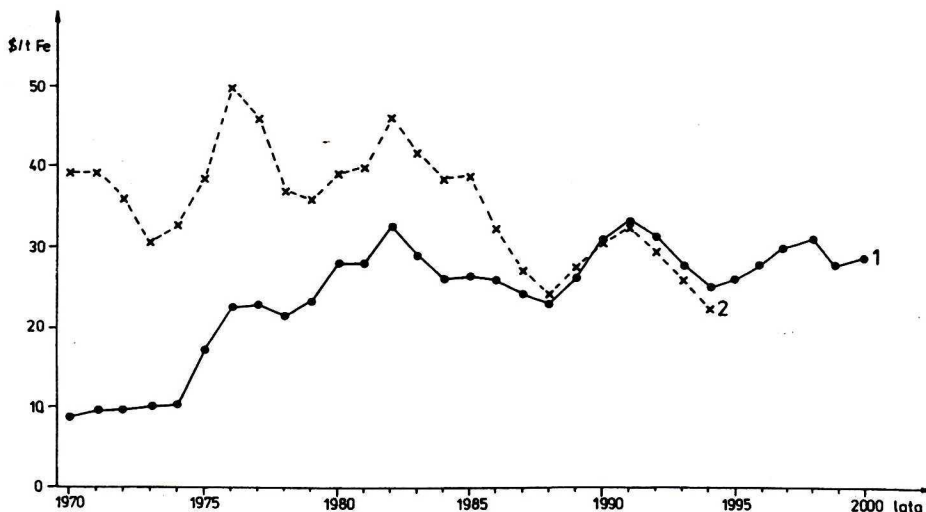
a zatem łatwe do eksploatacji metodą odkrywkową. Kraje te są czołowymi eksporterami rud żelaza i ich podaż dyktuje poziom cen na rynku światowym.

Drugą grupę tworzą kraje Ameryki Północnej i Europy, w których koszty eksploatacji i przeróbki są wysokie, 10—20 \$/t. Związane jest to często z eksploatacją podziemną i występowaniem rud ubogich wymagających wzbogacania.

Od 1960 r. obserwuje się tendencję spadkową cen rud żelaza, wywołaną kryzysem w przemyśle stalowniczym i następującymi w nim zmianami technologicznymi. Uważa się, że wszedł on w końcową fazę rozwoju, w związku z czym przewiduje się bądź tylko niewielki jego rozwój w latach następnych, bądź nawet stagnację (Gustkowicz 1985; Podobiński 1989). Ceny rud żelaza kształtowane są przez dużą podaż wysokogatunkowych rud (powyżej 62% Fe), brazylijskich, australijskich i afrykańskich oraz przez wysokie wymagania hutnictwa odnośnie do jakości rud i koncentratów. Czynnikiem, które ograniczyły popyt na rudy żelaza są (Gustkowicz 1985; Podobiński 1989):

- 1) coraz większy udział w procesach metalurgicznych surowców wtórnych (złomu),
- 2) zmniejszanie zużycia stali konstrukcyjnej w związku z podnoszeniem wymagań odnośnie do jej jakości,
- 3) zmniejszanie zużycia rudy w procesach hutniczych w wyniku wprowadzenia nowych technologii (np. odlewania ciągłego),
- 4) zmniejszenie zapotrzebowania na stal w przemyśle zbrojeniowym.

Można zatem oczekiwać również niskiego poziomu cen rud żelaza w przyszłości. Dodatkowym czynnikiem stabilizującym ceny na niskim poziomie jest duża podaż rud żelaza. Ceny rud i koncentratów żelaza o zawartości 65% Fe kształtują się na poziomie około 30 \$/t (rys. 4). W przeliczeniu na zawartość żelaza odpowiada to cenie około 0,5 \$/1%Fe.



Rys. 4. Kształtowanie się cen rud żelaza. Rudy brazylijskie — 65% Fe, c.i.f. porty Morza Północnego
1 — ceny bieżące, 2 — ceny stałe w odniesieniu do 1990 r. (wg Bolewskiego i in. 1996, uzupełnione)

Fig. 4. Long term variations of iron ore prices. Brazilian ore — 65% Fe, c.i.f. North Sea ports
1 — current prices, 2 — standardized prices to 1990 yr. (after Bolewski et al. 1996, completed)

Istniejąca sytuacja na rynku rud tytanu i żelaza powoduje, że rudy ze złóż tytanomagnetytowych nie budzą na ogół zainteresowania jako surowiec tytanonośny i żelazonośny, ze względu na złożoną technologię ich przeróbki oraz wykorzystania hutniczego i wątpliwą w związku z tym ich opłacalność. W RPA, która jest największym producentem rud tytanomagnetytowych, stanowią one tylko surowiec wanadonośny. Surowiec pozostawiany po odzysku wanadu, mimo że zawiera przeciętnie 60% Fe, traktowany jest jako odpad nieprzydatny dla hutnictwa ze względu na wysoką zawartość TiO_2 wynoszącą 8%. Jedynie w kopalni Mapochs pozyskiwano żelazo z rudy o zawartości 54% Fe, 1,6% V_2O_5 i 11,7% TiO_2 (Astrup i in. 1998). Próby wykorzystania wszystkich składników rudy podejmowane są na niewielką skalę (Schürman, Marsh 1998). RPA nie jest też producentem surowców tytanowych z tych złóż. Uważa się, że złoża te nie będą tak długo źródłem ilmenitu, póki nie zostaną wyczerpane jego złoża okrucowe.

4. Ocena bilansowości złóż masywu suwalskiego

4.1. Zasady oceny bilansowości

Przez kryteria bilansowości złoża, rozumie się takie jego cechy naturalne i warunki występowania, które umożliwiają rozważanie możliwości jego zagospodarowania (Zasady 1999). Określone są one na podstawie (Nieć i in. 1994; Nieć 2002):

- 1) doświadczeń górnictwa w eksploatacji złóż podobnego typu,
- 2) wymagań technicznych odnośnie do eksploatacji złoża i przeróbki kopaliny,
- 3) wymagań odnośnie do jakości możliwych do uzyskania surowców,
- 4) przybliżonego rachunku ekonomicznego opartego na porównaniu przewidywanych, możliwych cen surowców i kosztów ich pozyskania (eksploatacji i przeróbki kopaliny).

Określone są w ten sposób przede wszystkim wartości brzeżne parametrów złoża służące do wyznaczenia jego granic w celu geologicznego jego udokumentowania. W granicach tak udokumentowanego złoża może być projektowane jego zagospodarowanie i wyznaczone mogą być granice przemysłowe złoża, to znaczy tej jego części, której eksploatacja może być uzasadniona gospodarczo na podstawie szczegółowego rachunku ekonomicznego uwzględniającego całość kosztów, łącznie z niezbędnymi nakładami inwestycyjnymi, które nie są uwzględniane przy ocenie brzeżnych parametrów złoża bilansowego.

Duże zróżnicowanie budowy geologicznej i warunków występowania oraz geograficznego położenia złóż rud wanadu, tytanu i żelaza, a także niewielka liczba eksploatowanych złóż wanadonośnego tytanomagnetytu, porównywalnych ze złożami masywu suwalskiego, utrudniają bezpośrednio wykorzystanie przy ocenie ich bilansowości doświadczeń górnictwa światowego. Istotne znaczenie dla oceny bilansowości złoża mają:

- 1) głębokość jego położenia,
- 2) jakość kopaliny określona przez zawartość V, Ti i Fe i możliwość uzyskania z niej koncentratów spełniających wymagania produktu handlowego.

Dodatkowo konieczne jest uwzględnienie w tej ocenie analizy podaży surowców wanadu, tytanu i żelaza. W przypadku złóż masywu suwalskiego istotną rolę odgrywają też wymagania

dotyczące ochrony środowiska, szczegółowo prezentowane i analizowane w licznych opracowaniach (Kozłowski 1993).

4.2. Bilansowość złóż masywu suwalskiego

Znakomita większość złóż rud wanadu, tytanu i żelaza jest eksploatowana sposobem odkrywkowym. W większości przypadków są to kopalnie płytke. Jedynie nieliczne kopalnie odkrywkowe rud żelaza, przykładowo Krzyworożskie, sięgają do głębokości 250—300 m, a podziemne bogatych rud żelaza nawet do ponad 1000 m. W RPA, która jest największym producentem surowców wanadonośnych, przewiduje się na razie eksploatację rud wanadu tylko do głębokości 50 m i tylko do tej głębokości szacowane są ich zasoby. Eksploatację podziemną wanadonośnych rud tytanomagnetytowych i rud tytanu prowadzi się do głębokości co najwyżej kilkuset metrów. W najgłębszej, już nieczynnej kopalni Otanmäki, złoża było udostępniane do głębokości 660 m (Osika i in. 1970).

Złoża masywu suwalskiego położone są na głębokości 850—2300 m. Ich eksploatacja według opracowanych dotychczas założeń mogłaby być prowadzona na głębokości dopiero poniżej 1000 m, ze względu na konieczność pozostawienia stropowej półki ochronnej izolującej wyrobiska od zawodnionego nadkładu. Złoża położone są zatem na głębokości znacznie większej niż przyjmowana jako dostępna dla eksploatacji tego typu złóż w górnictwie światowym i z tego powodu nie ma podstaw do uznawania ich za bilansowe.

Brak również podstaw do przewidywań, by złoża położone na głębokości większej niż kilkaset metrów mogły być przedmiotem zainteresowania w dającej się przewidzieć przyszłości. Wątpliwe jest zatem także zaliczenie zasobów złóż masywu suwalskiego z tego powodu nawet do pozabilansowych.

Rudy ze złóż masywu suwalskiego mają charakter kompleksowy. Uważa się, że potencjalnie użytecznymi składnikami są wanad, tytan, żelazo, a także miedź, nikiel i kobalt.

Wykonane dotychczas na potrzeby projektowania przeróbki rudy badania rud wykazują jej trudną wzbogacalność (Parecka, Sylwestrzak 1984). Dla uzyskania odpowiednich koncentratów lub produktów przeróbki rudy konieczne jest stosowanie złożonego procesu, w wyniku którego można uzyskać koncentraty: magnetytowy, ilmenitowy, siarczkowy oraz „produkt wanadowy”. Skład koncentratów (tab. 4) jest też zróżnicowany w zależności od zawartości Fe i TiO_2 w rudzie. Spośród nich jedynie „produkt wanadowy” spełnia wymagania handlowe, natomiast pozostałe koncentraty nie odpowiadają wymaganiom obowiązującym w obrocie międzynarodowym.

Koncentrat tytanomagnetytowy mimo spełnienia wymagań dotyczących zawartości Fe, nie kwalifikuje się do bezpośredniego wykorzystania w hutnictwie ze względu na wysoką zawartość tytanu i jest w zasadzie odpadem po produkcji V_2O_5 wymagającym dalszej jego przeróbki lub specyficznej obróbki metalurgicznej.

Koncentrat ilmenitowy charakteryzuje się niższą zawartością TiO_2 (ok. 45%) w stosunku do notowanej w produktach handlowych (54%, Bolewski i in. 2001), co obniża jego wartość.

Tzw. „koncentrat siarczkowy” charakteryzuje się niską zawartością Cu, Ni i Co, porównywalną z zawartościami tych metali w surowej rudzie miedziowo-niklowej. Wymaga zatem bądź dalszego wzbogacania, bądź stosowanie specyficznych metod odzysku metali.

TABELA 4

Charakterystyka koncentratów ze złoża Krzemianka (Parecka, Sylwestrzak 1984)

TABLE 4

Composition of concentrates from Krzemianka ore

Parametr [%]	Nadawa	Koncentrat			Produkt wanadowy
		magnetytowy	ilmenitowy	siarczkowy	
Wychód	100	29,5	8,8	1,8	0,2
Uzysk	100	64,4	89,8	61,6	66,5
Fe	30	65,5	33,5	45,0	
SiO ₂	27,6		3,2		
TiO ₂	6,7	2,7	45,5		
V	0,16	0,48			V ₂ O ₅ 90—95
S	0,85	0,26	0,1	29,1	
Cu				1,7	
Ni				0,73	
Co				0,21	

Siarczki stanowią zatem raczej domieszkę szkodliwą i mogą być odpadem uciążliwym dla środowiska.

Trudności w uzyskaniu z rudy surowców spełniających stosowne wymagania powodują, że ocenę bilansowości złoża należy oprzeć przede wszystkim na zawartości V₂O₅ i ewentualnie TiO₂. W istocie uwzględniony powinien być tylko TiO₂ związany w ilmenicie tworzącym samodzielne ziarna mineralne. Wobec jednak braku odpowiednich danych na ten temat, w dalszych rozważaniach nie uwzględniono, że znaczna część TiO₂ występuje w tytanomagnetycie w formie odmieszanego ilmenitu lub ulvospinelu.

Kryterium bilansowości można formułować z zależności:

$$k_e + k_p = 0,01 \sum_{i=1}^n C_i \eta_i p_i (1 - \xi)$$

gdzie:

k_e — koszty eksploatacji 1 tony rudy [\$/t],

k_p — koszty przeróbki 1 tony rudy [\$/t],

η_i — współczynniki uzysku składników użytecznych,

C_i — ceny składników użytecznych [\$/t],

p_i — zawartości składników użytecznych [%],

ξ — przewidywane zubożenie rudy.

Przyjmując jako k_e i k_p tylko koszty operacyjne nie obciążone nakładami inwestycyjnymi, na ich podstawie mogą być wyliczone brzeżne parametry złoża wyznaczające jego granice (Wanielista 1995; Nieć 2002).

Przy przeliczeniu zawartości składników użytecznych na ekwiwalentną zawartość V_2O_5 i po przekształceniu, wzór ma postać:

$$p_{ev} = \frac{k_e + k_p}{\eta C_v (1 - \xi)} \cdot 100$$

gdzie:

p_{ev} — ekwiwalentna zawartość V_2O_5

C_v — cena V_2O_5

η — średni współczynnik uzysku składników użytecznych

Zawartość TiO_2 ekwiwalentna V_2O_5 może być wyznaczona z relacji cen V_2O_5 i ilmenitu, które przyjęto odpowiednio dla: V_2O_5 — $C_v = 7000$ \$/t, a dla ilmenitu — $C_i = 70$ \$/t. Współczynnik przeliczenia zawartości TiO_2 na zawartość ekwiwalentną V_2O_5 wynosi zatem, po przeliczeniu zawartości TiO_2 na zawartość ilmenitu:

$$a_i = \frac{1,88 C_i}{C_v} = \frac{1,88 \cdot 70}{7000} = 0,0188$$

Współczynnik uzysku składników użytecznych wynosi według badań laboratoryjnych: dla koncentratu ilmenitowego — 64%, dla „produktu wanadowego” — 66,5%. Do obliczeń dla uproszczenia przyjęto = 0,65

Zubożenie kopaliny ξ , według wstępnych analiz możliwości eksploatacji złoża może wynosić 5—10%, ale wydaje się to wielkością zaniżoną dla systemów masowego wybierania złoża. W systemach komorowych może ono dochodzić nawet do 20%. Mimo to, do obliczeń przyjęto zużycie 10%, to jest $\xi = 0,1$

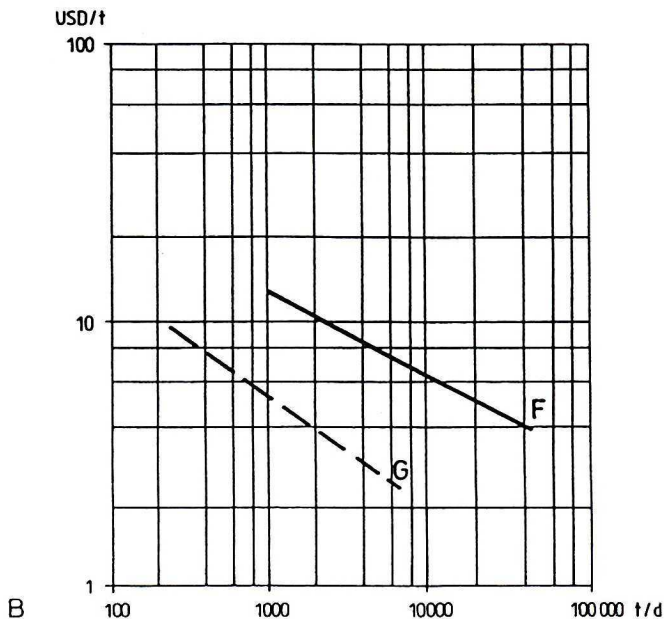
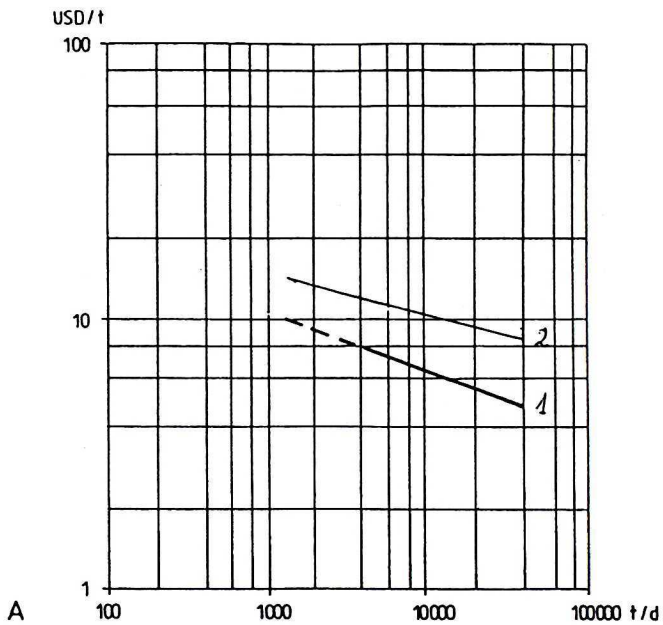
Koszty eksploatacji i przeróbki rud są nieznane. Wcześniejsze oszacowania wykonywane w warunkach gospodarki centralnie planowanej są nieaktualne. Dla celów określenia kryteriów bilansowości, zgodnie z metodyką zalecaną przez Komisję Zasobów Kopaliny (Nieć i in. 1994), można przyjąć przeciętne koszty eksploatacji i przeróbki rudy na podstawie doświadczeń górnictwa światowego.

Jak wyżej przedstawiono, eksploatacja złóż rud wanadu i tytanu prowadzona jest w całkowicie odmiennych warunkach geologicznych niż te, w jakich znajdują się złoża masywu suwalskiego. Nieliczne publikowane dane na ich temat nie mogą mieć w tym przypadku zastosowania. Do obliczeń przyjęto zatem przeciętne koszty eksploatacji podziemnej złóż i koszty przeróbki szacowane na podstawie danych statystycznych i zalecane przez US Bureau of Mines (rys. 5) na etapie opracowywania „prefeasibility study” (Camm 1989).

Według tego opracowania, przy założeniu:

— planowanego wydobycia 4—8 mln t/rok,

— głębokości do jakiej planowane było udostępnienie złoża 2300 m,



Rys. 5. Koszty eksploatacji (A) systemem komorowym i przeróbki rud (B) (wg Camma 1989)
 1 — bez poprawki na głębokość, 2 — z uwzględnieniem poprawki na głębokość, przy głębokości udostępnienia
 złoża do 2300 m, G — wzbogacanie grawitacyjne, F — trójstopniowa flotacja

Fig. 5. Block caving (A) and ore processing operating costs (B) (after Camm 1989)
 1 — without correction for depth, 2 — with correction factor for 2300 m depth, G — gravity enrichment,
 6 — three-product flotation

— kosztów eksploatacji przy założeniu stosowania metody komorowej,
 — kosztów przeróbki przyjętych jak dla wzbogacania grawitacyjnego i trójstopniowej flotacji,

i po przeliczeniu na ceny prognozowane (Price prospects...1993) można przyjąć, że łączny koszt wydobycia i przeróbki może wynosić około 25 \$/t rudy.

Można też oczekiwać, że rzeczywiste koszty eksploatacji i przeróbki w stosunku do oszacowanych w ten sposób mogą być wyższe ze względu na:

— konieczność prowadzenia eksploatacji selektywnej poszczególnych gatunków rudy wyróżnianych na podstawie zawartości TiO_2 ,

— bardziej złożony proces przeróbki rudy wymagającej odzysku V_2O_5 z koncentratu tytanomagnetytowego (np. prażenia z siarczanem lub chlorkiem sodu i ługowanie),

— konieczność ponoszenia nieodzownych kosztów ochrony środowiska i opłat za jego użytkowanie, nieuwzględnianych w przyjętym sposobie oszacowania kosztów wydobycia i przeróbki rudy.

Uzasadni to przyjęcie do dalszych obliczeń kosztów, dodatkowo powiększonych o co najmniej około 20%.

Przyjmując zatem szacowane koszty eksploatacji i przeróbki rudy w wysokości 25 \$/t powiększone o 20%, otrzymamy jako brzeźną zawartość ekwiwalentną V_2O_5 w rudzie:

$$P_{ev} = \frac{1,2(k_e + k_p)}{\eta(1 - \xi)C_c} \cdot 100 = \frac{1,2 \cdot 25}{0,65(1 - 0,1)7000} \cdot 100 = \frac{3000}{4095} = 0,73\%$$

Średnie zawartości TiO_2 i V_2O_5 wynoszą w złożu Krzemianka odpowiednio: 7,26% i 0,32% V_2O_5 . Odpowiada to ekwiwalentnej zawartości V_2O_5

$$[V_2O_5]_e = \frac{1,88C_i}{C_v} [TiO_2\%] + [V_2O_5\%] = \frac{1,88 \cdot 70}{7000} \cdot 7,26 + 0,32 = 0,46\%$$

przy przyjęciu prognozowanej i możliwej ceny ilmenitu 100 \$/t zawartość ekwiwalentna V_2O_5 wyniesie 0,52%

Uwzględniając w ocenie rudy także zawartość Fe, mimo zastrzeżeń odnośnie do użyteczności koncentratu magnetytowego uzyskamy dodatkową zawartość ekwiwalentną V_2O_5

$$P_{eFe} = \frac{(Fe\% - 0,69[TiO_2\%])C_{Fe}}{C_v} 100$$

gdzie:

- $Fe\%$ — całkowita zawartość Fe w rudzie (w magnetycie),
 $0,69 [TiO_2]$ — zawartość Fe związanego w ilmenicie (przy przyjęciu w uproszczeniu, że całość TiO_2 jest związana w ilmenicie),
 C_{Fe} — cena żelaza w rudzie 0,5 \$/ 1% Fe.

Ekwiwalentna średnia zawartość V_2O_5 w złożu, uwzględniająca łącznie zawartość TiO_2 i żelaza, wynosi:

$$[V_2O_5]_e = \frac{(Fe\% - 0,69[TiO_2\%])C_{Fe}}{C_v} + \frac{1,88C_i}{C_v} [TiO_2] + [V_2O_5\%] =$$

$$= \frac{(29,2 - 0,69 \cdot 7,26)30}{6000} + \frac{1,88 \cdot 70 \cdot 7,26}{7000} + 0,32 = 0,12 + 0,14 + 0,32 = 0,58\%$$

a przy cenie ilmenitu 100 \$/t, $[V_2O_5]_e = 0,64\%$.

W każdym rozpatrywanym wariantcie wyliczone średnie ekwiwalentne zawartości V_2O_5 w udokumentowanym złożu są zatem niższe od szacowanej brzeżnej zawartości bilansowej, którą należałoby przyjąć dla wyznaczenia konturów ciał rudnych.

Wyliczone kryteria bilansowości odnośnie do jakości rudy spełnia tylko znikoma część zasobów złóż Krzemianka i Udryń. Stanowią je najbogatsze partie złoża. Wielkość tych zasobów można oszacować na podstawie danych dotyczących rozkładu zasobów w zależności od zawartości Fe oraz korelacji między zawartością V_2O_5 oraz TiO_2 i Fe.

Zależność zawartości V_2O_5 i TiO_2 od zawartości Fe opisują równania regresji (Subieta 1979)

$$\% V_2O_5 = 0,01114 [Fe\%] - 0,0187$$

$$\% TiO_2 = 0,23196 [Fe\%] + 0,7033$$

uwzględniając przeliczenie zawartości TiO_2 na ekwiwalentną zawartość V_2O_5 otrzymamy łącznie dla obu składników

$$[\% V_2O_5]_e = 0,0155 [Fe\%] - 0,0055$$

Przy brzeżnej zawartości $V_2O_5 = 0,73\%$ wymagania bilansowości spełniać może tylko ruda o zawartości ponad 47% Fe. Stanowi ona poniżej 1% zasobów złóż Krzemianka i Udryń (tab. 5), to jest co najwyżej odpowiednio w tych złożach 11 i 3 mln ton. Mała wielkość zasobów, które można by uznać za bilansowe i forma ich występowania w postaci niewielkich odosobnionych ciał rudnych nie uzasadniają podejmowania budowy kopalni o głębokości ponad 1000 metrów i dokumentowania złoża jako bilansowe. Nie kwalifikują się one zatem do zagospodarowania ani obecnie, ani w dającej się przewidzieć przyszłości.

W 2001 r. Minister Środowiska wprowadził kryteria bilansowości dla złóż rud V-Ti-Fe (Rozporządzenie... 2001), w których na podstawie wcześniej wykonanej analizy (Nieć 1986) przyjęto maksymalną głębokość występowania złoża 500 m, a dla zasobów pozabilansowych 1500 m, oraz minimalną brzeżną ekwiwalentną zawartość V_2O_5 0,6%. Są to zatem kryteria łagodniejsze od wyliczonych obecnie, ale również dyskwalifikujące złoża Krzemianka i Udryń jako obiekt zagospodarowania.

TABELA 5

Rozkład zasobów rudy w złożach Krzemianka i Udryń w zależności od zawartości Fe (wg Subiety 1979)

TABLE 5

Ore resources distribution in relation to Fe content in ore (after Subiety 1979)

Przedział zawartości Fe [%]	Udział zasobów [%] w złożu	
	Krzemianka	Udryń
20—25	41,53	40,61
25—30	24,42	37,05
30—35	14,32	15,65
35—40	11,31	4,26
40—45	7,44	1,61
> 45	0,48	0,82

4. Uwarunkowania zagospodarowania złóż

Zapotrzebowanie na surowce Ti i V w drugiej połowie XX w. zaowocowało odkryciem i rozpoznaniem nowych złóż i nowych części znanych obszarów złożowych. Obecnie istnieją duże rezerwy zasobowe rud V i Ti, zapewniające pokrycie wieloletniego popytu na surowce tych metali. Światowe zasoby bilansowe (reserve base) wanadu wynoszą 38 mln ton a przemysłowe (reserves) 13 mln t (Mineral Commodity... 2003). Zasoby ilmenitu (w złożach okrucowych) oceniane są odpowiednio na 730 mln t (bilansowe — reserve base) i 420 mln (przemysłowe — reserves). Przy produkcji rocznej wanadu 60—70 tys. t i ilmenitu 4—5 mln t zasoby te zapewniają pokrycie zapotrzebowania na wanad przez około 200 lat, a na ilmenit ponad 80 lat. Istnieją też duże możliwości znacznego poszerzenia znanej bazy zasobowej rud wanadu, przede wszystkim w RPA dysponującej bogatymi (ponad 1% V_2O_5 w rudzie), płytko położonymi złożami wanadonośnych tytanomagnetytów w masywie Bushweldu i w kompleksie Rooiwater (Reynolds 1986). Znamienne jest też, że żelazo i tytan nie są w zasadzie pozyskiwane z tych złóż. Coraz większego znaczenia nabiera eksploatacja złóż w Chinach, gdzie produkcja wanadu w roku 2002 osiągnęła poziom 39 tys. t, wysuwając ten kraj na czoło jego producentów (Mineral Commodity... 2003).

Aktualna sytuacja światowej bazy zasobowej rud żelaza, tytanu i wanadu nie wskazuje, by w dającej się przewidzieć przyszłości mogły być przedmiotem zainteresowania jako źródło żelaza ubogie rudy tytanomagnetytowe, trudno wzbogacalne, dodatkowo położone na dużej głębokości.

Uruchomienie eksploatacji złóż masywu suwalskiego spowodowałoby wprowadzenie na rynek znacznych ilości V_2O_5 (około 21—22 tys. ton rocznie, według opracowywanych wcześniej projektów zagospodarowania złoża), co stanowiłoby około 1/3 obecnej podaży V_2O_5 . Prowadziłoby to nieuchronnie do obniżki cen tego surowca, a zatem wydatnego zmniejszenia

opłacalności jego eksploatacji, podobnie jak to ma miejsce obecnie po znaczącym wzroście jego podaży ze złóż chińskich. Nieobojętne dla oceny geologiczno-gospodarczej złóż suwalskich jest też występowanie na Litwie złoża wanadonośnych tytanomagnetytów „Varena”, płycej położonego, na głębokości 200—500 m, o zasobach około 500 mln t Fe i zawartości 0,4% V_2O_5 (Kepezhinskas 1996) oraz bardzo dużych okruchowych złóż ilmenitu na Ukrainie w rejonie Żytomierza, eksploatowanych sposobem odkrywkowym, a także bardzo dużego, płytko położonego złoża ilmenitowo-apatytowego w masywie Korostenskim w tym samym rejonie (Gurskij 2002).

Wnioski

Analiza uwarunkowań bilansowości złóż wanadonośnych rud tytanomagnetytowych masywu suwalskiego wskazuje, że nie ma podstaw do kwalifikacji ich zasobów do bilansowych z powodu:

- a) dużej głębokości występowania,
- b) niespełnienia wymagań odnośnie do jakości rudy.

Duża podaż surowców wanadu, tytanu i żelaza z płytko położonych złóż nie wskazuje też, by zagospodarowanie złóż tak głęboko położonych jak w masywie suwalskim mogło być przedmiotem zainteresowania w dającej się przewidywać przyszłości, a zatem nie ma nawet podstaw do uznania ich za pozabilansowe.

Wymagania ochrony środowiska były dotychczas podstawowym argumentem przeciwko zagospodarowaniu złóż masywu suwalskiego, których ewentualna eksploatacja jest oceniana jako wybitnie konfliktowa. Przedstawiona ocena geologiczno-gospodarcza złóż masywu suwalskiego, wskazuje że ich zagospodarowanie jest zarówno obecnie, jak i w dającej się przewidzieć przyszłości nierealne. Należy je traktować jako interesujący obiekt geologiczny, nie posiadający znaczenia praktycznego. Priorytet wymagań ochrony środowiska w regionie suwalskim w stosunku do gospodarczego wykorzystania złóż jest w związku z tym niezagrożony.

LITERATURA

- An Appraisal of Minerals Availability for 34 Commodities. US Bureau of Mines Bull. 692. 1987
- Astrup J., Hammerbeck E.C.J., van den Berg H., 1998 — Iron. In: Wilson M.G.C., Anhaeuser C.R. (ed.), Mineral resources of South Africa. Council for Geoscience. Hb. 16, Cape Town.
- Bolewski A., Ney R., Smakowski T. red., 2001 — Bilans gospodarki surowcami mineralnymi w Polsce na tle gospodarki światowej 1996—2000. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- Borisenko Ł.F., 1983 — Rudy wanaduja. Izd. Nedra, Moskwa.
- Cam T.W., 1989 — Simplified cost model for prefeasibility mineral evaluation. USBM Inf. Circ. 9298.
- Cawthorn R.G., Molyneux T.G., 1986 — Vanadiferous magnetite deposits of the Bushveld Complex. In: Anhaeuser C.R., Maske S. (eds.), Mineral deposits of Southern Africa. Geol. Surv. of Southern Africa. vol. 1, p. 451—460.
- CUG, 1976 — Wytyczne określania kryteriów bilansowości zasobów geologicznych złóż kopalin stałych. CUG, Wyd. Geol., Warszawa.

- Dobrijałowska A., 1986 — Górnico-geologiczna charakterystyka zmienności mineralizacji złoża Krzemianka. Praca dypl. AGH IHGI, Kraków (maszynop.).
- Force E.R., 1986 — Descriptive model of anorthosite Ti. In: W: Cox D. Singer J. (ed.), Mineral deposit models. USGS Bull. 1618.
- Gambogi J.M., 1995 — Titanium. Eng. Min. Journ. nr 3, p. 60—61.
- Garnar T.E., Stanaway K.J., 1994 — Titanium minerals. In: Industrial Minerals and Rocks. SME Littleton, p. 1071—1089.
- Grohmann G., 1991 — Vanadium. South Africa's Mineral Industry 1990.. Minerals Bureau. Braamfontein, p. 119—123.
- Grohmann G., 1993 — Vanadium. South Africa's Mineral Industry 1992/93. Minerals Bureau. Braamfontein, p. 68—70.
- Grohmann G., Nell J.G., 1991 — Iron Ore. South Africa's Minerals Industry, 1990. Bureau of Mines. Braamfontein. p. 89—92.
- Gruszczyk H., Nieć M., Paulio A., 1975 — Projekt rozpoznania złoża rud żelaza „Krzemianka” w trakcie jego udostępnienia i eksploatacji. BIPRORUD, Częstochowa, IGiSM — AGH, Kraków (maszynop.).
- Gustkiewicz S.M., 1985 — Zmiany na światowym rynku stali i rud żelaza. Gosp. Sur. Min. t. 1, z. 2, s. 333—338.
- Gurskij D.S., 2002 — Main types of rock complexes and mineral deposits in the Ukrainian shield. Geol. Exc. Guidebook. Ukr. State Geol. Surv., Kyiv.
- Hilliard H.E., 1994 — Vanadium. Mineral Industry Surveys. USBM Annual Review.
- Kepezhinskis K., 1996 — Varena magnetite deposit, Lithuania (Southern Baltica Region) as the Hongge type layered magma chambers. 30-th Int. Geol. Congress. Abstracts vol. 2, Beijing, p. 659.
- Kozłowski S., 1983 — Ekologiczne konsekwencje planowanej kopalni i zakładu przerobczego rud polimetalicznych na Suwalszczyźnie. Nauka Polska nr 1—2.
- Kozłowski S., 1986 — Ocena wpływu budowy kopalni Krzemianka i zakładu przerobczego na środowisko. Biul. KPZK, PWN.
- Kozłowski S., 1993 — Gospodarowanie środowiskiem przyrodniczym na Suwalszczyźnie. Trzy wizje. Przegl. Geol. t. 41, nr 8, s. 578—582.
- Mineral Commodity Summaries. US Geol. Surv. Washington D. C., 2003.
- Mineral deposits of China. Geol. Publ. House. Beijing 1998, vol. 3, p. 21—31.
- Nieć M., 1996 — Kryteria bilansowości dla geologicznego dokumentowania złóż wanadonośnych rud tytanomagnetytowych. CPPGSMiE PAN Kraków (maszynop.).
- Nieć M., 2002 — Geological criteria defining mineral deposits. Gosp. Sur. Min. t. 18, z. 4, s. 5—19.
- Nieć M. red. (1994) — Zalecane kryteria bilansowości złóż kopalni. Kom. Zasobów Kopalni MOŚZNiL, Warszawa.
- Ostrowski J., 1988 — Przewidywane konsekwencje wywołane budową kopalni i zakładu wzbogacania Krzemianka. W: Ochrona środowiska przyrodniczego przed wpływami przemysłu wydobywczego na przykładzie Suwalszczyzny. CPBP 04.10. Szczecin—Suwałki, s. 58—79.
- Osika R., Subieta M., Smoleński S., 1970 — Złoże rud wanadowo-ilmenitowo-magnetytowe Otanmäki w porównaniu z analogicznym złożem na Suwalszczyźnie oraz uwagi dotyczące prospekcji geologicznej w Finlandii. Przegl. Geol. nr 4, s. 195—200.
- Page N.J., 1986 — Descriptive model of Bushveld Fe-Ti-V. I In: Cox D. Singer J. (ed.), Mineral Deposit models. USGS Bull. 1618.
- Parecka K., Sylwestrzak U., 1984 — Dodatek nr 3 do dokumentacji geologicznej złoża rud żelaza, tytanu i wanadu w kat. C₂ + C₁ Krzemianka. Przeds. Geol., Warszawa (maszynop.).
- Parecki A., 1977 — Dokumentacja geologiczna złoża rud żelaza, tytanu i wanadu w kat. C₂ + C₁ Krzemianka. Przeds. Geol., Warszawa (maszynop.).
- Parecki A., 1993 — Historia udokumentowania złoża Krzemianka. Przegl. Geol. t. 41, nr 8, 558—564.
- Parecki A., 1998 — Geological structure of the Krzemianka and Udryn deposits. Prace PIG, 161, s. 125—135.
- Paulo A., Radwanek-Bąk B., 1996 — Surowce mineralne w krajach b. ZSRR i ich wykorzystanie: Rosja (cz. II). Przegl. Geol. t. 44, nr 4. s. 331—342.
- Paulo A., Strzelska-Smakowska B., 1993 — Rudy metali. t 1. Skrypt ucz. AGH nr 1341, Kraków.
- Podemski M., Kurbiel H., 1988 — Ocena złóż rud Fe i Ti Suwalszczyzny. W: Ochrona środowiska przyrodniczego przed wpływami przemysłu wydobywczego na przykładzie Suwalszczyzny. CPBP 04.10. Szczecin—Suwałki, s. 31—42.

- Podobiński A., 1989 — Rudy żelaza na rynku światowym. *Gosp. Sur. Min.* t. 5, z. 3, s. 617–626.
- Price prospects for major primary commodities 1990—2005. The World Bank, Washington 1993.
- Przeniośło S., 1995 — Rudy żelaza. Bilans zasobów kopalni i wód podziemnych w Polsce. *PIG*, Warszawa, s. 78—80.
- Reynolds I. M., 1986 — Vanadiumbearing titaniferous iron ores of the Rooiwater complex North-Eastern Transvaal. In: Anhaeusser C. R., Maske S. (eds.), *Mineral deposits of Southern Africa*. vol. I, p. 451—460.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dn. 18 grudnia 2001 w sprawie kryteriów bilansowości złóż kopalni. *Dz.U.* nr 13, poz. 1774.
- Schürman L.W., Marsh S., 1998 — Vanadium. In: *Mineral resources of South Africa*. Council for Geoscience, Handbook 16, Pretoria, p. 659—665.
- Siemiątkowski J., 1998 — The ilmenite-magnetite deposit Krzemianka in northern Poland. Brief history of discovery and exploration. *Kwart. Geol.* nr 4, s. 443—450.
- Sikora W., Szczurowski A., Sztelak J., Chudek M., 1987 — Optymalny model projektowanej kopalni rud żelaza Krzemianka. *Przegl. Górni.*, nr 3, 1—10.
- Sprawocznik po rudach czarnych metali dla geologów. *Niedra*, Moskwa, 1985.
- Subieta M., 1979 — Suwalskie złoża rud żelaza, tytanu i wanadu. *Prace IG*, Warszawa.
- Surowce mineralne świata. Wanad-V, Tytan-Ti, Cyrkon-Zr, Hafn-Hf. *Wyd. Geol.*, Warszawa, 1982.
- Szczurowski A., Uljasz J., 1988 — Nowa koncepcja górniczego udostępnienia złoża „Krzemianka”. W: *Ochrona środowiska przyrodniczego przed wpływami przemysłu wydobywczego na przykładzie Suwalszczyzny*. CPBP 04.10. Szczecin-Suwałki, s. 43—57.
- Szuwarczyński M., 1991 — Koreferat do dokumentacji geologicznej „Dodatek nr 3 do dokumentacji geologicznej w kategorii C₁ + C₂ złoża rudy żelaza, tytanu i wanadu „Krzemianka”. *KZK — MOŚNiL*, Warszawa (maszynop.).
- The World Bank, 1993 — Price prospects for major primary commodities 1990—2005. Washington D.C.
- Tomaszewski J., Ostrowski J., Osadczuk A., 1988 — Propozycje ograniczenia szkodliwego wpływu planowanych inwestycji górniczych na środowisko przyrodnicze Suwalszczyzny. W: *Ochrona środowiska przyrodniczego przed wpływami przemysłu wydobywczego na przykładzie Suwalszczyzny*. CPBP 04.10. Szczecin-Suwałki. s. 79—91.
- Wanielista K., 1995 — *Rachunek ekonomiczny w gospodarce zasobami kopalni*. Śląskie Wyd. Techn.
- Wilson H.D.B. ed., 1969 — *Magmatic ore deposits*. *Econ. Geol., Publ. Comp.*
- Wipplinger P.E., 1998 — Titanium. In: Wilson M.G.C., Anhaeusser C.R. (ed.), *Mineral resources of South Africa*. Council for Geoscience. Hb. 16, Cape Town.
- Wiszniewska J., 1993 — Złoże rudy ilmenitowo-magnetytowej Udryń (Suwalski masyw anortozytowy) *Przegl. Geol.* t. 41, nr 8 (484), s. 565—567.
- Zabierowski J., Jawień M., Głodzik S., 1986 — Analiza przydatności dokumentacji geologicznej dla potrzeb projektowania górniczego na przykładzie złoża „Krzemianka”. *CPBR 1.7.07 PAN CPPGSMiE, IHGI AGH*, Kraków (maszynop.).
- Znosko J., 1993 — Jak odkryto suwalskie magnetyty. *Przegl. Geol.* r. 41, nr 8 (484), s. 552—558.

GEO-ECONOMIC EVALUATION OF VANADIFEROUS TITANOMAGNETITE DEPOSITS IN SUWAŁKI MASSIF IN POLAND

Key words

Vanadium, titanomagnetite deposits, Suwałki massif, Poland

Abstract

During the period from 1960 to 1990 yr, as a result of systematic geological prospecting and exploration, the huge vanadiferous titanomagnetite deposits were discovered and evaluated. The set of criteria (balance criteria), introduced in 1974 yr. were used for deposit delineation and resources calculation. The deposits are located at 800—2300 m depth, has 1.34 billion t resources of ore with average 28% Fe, 7% TiO_2 and 0,3% V_2O_5 content. The proposal and design of mine construction had caused strong opposition because of environment protection in Suwałki — Augustow Lake District where the deposits are located. The deposits were discovered in time of increasing demand for vanadium, titanium and iron, the both on international market and in Poland for expanding metallurgy. It promoted exploration and optimistic opinion on deposit value. In the same time however has increased exigencies for iron ore quality and vanadiferous titanomagnetite deposits located close to the surface in South Africa has become the main vanadium supplier to the market. It make necessary to revise the preliminary optimistic deposit evaluations. Titanomagnetite ores are seldom interesting as a source of titanium and iron because of composed technology of their enrichment and metallurgical processing and vague profitability of their extraction. The vanadium is the main valuable component of the ore. The forecasted costs of mining and ore processing and forecasted prices of V_2O_5 , ilmenite and magnetite concentrate allow to calculate the cut off equivalent V_2O_5 content which should be used for deposit delineation. It is 0.73% V_2O_5 . Only 1% of previously indicated ore reserves fulfill that requirement. Comparative analysis of Suwałki deposits with other vanadiferous titanomagnetite deposits recently mined allow to demonstrate that small amount of resources which could be supposed economic, located at great depth, make the deposit not interesting for mining as well at present as in the anticipated future. The environment protection is therefore not threatened. The deposits are interesting geological phenomena without practical value at present.