

ALKALICZNA INTRUZJA SYENITOWA MŁAWY A PERSPEKTYWY WYSTĘPOWANIA PIERWIĄSKÓW ZIEM RZADKICH

THE MŁAWA SYENITE ALKALINE INTRUSION – A PERSPECTIVE OF RARE EARTH ELEMENTS OCCURRENCE

EWA KRZEMIŃSKA¹, LESZEK KRZEMIŃSKI¹

Abstrakt. Obecność kilku alkalicznych i alkaliczno-ultramaficznych ciał w obrębie zakrytego podłoża kratonu wschodnioeuropejskiego na obszarze północno-wschodniej Polski była znana od dawna, na podstawie badań geofizycznych, jako wyraźne anomalie Ełku, Pisz, Tajna i Mławy. Jedynie cztery głębokie otwory wiertnicze na peryferiach anomalii Mławy (Płońsk IG 2A/2, Ciechanów 1, Konopki Wielkie 1 i Gradzanowo 2) odsłoniły syenity i kwarcowe syenity. Metaluminowe, bogate w pierwiastki ziem rzadkich (REE) i Zr syenity Mławy są względnie późnym produktem procesów frakcjonowania magmy. Analizy chemiczne w mikroobszarze potwierdziły obecność pierwotnych fluorowęglanów REE (bastnäsyty, parisyty) i obfitość cyrkonu jako faz bogatych w REE i Zr w syenitach. Istotna koncentracja minerałów nośników REE ma genetyczne i przestrzenne związki ze skałami alkalicznymi, dlatego intruzja Mławy powinna być obiektem dalszych badań.

Słowa kluczowe: bastnäsyty, pierwiastki ziem rzadkich (REE), intruzje alkaliczne, kraton wschodnioeuropejski.

Abstract. A number of alkaline and alkaline-ultramafic bodies have been known within the hidden basement of the East European Craton (EEC) in north-western Poland for a long time. These are the strong anomalies of Ełk, Pisz, Tajno and Mława identified based on a geophysical survey. Syenite and quartz syenites, were drilled by only four deep boreholes on the periphery of the Mława anomaly (Płońsk IG 2A/2, Ciechanów 1, Konopki Wielkie and Gradzanowo 2). The REE- and Zr-rich Mława metaluminous syenites are relatively late-stage products of fractionation processes. Electron microprobe analyses confirm primary-appearing REE-fluorocarbonate (bastnäsite–parisite) and zircon abundance as major host phases to REE and Zr in the syenites. A significant concentration of the REE-bearing minerals shows a genetic and spatial relation to an alkaline rocks, therefore the Mława igneous bodies should be the subject of further investigations.

Key words: bastnäsyty, rare earth elements (REE), alkaline intrusion, East European Craton.

WSTĘP

Pierwiastki ziem rzadkich (REE), czyli: metale grupy lantanowców, itr i skand, które w znacznym stopniu są podstawą rozwoju przemysłu elektronicznego i motoryzacji, w ciągu ostatnich dziesięciu lat stały się surowcem strategicznym. Nie mają substytutu, a ich znaczenie stale wzrasta, ze względu na skalę zastosowania w przemyśle, stąd REE znajdują się w grupie surowców krytycznych. Termin ten

został wprowadzony w 2008 r. w gospodarce Stanów Zjednoczonych (*Committee on Critical Mineral Impacts on the US Economy*, 2008), a następnie przyjęty przez kraje Unii Europejskiej. Do kategorii najbardziej krytycznych dla gospodarki UE zaliczono 14 surowców o istotnym znaczeniu ekonomicznym i charakteryzujących się wysokim ryzykiem niedoboru, który wynika z ograniczonej ilości źródeł.

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-795 Warszawa; e-mail: ewa.krzeminska@pgi.gov.pl; leszek.krzeminski@pgi.gov.pl

Według szacunków amerykańskich, globalne zasoby metali ziem rzadkich oscylują wokół 110 mln ton RE_2O_3 , z czego około połowa przypada na terytorium Mongolii Wewnętrznej, należącej do Chin. Z tego regionu pochodzi obecnie 97% światowych dostaw, co praktycznie oznacza chiński monopol w tej dziedzinie górnictwa, panujący od końca lat 90. Większość surowców REE jest wydobywana w ogromnej kopalni odkrywkowej w Bayan Obo (razem z rudami żelaza i niobu), a ponadto w Yangdun, Miaoya i Wajiertage (Wu i in., 1996).

Chińskie endogeniczne złoża REE reprezentują dwa typy genetyczne: (1) karbonatytowe oraz (2) występujące w asocjacji z krzemianowymi skałami alkalicznymi, jak kwarcowe syenity^{2, 3}, granity alkaliczne i nordmarkity. Chociaż różnią się wiekiem i szczegółowymi uwarunkowaniami geologicznymi, są rozlokowane na krawędziach kratonów prekambryjskich lub pasów orogenicznych, wykazując przywiązanie do głównych stref uskokowych wzdłuż północnej krawędzi kratonu chińsko-koreańskiego i Tarim (*op. cit.*). W karbonatytowym złożu Bayan Obo z żyłami barytowo-kalcytowo-bastnäsytowymi, minerałem o znaczeniu ekonomicznym jest bastnäsyt (75% RE_2O_3), ale w tej asocjacji występują także monacyt (65% RE_2O_3), allanit (38% RE_2O_3), pirochlor, czewkinit, kolumbit i toryt. W tym rejonie eksploatowane są: bastnäsyt, monacyt i koncentrat Fe-REE.

W zbliżonym kontekście geologicznym, na obszarze prekambryjskiego kratonu wschodnioeuropejskiego, w północno-wschodniej części tarczy bałtyckiej występuje jedna z najbardziej znanych stref mineralizacji REE, jaką jest alkaliczno-karbonatytowa prowincja półwyspu Kola, ze złożami Łowo-

ziero, Chibiny i szeregiem mniejszych kompleksów. W magmowej prowincji półwyspu Kola udokumentowano występowanie ponad 70 rzadkich i bardziej pospolitych faz mineralnych: krzemianów, tlenków, fosforanów, węglanów REE (Belolipetskii, Voloshin, 1996). Istotną ekonomicznie jest mineralizacja Li, Cs, Be, Nb, Ta, Zr i Y.

Większość ekonomicznie znaczących złóż REE towarzyszy alkalicznym skałom magmowym i karbonatytom. Z 296 pierwotnych złóż REE, odnotowanych w raporcie Brytyjskiej Służby Geologicznej (*British Geological Survey, NERC, 2011*), 41% genetycznie jest związanych ze skałami alkalicznymi, a 36% z karbonatytami. Pozostałe należą do złóż typu hydrotermalnego, nie związanych ze skałami alkalicznymi (21%) i do złóż typu Fe-Cu-Au (1,4%).

Polska nie ma własnych zasobów surowcowych REE. Wystąpienia pierwiastków ziem rzadkich notowane na Dolnym Śląsku (okolice Szklarskiej Poręby i Markocic) nie mają aktualnie charakteru złożowego (Radwanek-Bąk, 2011). W dalszej perspektywie ich ocena złożowa wymaga badań. Wzrasta jednocześnie znaczenie intruzji alkalicznych, wykorzystujących głębokie rozłamy i strefy nieciągłości na krawędziach prekambryjskich kratonów. Dlatego warto zwrócić uwagę na tego typu wystąpienia skał alkalicznych, jako potencjalne nośniki tych cennych pierwiastków. W niniejszym artykule opisano charakterystyczne cechy geochemiczne skał późnopaleozoicznych intruzji alkalicznych w brzeżnej strefie polskiej części kratonu wschodnioeuropejskiego, które w przyszłości powinny być obiektem dalszej geologicznej penetracji.

KONTEKST GEOLOGICZNY

Szereg badaczy zwracało uwagę na analogie między paleozoicznymi intruzjami alkalicznymi i alkaliczno-ultramaficznymi z karbonatytami w polskiej części kratonu wschodnioeuropejskiego a późnodewońską alkaliczno-karbonatytową prowincją półwyspu Kola (KACP) (np. Juskowiak, 1973; Dziedzic, 1973; Krystkiewicz, Krzemiński, 1992; Demaiffe i in., 2005; Krzemiński, 2007). Dla KACP, na którą składa się około 20 kompleksów, charakterystyczne są: (1) prymitywne, niedosycone krzemionką magmy krzemianowe o pochodzeniu płaszczowym; (2) kumulaty oliwinowe i piroksenowe; (3) silnie frakcjonowane alkaliczne i nefelinowe syenity oraz (4) karbonatyty i foskoryty. Syenity prowincji kolskiej są reprezentowane przez plutony Chibiny i Łowoziero oraz intruzje Kurga i Niwa, stanowiące łącznie 70% objętościowych KACP (Downes i in., 2005 i cyt. tamże). Największy z nich masyw Chibiny (pow. 1327 km²) jest wielofazową intruzją, tworzącą koncentryczną strukturę pierścieniową. Jej peryferyczną strefę stanowią alkaliczne syenity, otwierające drogę dla różnych typów syenitów nefeli-

nowych, po których intrudowały ijolity i melanefeliny (np. Kogarko, 1987). Kontakty między poszczególnymi typami skał są z reguły stopniowe.

Istnienie w podłożu krystalicznym Polski kilku alkalicznych ciał magmowych przykrytych osadami fanerozoicznymi zostało udokumentowane regionalnymi zdjęciami magnetycznymi i grawimetrycznymi już w połowie lat 50. XX wieku (Kubicki, Ryka, 1982). Ich obecność była stopniowo potwierdzana wykonanymi otworami wiertniczymi. Jako jedna z pierwszych, w 1955 r. została rozpoznana ujemna magnetyczna i grawimetryczna anomalia pierścieniowa Ełku, która odzwierciedla obecność na głębokości poniżej 700–800 m dużego ciała magmowego (pow. 400 km²), znanego obecnie jako syenitowa intruzja ełcka (Ryka, 1994). Skały alkaliczne o charakterze platformowym występują ponadto w gabrowo-syenitowej intruzji Piskiej, w niewielkim piroksenitowo-syenitowo-karbonatytowym kompleksie Tajna oraz w najśląbiej spenetrowanej wierceniami intruzji mławskiej.

² Pisownia według „Słownika Petrograficznego” pod redakcją W. Ryki i A. Maliszewskiej (1991). Wyd. Geol., Warszawa (przypis redakcji)

³ Sjienity – zgodnie z zasadami pisowni języka polskiego według „Nowego Słownika ortograficznego z zasadami pisowni i interpunkcji” pod redakcją E. Polańskiego (2003), Wyd. Nauk. PWN, Warszawa (przypis redakcji)

SYENITOWA INTRUZJA MŁAWY

Hipoteza o występowaniu w okolicach Mławy masywu syenitowego została sformułowana na podstawie badań geofizycznych (Wybraniec, Cordell, 1994). Bardziej precyzyjny obraz anomalii Bouguera (Wybraniec, 2007) pokazuje jednak, że wszystkie cztery otwory wiertnicze (Ciechanów 1, Gradzanowo 2, Konopki Wielkie 1, Płońsk IG 2A/2) są zlo-

kalizowane na peryferiach anomalii i nie penetrują wnętrza głównego ciała zaburzającego. Prawdopodobnie zatem, nie ma pełnego obrazu typów petrograficznych i geochemicznych, tworzących ciało magmowe na tym rozległym obszarze w rejonie Mławy (fig. 1).

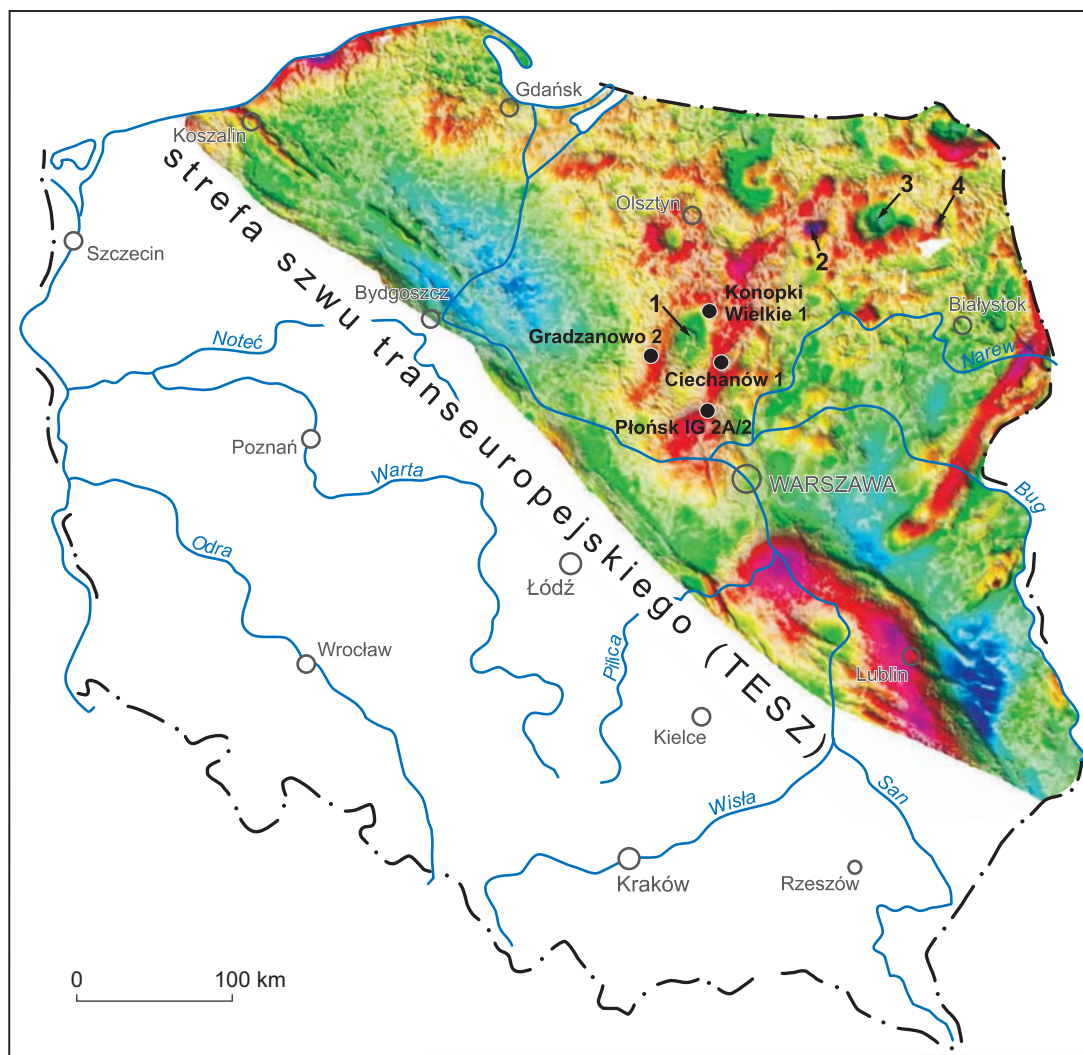


Fig. 1. Paleozoiczne intruzje alkaliczne Mławy, Pisz i Elku oraz paleozoiczna alkaliczno-ultramaficzna intruzja Tajna na tle transformowanego obrazu lokalnych anomalii Bouguera (z nałożoną rzeźbą cieniowaną oświetloną z południowego wschodu) polskiej części kratonu wschodnioeuropejskiego (wg Wybraniec, 2007)

Otwory wiertnicze: Konopki Wielkie 1, Gradzanowo 2, Ciechanów 1, Płońsk IG 2A/2; intruzje: 1 – Mławy, 2 – Pisz, 3 – Elk, 4 – Tajna; kolory niebieskie i zielone oznaczają ujemne anomalie grawimetryczne, natomiast pomarańczowe i czerwone do fioletowych – anomalie dodatnie

Paleozoic alkaline intrusions of Mława, Pisz and Elk and alkaline-ultramafic Tajno complex on the background of transformed image of local Bouguer anomalies (with superimposed shaded relief illuminated from the southwest) of the Polish part of the East European Craton (after Wybraniec, 2007)

Boreholes: Konopki Wielkie 1, Gradzanowo 2, Ciechanów 1, Płońsk IG 2A/2; intrusions: 1 – Mława, 2 – Pisz, 3 – Elk, 4 – Tajno; blue and green colours indicate negative gravity anomalies, whereas orange and red to violet colours denote gravity highs

Skały z peryferii intruzji to średnio- i drobnoziarniste, umiarkowanie alkaliczne syenity (suma alkaliów ok. 10% wag.) z niewielką zawartością kwarcu, a także subwulkaniczne ryolity. W wierceniach nie zostały udokumentowane niedosycone krzemionką odmiany foidowe. W składzie mineralnym przeważają skaleni reprezentowane przez albit (na pograniczu z oligoklazem) i skażeń potasowy. Brak jest ciemnych minerałów alkalicznych. Obecność składników maficznych jest ograniczona do klinopiroksenu, który zachował się tylko lokalnie. Biotyt jest obecny w ilości śladowej, ponieważ większa część Al_2O_3 jest związana w skałkach. Wśród minerałów akcesorycznych wyraźnie dominuje cyrkon. Tworzy on duże, automorficzne ziarna i agregaty wydłużonych kryształów pomiędzy tabliczkami skałeni al-

kalicznych. Niekiedy zawiera jądra zbudowane z ksenotyemu, a także nieliczne wrostki barytu. Obfitość automorficznych kryształów cyrkonu jest dość powszechna w całym środkowym interwale dajki syenitowej, a najbardziej okazałe ziarna i agregaty zanotowano na głębokości 3414, 3418 i 3429 m. Wśród drobnokrystalicznych skałeni są widoczne rozproszone fluorowęglany ziem rzadkich (bastnäsyty, parisyty). Minerale akcesoryczne reprezentują apatyt, monacyt oraz inne fosforany, baddeleyit i allanit. Taki skład mineralny ma związek z wyjątkowo wysoką zawartością Zr (otwory wiertnicze: Płońsk IG 2A/2 – 623–1134 ppm, Konopki Wielkie 1– 1820 ppm) oraz sumy pierwiastków ziem rzadkich (335–1517 ppm).

CECHY GEOCHEMICZNE

W najdłuższym i najlepiej zachowanym profilu wiertniczym rejonu anomalii Mławy (otwór wiertniczy Płońsk IG 2A/2, głęb. 3302–3484 oraz 3798–3799,3 m) występują trzy typy skał hipabisalnych: (1) względnie słabo zdyferencjowany diabaz (wskaźnik dyferencjacji D.I. = 58), o składzie gabra; (2) silnie zdyferencjowane i wzajemnie pokrewne średnioziarniste syenity i kwarcowe syenity (D.I. = 81–85) oraz (3) najsilniej zdyferencjowane kwarcowe syenity drobnoziarniste z nielicznymi fenokryształami skałeni (D.I. = 91–93). W spagu występują także formy subwulkaniczne w postaci trachitu.

Skały z peryferii intruzji Mławy są bogatsze w potas niż w sód (stosunek $K_2O/Na_2O > 1,0-1,5$). Dość charakterystyczną cechą syenitów są podwyższone zawartości pierwiastków o wysokim potencjale jonowym (HFSE), dobrze widoczne na przykładzie cyrkonu i itru oraz w mniejszym stopniu także niobu. Maksymalne koncentracje pierwiastka cyrkonu dochodzą do $Zr = 1134$ ppm w profilu Płońsk IG 2A/2 oraz $Zr = 1820$ ppm w profilu Konopki Wielkie 1. W przypadku niobu stwierdzono ilości w granicach od 60 do 224 ppm. Pierwiastki ziem rzadkich również wykazują dość znaczące koncentracje, szczególnie lekkie pierwiastki ziem rzadkich (LREE), w tym La do 386 ppm i Ce do 718 ppm, przy sumie REE od 584 do 1418 ppm.

Istnieje bliskie pokrewieństwo dwóch podstawowych odmian skał w profilu otworu wiertniczego Płońsk IG 2A/2, tzn. średnioziarnistych syenitów i kwarcowych syenitów, co dobrze dokumentują charakterystyki pierwiastków ziem rzadkich normalizowane do chondrytu oraz śladowych pierwiastków niedopasowanych normalizowane do pierwotnego płaszczka. Są to skały silnie, chociaż w różnym stopniu, zdyferencjowane,ubożone w fosfor i tytan w wyniku frakcjonowania wcześniej krystalizujących minerałów maficznych, takich jak: piroksen, tytanomagnetyt, tytanit i apatyt, oraz silnie ubożone w stront i w mniejszym stopniu w bar, w wy-

niku frakcjonowania plagioklazów i skałeni potasowego. Należą one do jednej serii magmowej, będącej produktem frakcjonalnej krystalizacji wspólnej magmy macierzystej, przy czym człon syenitowy reprezentuje wcześniejszą fazę ewolucji magmy, natomiast kwarcowe syenity reprezentują etap bardziej zaawansowanego różnicowania stopu.

Drobnoziarnista odmiana kwarcowych syenitów, w porównaniu z odmianą średnioziarnistą o analogicznym składzie podstawowym, wyróżnia się nieco większą zawartością SiO_2 przy mniejszych koncentracjach Fe_2O_{3T} , TiO_2 i P_2O_5 , wskazujących na silniejsze frakcjonowanie minerałów ciemnych (piroksen, tytanomagnetyt, tytanit, apatyt) w trakcie ewolucji ich magmy macierzystej. Znaczniejsze różnice zaznaczają się w koncentracjach niektórych pierwiastków śladowych. Odmiana drobnoziarnista jest znacznie silniej zubożona w Ba i jednocześnie silniej wzbogacona w LREE i pośrednie pierwiastki ziem rzadkich (MREE) (z wyjątkiem Eu), co jest związane z silniejszym frakcjonowaniem pierwiastków ziem rzadkich, a także w Nb, Th i Zr.

Geochemiczne zróżnicowanie dwóch odmian strukturalnych kwarcowych syenitów w profilu otworu wiertniczego Płońsk IG 2A/2 ilustruje zestawienie istotnych parametrów składu (tab. 1).

Powyższe cechy składu kwarcowych syenitów w ich odmianie drobnoziarnistej są wśród skał z peryferyjnej strefy anomalii mławskiej oznaką największego zaawansowania procesu frakcjonalnej krystalizacji. Byłyby one zatem produktem późnej fazy ewolucji stopów. Biorąc pod uwagę tylko zawartość Ba i Sr, syenity i kwarcowe syenity intruzji mławskiej są w podobnym stopniu zdyferencjowane jak niektóre syenity z profilu otworu wiertniczego Ełk IG 4 (por. Armbrustmacher, Modreski, 1994). Przy podobnej zawartości normatywnych skałeni może to wskazywać na inny skład magm macierzystych w obu rejonach magmowych.

Tabela 1

Różnice geochemiczne dwóch odmian strukturalnych kwarcowych syenitów z profilu otworu wiertniczego Płońsk IG 2A/2

Geochemical differences between two textural types of the quartz syenite Płońsk IG 2A/2 borehole

Q-syenity średnioziarniste	Q-syenity drobnoziarniste
SiO ₂ = 63,2–64,2% wag.	SiO ₂ > 68% wag.
Fe ₂ O _{3T} = 8,0–9,0%	Fe ₂ O _{3T} = 4,2–5,3%
TiO ₂ = 0,40–0,43%	TiO ₂ = 0,26–0,28%
P ₂ O ₅ = 0,079–0,090%	P ₂ O ₅ = 0,031–0,043%
D.I. = 85–87	D.I. = 91–93
suma REE = 578–754 ppm	suma REE = 1384–1517 ppm
Ce = 260–340 ppm	Ce = 640–700 ppm
Eu/Eu* = 0,72–0,64	Eu/Eu* = 0,20–0,23
(La/Yb) _N = 18–30	(La/Yb) _N = 45–61
(La/Gd) _N = 7–8	(La/Gd) _N = 12–13
Ba = 318–279 ppm	Ba = 40–14 ppm
Th = 10–12 ppm	Th = 21–28 ppm
Nb = 69–79 ppm	Nb ? 145 ppm
Zr = 749–972 ppm	Zr = 1038–1134 ppm

D.I. – wskaźnik stopnia zdyferencjowania (Thornton, Tuttle, 1960)

D.I. – differentiation factor (Thornton, Tuttle, 1960)

POKREWIEŃSTWO GENETYCZNE Z PROWINCJĄ KOLSKĄ

Wydaje się, że wszystkie magmy alkaliczno-karbonatowej prowincji półwyspu Kola (KACP) były generowane w wyniku jednego zasadniczego epizodu magmowego, a więc w ścisłym, genetycznym powiązaniu. Do utworzenia szerokiego spektrum prymitywnych magm, od melilitytów, poprzez malanefeliny, damkjernity, ultramaficzne lamprofiry, do karbonatytów i kimberlitów, doprowadziły różne stopnie bardzo słabego parcjalnego topienia granatowego perydotytu płaszczu. Wśród dyskutowanych teorii petrogenetycznych dla magmatyzmu KACP rozważa się także dopływ gorącego materiału z pióropusza płaszczu (*mantle plume*), pod archaiczno-proterozoiczną zmetasomatyżowaną litosferę północnej części tarczy bałtyckiej (Downes i in., 2005). Genezę związaną z pióropuszem płaszczu sugeruje systematyka izotopowa helu.

Rodzaj skał magmowych w peryferyjnej strefie intruzji mławskiej (a także w intruzji ełckiej) może wskazywać dla ich stopów pierwotnych podobnie niski stopień parcjalnego topienia wzbogaconego źródła płaszczowego. Analizy geochemiczne kompleksu Tajna wykazały, że jego magma pierwotna, o składzie oliwinowego melanefelinitu, była generowana z dość silnie wzbogaconego w pierwiastki niedopasowane źródła o składzie granatowego lherzolititu, przy niskim stopniu topienia parcjalnego na poziomie 2–3% (Krzeniński, 2006, 2007). Nieznany pozostaje mechanizm prowadzący do wygenerowania i uruchomienia alkalicznych magm pierwotnych ze zmetasomatyżowanego płaszczu i utworzenia kilku alkalicznych i alkaliczno-ultramaficznych kompleksów w południowo-zachodniej części Fennoskandii (w tym północno-wschodnia Polska).

Rekonstrukcje paleogeograficzne wskazują, że Fenno-skandia, jako integralna część Baltiki, była w dewonie usytuowana na półkuli południowej i migrowała w kierunku północnym (Torsvik i in., 1996), przechodząc nad stacjonarnym pióropuszem płaszcza (Downes i in., 2005). Podobny

mechanizm 40–30 mln lat później (turnej-wizen), mógł zainicjować aktywność magmową w południowo-zachodniej części przesuwającej się na północ Baltiki, w rejonie Tajna, Ełku, Pizsa i być może Mławy.

PODSUMOWANIE

W rejonie geofizycznej anomalii Mławy jest bezpośrednio udokumentowana tylko peryferyjna część intruzji alkalicznej i dość wąskie spektrum skał (syenity i kwarcowe syenity). Pod względem petrologicznym są one daleko bardziej jednorodne niż lepiej udokumentowana ełcka intruzja syenitowa. Centralna część intruzji Mławy nie została spenetrowana i jej charakter geochemiczny pozostaje nierozpoznany. Klasyfikacja tektoniczna skał wskazuje na kontynentalny wewnątrzpłytkowy magmatyzm alkaliczny, związany z osłabieniem litosfery w rejonie stabilnej platformy wschodnioeuropejskiej. Bogate w REE i Zr syenity są względnie późnym produktem procesów frakcjonowania magm. Podobnie

jak w innych intruzjach alkalicznych o znaczeniu złożowym (np. KACP z plutonami Chibin i Łowoziera), mineralizacja REE oraz Zr mogła być generowana przez parcjalne topienie zmetasomatyzowanego płaszcza, a źródłem REE był inicjalny stop. Zasoby związane z alkalicznymi intruzjami mogą być ogromne, jednak ich stopień pierwotnej mineralizacji bywa dość niski. Intruzja Mławy powinna być obiektem dalszych badań, z uwagi na pierwotną koncentrację minerałów nośników REE i Zr w skałach na peryferiach głównego ciała magmowego. Jej potencjalne znaczenie złożowe osłabia jednak bardzo głębokie posadowienie ciała magmowego na poziomie poniżej 3000 m.

LITERATURA

- ARMBRUSTMACHER T.J., MODRESKI P.J., 1994 — Petrology and mineralogy of alkaline rocks from the Ełk complex. *W: Geology of the Ełk syenite massif (northeastern Poland)* (red. W. Ryka). *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **144**: 49–70.
- BELOLIPETSKII A.P., VOLOSHIN A.V., 1996 — Yttrium and rare earth element minerals of Kola Peninsula, Russia. *W: Rare Earth Minerals: Chemistry, origin and ore deposits* (red. A.P. Jones i in.). *Min. Soc. Serie*, **7**: 311–324.
- BRITISH Geological Survey, Natural Environments Research Council NERC 2011 — Rare Earth Elements. <http://www.mineralsuk.com>
- COMMITTEE on Critical Mineral Impact on the U.S. Economy, NRC (National Research Council), 2008 — Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy: 1–264. The National Academies Press, Washington D.C.
- DEMAIFFE D., WISZNIEWSKA J., BRASSINNES S., 2005 — A petrological-geochemical overview of the Tajno carbonatite complex (NE Poland): comparison with the Kola Carbonatite Province (Russia). *Min. Soc. Pol., Spec. Papers*, **26**: 29–35.
- DOWNES H., BALAGANSKAYA E., BEARD A., LIFEROVICH R., DEMAIFFE D., 2005 — Petrogenetic processes in the ultramafic, alkaline and carbonatitic magmatism in the Kola Alkaline Province: A review. *Lithos*, **85**: 48–75.
- DZIEDZIC A., 1973 — Badania geochemiczne formacji intruzywnych. Tajnowska intruzja alkaliczno-ultrazasadowa. *W: Skały platformy prekambryjskiej w Polsce. Cz. 1. Podłoże krystaliczne* (red. A. Łaszkiwicz). *Pr. Inst. Geol.*, **68**: 111–113.
- JUSKOWIAK O., 1973 — Intruzywne formacje skał zasadowych i alkalicznych. Tajnowska intruzja alkaliczno-ultrazasadowa. *W: Skały platformy prekambryjskiej w Polsce. Cz. 1. Podłoże krystaliczne* (red. A. Łaszkiwicz). *Pr. Inst. Geol.*, **68**: 104–108.
- KOGARKO L.N., 1987 — Alkaline igneous rocks of the Kola Peninsula. *W: Alkaline Igneous Rocks* (red. J.G. Fitton, B.G.J. Upton). *Geol. Soc., London, Spec. Publ.*, **30**: 531–544.
- KRYSTKIEWICZ E., KRZEMIŃSKI L., 1992 — Petrology of the alkaline-ultrabasic Tajno massif. *W: Geology of the Tajno massif (northeastern Poland)* (red. W. Ryka). *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **139**: 19–35.
- KRZEMIŃSKI L., 2006 — Ewolucja anorogenicznego magmatyzmu paleozoicznego w rejonie alkaliczno-ultrazasadowego kompleksu Tajna (północno-wschodnia Polska). *Centr. Arch. Geol. PIB-PIB, Warszawa*.
- KRZEMIŃSKI L., 2007 — Ewolucja magm w rejonie alkaliczno-ultramaficznego kompleksu Tajna (NE Polska). *Prz. Geol.*, **55**, 4: 295.
- KUBICKI S., RYKA W., 1982 — Atlas geologiczny podłoża krystalicznego polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej. *Inst. Geol., Warszawa*.
- RADWANEK-BAK B., 2011 — Zasoby kopalin Polski w aspekcie oceny surowców krytycznych Unii Europejskiej. *Gosp. Sur. Min.*, **27**: 5–19.
- RYKA W., 1994 — Geology of the Ełk syenite massif, NE Poland. *W: Geology of the Ełk syenite massif (northeastern Poland)* (red. W. Ryka). *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **144**: 85–120.
- THORNTON C.P., TUTTLE O.F., 1960 — Geochemistry of igneous rocks: 1. Differentiation index. *Amer. J. Sci.*, **258**: 664–684.
- TORSVIK T.H., SMETHURST M.A., MEERT U.G., VAN DER VOO R., MCKERROW W.S., BRASIER M.D., STURT B.A., WALDERHAUG H.J., 1996 — Continental break-up and collision in the Neoproterozoic and Paleozoic – a tale of Baltica and Laurentia. *Earth Sci. Rev.*, **40**: 229–258.

- WU C., YUAN Z., BAI G., 1996 — Rare earth deposites in China. *W: Rare Earth Minerals: Chemistry, origin and ore deposits* (red. A.P. Jones, F. Well, C.T. Williams) *Min. Soc. Serie*, 7: 281–306.
- WYBRANIEC S., CORDELL L., 1994 — Geophysical mapping of the Ełk syenite massif. *W: Geology of the Ełk syenite massif* (northeastern Poland) (red. W. Ryka). *Pr. Państw. Inst. Geol.*, 144: 11–19.
- WYBRANIEC S., 2007 — Grawimetria: anomalie Bouguera transformowane. Rzeźba cieniowana oświetlona z SW. Mapa Polski. Materiały niepublikowane w zbiorach autora artykułu.

SUMMARY

Rare earth elements (REE) remain indispensable in a wide range of industrial and high technology applications. During the last decade there is considerable trade in components containing REE, namely: computer hard drives, liquid crystal displays, catalysts, magnets, electric motors, as well as optical, glass and steel industry.

European Union countries and Poland have become increasingly dependent upon imports from China, which is currently the dominant source of REE. The world's largest REE deposits is Bayan Obo in Chinese Inner Mongolia, which supply mainly the Fe-REE-Nb concentrates. The most important REE deposits are spatially and genetically associated with alkaline magmatic processes and alkaline igneous rocks and/or carbonatites on the cratonic border or zones of main faulting. In the area of Kola Peninsula, East European Craton (EEC), alkaline magmatism produced numerous complexes (e.g. Khibina and Lovozero, Russia) and small polyphase igneous bodies, with a wide spectrum of syenites accompanied by significant commercial mineralisation of Nb, Ta, Zr, Hf and REE.

A number of alkaline and alkaline-ultramafic bodies have been known in the border area of the East European Craton (EEC) within the hidden basement of northeastern Poland for a long time. These are the strong anomalies of Ełk, Pisz, Tajno and Mława identified based on geophysical survey. Syenites and quartz syenites of a limited thickness were drilled by four deep boreholes (Płońsk IG 2A/2, Ciechanów 1, Konopki Wielkie 1 and Gradzanowo 2) on the periphery of the Mława anomaly. The core samples were collected systematically from depths beneath 3000 m (>3302 m in Płońsk

IG 2A/2 and 3400 m in Gradzanowo 2 boreholes). Rock-forming minerals are predominantly K-feldspar (more than 50%) with lesser amounts of quartz and Na-plagioclase and occasionally clinopyroxene and rare amphibole and biotite. The characteristic accessory minerals are titanite, magnetite, ilmenite and apatite, however minor accessories include also fine-grained REE-carbonates and abundant zircon grains. Electron microprobe analyses confirm primary-appearing REE-fluorocarbonate (bastnäsite, parisite) and abundance of zircons as major host phases to REE and Zr in the syenites. The REE-rich accessories show textures indicating crystallisation during the main- and late-stage magmatic processes.

Whole-rock analyses confirm the high concentrations of REE with Σ REE from 584 to 1418 ppm accompanied with a high amount of Zr, mainly about 1100 ppm (Zr ~623–1134 ppm), therefore the syenites contain important quantities of zircon, which crystallized from Zr-oversaturated magma. The syenite from Płońsk IG2A/2 borehole is always close to the silica saturated line. The algaipitic index between 0.68 and 0.97 and A/NK vs A/CNK diagram point to the metaluminous character of the Płońsk syenite. The REE- and Zr-rich Mława metaluminous syenites are relatively late-stage products of magma fractionation processes. Typically alkaline intrusive complexes with have REE mineralization were generated as a partial melt of metasomatized mantle material, which is an initial source of REE. A significant concentration of the REE-bearing minerals show a spatial and genetic relation to an alkaline rocks, therefore the Mława igneous bodies, however located below 3000 m depth, should be the subject of further investigations.