

Tadeusz Pindór

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

e-mail: tpindor@zarz.agh.edu.pl

**TECHNOLOGIE PRZEŁOMOWE
W GOSPODAROWANIU NIEODNAWIALNYMI
ZASOBAMI NATURALNYMI***

**THE APPLICATION OF BREAK-THROUGH
TECHNOLOGIES IN THE MANAGEMENT
OF NON-RENEWABLE NATURAL RESOURCES**

DOI: 10.15611/pn.2017.491.30

JEL Classification: O300, O310

Streszczenie: Artykuł ma charakter przeglądowy. Zawiera wyniki badań nowych materiałów, nowych technologii oraz nowych produktów w kontekście implementacji kryteriów rozwoju trwałego i zrównoważonego. Przedstawiono i przeanalizowano właściwości oraz już rozpoznane i potencjalne obszary zastosowań rozwiązań innowacyjnych. Wśród nowych technologii uwagę skoncentrowano na tych, które mają charakter przełomowy, co związane jest zasadniczo z wykorzystaniem nanomateriałów, w szczególności alotropowych odmian węgla, takich jak grafen i fulereny, oraz odmiany alotropowe innych pierwiastków, to jest: cyny, germanu, krzemu, a także pierwiastków i surowców krytycznych. Zidentyfikowano czynniki, umożliwiające przestrzeganie zasad trwałego i zrównoważonego gospodarowania nieodnawialnymi zasobami naturalnymi, mimo wielkiej skali produkcji urządzeń wytwórczych, a przede wszystkim przedmiotów codziennego użytku nowej generacji.

Słowa kluczowe: technologie przełomowe, nieodnawialne zasoby naturalne, rozwój trwały i zrównoważony.

Summary: The subject matter of this paper is a review of research into new materials, new technologies and new products from the point of view of the degree to which they incorporate sustainable development concepts. Properties and characteristics are presented as well as potential application areas for innovative solutions. In the review of new technologies, attention is paid to those which incorporate break-through ideas. Also identified, are the factors which ensure sustainable usage of non-renewable natural resources in large scale equipment manufacture and specifically, in new generation equipment designed for everyday use which incorporates break-through technologies.

Keywords: break-through technologies, non-renewable natural resources, sustainable development.

* Artykuł opracowano w ramach badań statutowych AGH nr 11/11.200.350.

1. Wstęp

W ostatnim ćwierćwieczu, a zwłaszcza w okresie nowego wieku i nowego tysiąclecia, odnotowano niezwykle dynamiczną dynamikę nowych osiągnięć myśli technicznej. Dzięki nieznannej wcześniej koncentracji kadr o najwyższych kwalifikacjach, a także kapitału rzeczowego i finansowego na poszukiwaniu możliwości zastosowań nowych rozwiązań z obszaru nauk podstawowych w praktyce gospodarczej, opracowano wiele technologii pozyskiwania nowych materiałów, a następnie, konsekwentnie – również nowych produktów.

Wśród wielu innowacji można wyróżnić takie, które przynoszą zupełnie odmienne wartości i mogą całkowicie zmienić rynki materiałów i produktów. Technologie, w których wykorzystano te innowacje, profesor Harvard Business School Clayton M. Christensen zdefiniował jako przełomowe, w odróżnieniu od procesów kontynuacyjnych [Christensen 2010].

W rywalizacji o pozycję lidera, zarówno w badaniach podstawowych, jak i stosowanych, uczestniczą naukowcy i inżynierowie niemal z całego świata, w tym z państw do niedawna klasyfikowanych jako zapóźnione cywilizacyjnie. Zmiana ta wynika z dynamicznego zwiększenia liczby studentów i absolwentów szkół wyższych w zakresie nauk ścisłych, technicznych i informatycznych, szczególnie widocznego w ChRL i Indiach. W obu tych państwach, o potencjale ludzkim ponad 2,6 miliarda osób, uruchomione zostały również – obok konwencjonalnych – innowacyjne czynniki wzrostu i rozwoju gospodarczego, dynamizujące popyt na nową wiedzę i nowe umiejętności.

Współpraca ośrodków badawczych z przedsiębiorstwami przemysłowymi przyniosła implementację wielu nowych rozwiązań projektowych oraz znacznie skróciła okres komercjalizacji innowacji, co uwidacznia się w przyspieszeniu zmian strukturalnych o charakterze jakościowym w gospodarce oraz w sferze społecznej. Kolejnym ogniwem tego procesu jest zainicjowanie tworzenia klasy średniej, to jest grupy, którą – oprócz manifestacji oczekiwań osiągnięcia wyższego materialnego standardu życia – cechuje wyższy stopień niezależności decyzji oraz wyższy poziom przedsiębiorczości.

Kluczowym efektem jest szybki awans państw i społeczeństw, jeszcze w latach siedemdziesiątych XX wieku zaliczanych do świata ubóstwa, w globalnej klasyfikacji poziomu zamożności i rozwoju cywilizacyjnego. Inną konsekwencją jest dostrzeżenie skutków gwałtownego zwiększenia wolumenu produkcji i usług materialnych w postaci szybkiego wyczerpywania nieodnawialnych zasobów naturalnych, a w szczególności minerałów oraz pierwotnych nośników energii, a także pogorszenia stanu komponentów środowiska w wielu obszarach świata.

Kolejnym bardzo istotnym wyzwaniem o charakterze cywilizacyjnym jest pojawienie się nowych zagrożeń, wynikających z uzależnienia od ciągłego korzystania z nowych urządzeń technicznych, głównie w obszarze komunikacji społecznej, oraz możliwości podjęcia – w szczególności przez organizacje przestępcze – wytwarza-

nia broni oraz urządzeń, takich jak na przykład bankomaty, z wykorzystaniem technologii druku 3D.

Stąd celem artykułu jest analiza wpływu innowacji przełomowych zdefiniowanych jako:

a) odkrycia nowych materiałów,

b) identyfikacja nowych zastosowań znanych pierwiastków i surowców przemysłowych uznanych za krytyczne,

c) zaprojektowanie i wdrożenie nowych technologii,

na zmniejszenie presji antropogenicznej na środowisko, mimo niezwykle dynamicznego wzrostu skali produkcji wyrobów, pozyskanych z nieodnawialnych zasobów naturalnych, w szczególności ze złóż mineralnych.

2. Materiały i technologie przełomowe

2.1. Nanomateriały i nanotechnologie

Nanomateriały to wszelkie materiały, w których występują regularne struktury na poziomie molekularnym, to jest nieprzekraczającym 100 nanometrów [OECD 2015].

Nanotechnologie, czyli technologie stosowane do wytwarzania nanomateriałów, pozwalają otrzymać tworzywa o składzie i właściwościach, których nie można było uzyskać dotychczas znanymi metodami.

Nanomateriały mają odmienne właściwości fizyczne w porównaniu z materiałami tradycyjnymi. W 2016 roku do nanomateriałów wytworzonych przez człowieka zaliczono [UNIDO 2016]:

- grafen,
- grafan,
- fulereny,
- germanen,
- silicen,
- stamen.

Grafen to płaska struktura złożona z atomów węgla połączonych w sześciokąty. Materiał ten ma grubość jednoatomową, dlatego – z pewnym uproszczeniem – określa się go jako strukturę dwuwymiarową. Wielu badaczy, już w latach czterdziestych minionego stulecia, kiedy powstał teoretyczny opis grafenu, dowodziło, że materiał dwuwymiarowy nie może istnieć w przyrodzie. Przełom technologiczny odnotowano w 2004 roku, gdy dwie grupy naukowców, w Wielkiej Brytanii oraz w Stanach Zjednoczonych – niezależnie od siebie – uzyskały jednoatomowy materiał o unikatowych własnościach, głównie elektrycznych i mechanicznych. Grafen w wielu zastosowaniach zastępuje krzem, w szczególności w budowie tranzystorów wielkiej częstotliwości. Inne obszary zastosowań grafenu to produkcja wyświetlaczy dotykowych, płyt fotowoltaicznych oraz superkondensatorów, umożliwiających efektywne magazynowanie energii elektrycznej.

Czujniki z grafenu umożliwiają rejestrację pojedynczych cząsteczek substancji szkodliwych, co otwiera nowe możliwości zastosowania tych urządzeń w monitoringu i ochronie środowiska [Nanotechnology... 2013-2016].

Warto podkreślić, że w Polsce opracowano oryginalną metodę wytwarzania grafenu metalurgicznego o wysokiej wytrzymałości, co pozwoliło na uzyskanie ochrony patentowej dla tego produktu w Stanach Zjednoczonych oraz w państwach UE. Innym ważnym wydarzeniem w tym segmencie nanotechnologii było uruchomienie produkcji przez warszawski Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, arkuszy grafenu o rozmiarach 50×50 cm oraz wprowadzenie przez firmę Nano Carbon grafenu wielkopowierzchniowego do sprzedaży [Postępy... 2010-2016].

Grafan jest organicznym związkem chemicznym, dwuwymiarowym polimerem, powstałym w wyniku całkowitego uwodornienia grafenu. W wyniku takiej transformacji bardzo dobrze przewodzący prąd grafen staje się izolatorem. Grafan został odkryty w Stanach Zjednoczonych w 2007 roku.

Fulereny to cząsteczki składające się z parzystej liczby atomów węgla, tworzące zamkniętą, pustą w środku bryłę. Właściwości chemiczne fulerenów są pod wieloma względami zbliżone do węglowodorów aromatycznych. Pierwszy model fulerenu zaproponowano już w 1970 roku w Japonii, ale za moment odkrycia tego materiału w Wielkiej Brytanii oraz w Stanach Zjednoczonych uważany jest przełom lat osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych minionego stulecia. Fulereny znalazły już wiele praktycznych zastosowań; szczególnie istotna jest możliwość przyłączania ich do polimerów w celu budowy tworzyw o unikatowych właściwościach elektrooptycznych, a także katalizatorów o bardzo rozwiniętej powierzchni czynnej. Wewnątrz fulerenów udało się zamknąć niemal wszystkie pierwiastki z układu okresowego, a ponadto wiele małych cząsteczek związków chemicznych, co otwiera nieznane dotychczas perspektywy przed inżynierią materiałową [UNIDO 2016].

Germanen jest alotropową odmianą germanu, nanomateriałem o płaskiej strukturze, analogicznej do grafenu i silicenu. Ze względu na minimalną grubość germanen – podobnie jak grafen – jest uważany za strukturę dwuwymiarową. W 2014 roku dwa zespoły naukowców, europejski i chiński, niezależnie od siebie ogłosiły uzyskanie germanenu. Materiał ten wykazuje nowe właściwości półprzewodnikowe oraz optyczne, w szczególności przewiduje się możliwość zastosowania go w tranzystorach polowych i w innych podzespołach elektronicznych.

Silicen to alotropowa odmiana krzemu, nanomateriał o płaskiej strukturze, analogicznej do grafenu i germanenu. Silicen, choć z powodu jednoatomowej grubości warstwy traktowany jest jako dwuwymiarowy, nie jest idealnie płaski. Powierzchnia silicenu jest pofałdowana, a poszczególne warstwy tego materiału są bardzo silnie powiązane, w przeciwieństwie do grafitu. Struktury silicenu zaobserwowano po raz pierwszy w Japonii w 2010 roku. Potencjalnymi obszarami licznych zastosowań silicenu są: elektronika, szczególnie w najwyższej zaawansowanej technice produkcji półprzewodników, a także w wielu procesach produkcji przemysłowej.

Stanen składa się z dwuwymiarowej warstwy atomów cyny o grubości jednego atomu tego pierwiastka i stanowi cynowy odpowiednik grafenu. Został wyprodukowany w Chinach w 2016 roku na warstwie tellurku bizmutu. Unikatową cechą tego materiału jest przewodzenie prądu elektrycznego bez generowania żadnego ciepła, a więc bez strat. Inna niezwykła właściwość stanenu wynika z identyfikacji zjawiska swobodnego poruszania się elektronów po brzegu materiału, podczas gdy jego środek stanowi dla elektronów barierę nie do przejścia. Cecha ta pozwala określić stanen jako izolator topologiczny [Nowy... 2010-2017].

Wymiar nano, czyli jedna milionowa milimetra, umożliwia wielokrotne obniżenie jednostkowego zużycia materiałów do produkcji maszyn, urządzeń i instalacji wytwórczych, ale szczególnego znaczenia nabiera wykorzystanie nanotechnologii do wytwarzania produktów powszechnego zastosowania, jak: urządzenia łączności komórkowej, komputery, czujniki, sensory, odbiorniki radiowe i telewizyjne, a także urządzenia do sterowania sprzętem gospodarstwa domowego oraz pojazdami.

Nanomateriały i nanotechnologie umożliwiają radykalne obniżenie kosztów produkcji, a w konsekwencji również cen tych produktów, co w odpowiednim stopniu podwyższa popyt na produkty pozyskane w wyniku wykorzystania technologii innowacyjnych.

Wprowadzenie nanotechnologii, mimo wielkiej skali produkcji, mierzonej miliardami sztuk nowych produktów rocznie, nie wymaga podwyższenia dynamiki wykorzystywania nieodnawialnych zasobów mineralnych i jest głównym czynnikiem trwałości i równoważenia rozwoju.

Nanomateriały i nanotechnologie znajdują wiele zastosowań. Do najważniejszych można obecnie zaliczyć takie, jak:

- urządzenia pomiarowe;
- elektroniczne systemy medyczne i środowiskowe;
- telekomunikacja: radiokomunikacja, w szczególności mobilna, radiolokacja i radionawigacja, teletransmisja i telewizja, sieci telekomunikacyjne i teleinformatyczne, w tym satelitarne;
- inżynieria komputerowa;
- urządzenia automatyki i robotyki;
- elektronika przemysłowa;
- technika mikrofalowa.

2.2. Nanobiotechnologie

Nanobiotechnologia lub bionanotechnologia to dziedzina nanotechnologii na pograniczu biologii i biochemii. Terminów nanobiotechnologia lub bionanotechnologia używa się z reguły zamiennie, jednak w niektórych ujęciach identyfikuje się jako pojęcia odrębne [Nanotechnology... 2013-2016]. Głównym obszarem badań nanobiotechnologii są istniejące struktury na poziomie nano, a funkcją celu jest wykorzystanie nanostruktur na skalę przemysłową. Innym istotnym celem nanobiotechnologii jest stworzenie nowych metod badawczych biologii i biochemii.

Wykorzystanie nanotechnologii w badaniach dotyczących biotechnologii otwiera niezwykle możliwości rozwoju projektów bionanotechnologicznych. Metody nanobiotechnologii umożliwiają w szczególności opis i analizę technik badawczych, związanych z projektowaniem i budową sensorów biologicznych. Badania te mają charakter multidyscyplinarny, gdyż do ich prowadzenia wykorzystuje się wiedzę i instrumenty z zakresu: biologii, chemii, biochemii, fotoniki oraz różnych dyscyplin technicznych. Interferometria, wykorzystywana dotychczas głównie w mechanice eksperymentalnej, w szczególności do wyznaczania odkształceń badanych obiektów oraz do badań wielkości fizycznych, jak długość fali czy kontrola jakości elementów i układów optycznych, znajduje obecnie zastosowanie w obszarze precyzyjnych pomiarów w naukach biologicznych, w tym związanych z analizą stanu komponentów i funkcji środowiska.

2.3. Pierwiastki i surowce krytyczne

W 2008 roku Komitet ds. Kopaliny Krytycznych dla Gospodarki Stanów Zjednoczonych przedstawił definicję surowców krytycznych, która została przyjęta również w państwach Unii Europejskiej. Według tej definicji surowce krytyczne to: „kopaliny/surowce narażone na ryzyko zachwiania lub przerwania płynności podaży i dostaw, co może wywołać znaczące skutki ekonomiczne dla całej gospodarki” [Błaszke i in. 2015]. W dokumencie tym przeprowadzono, między innymi, analizę pojęcia „krytyczność” na podstawie trzech grup kryteriów:

- gospodarczych skutków ograniczenia podaży,
- poziomu ryzyka przerwania podaży,
- ryzyka środowiskowego, związanego z ograniczeniem możliwości pozyskiwania surowców w poszczególnych państwach w wyniku zmiany wymogów prawnych w zakresie ochrony komponentów lub funkcji środowiska.

W pierwszym kompleksowym raporcie Komisji UE zawarta została wstępna lista surowców mineralnych, uwzględniająca dziesięcioletni horyzont pozyskiwania i wykorzystania 41 surowców [EU Commission 2010]. W tym opracowaniu za krytyczne uznano następujące surowce:

- metaliczne: aluminium, antymon, beryl, chrom, cynk, gal, german, ind, kobalt, lit, magnez, mangan, molibden, nikiel, niob, pierwiastki ziem rzadkich, platynowce, ren, miedź, żelazo, srebro, tantal, tellur, tytan, wanad, wolfram;
- niemetaliczne: baryt, bentonit, boksyty, borany, diatomit, fluoryt, gips, gliny ceramiczne, grafit, magnezyt, perlit, piaski kwarcowe, surowce skaleniowe, talk, wapienie.

Wymienione surowce podzielono na trzy grupy ze względu na stopień krytyczności. Za najbardziej krytyczne dla gospodarki państw UE uznano 14 następujących surowców: antymon, beryl, kobalt, fluoryt, gal, german, grafit, ind, magnez, niob, pierwiastki ziem rzadkich, platynowce, tantal i wolfram [Komunikat 2014].

W tabeli 1 przedstawiono wybrane zastosowania pierwiastków i surowców krytycznych w technologiach innowacyjnych.

Tabela 1. Wybrane zastosowania pierwiastków i surowców krytycznych w technologiach innowacyjnych

Pierwiastek użyteczny	Ważniejsze kierunki zastosowań
Bor	nadprzewodniki, ogniwa paliwowe, kompozyty dla przemysłu samochodowego, leki, materiały izolacyjne
Chrom	odsalanie wody morskiej, implanty ortopedyczne
Cyna	bezołowiowe stopy lutowicze, telefony komórkowe, monitory, ekrany wysokiej rozdzielczości, komputery, chemikalia, opakowania spożywcze
Gal	lasery, mikrochipy, baterie słoneczne, dyski optyczne, półprzewodniki
German	półprzewodniki, włókna optyczne, mikrochipy, komputery, urządzenia do chemioterapii medycznej
Ind	komputery, ekrany wysokiej rozdzielczości, dyski optyczne, półprzewodniki
Jod	półprzewodniki, ciekłokrystaliczne ekrany i monitory, instalacje do oczyszczania wody
Lit	baterie, akumulatory, włókna szklane, stopy
Miedź	druty, kable, urządzenia elektroniczne, stopy miedziane, lekarstwa, środki bakteriobójcze
Neodym	lasery, magnesy wysokiej sprawności, kuchenki mikrofalowe
Pallad	katalizatory samochodowe i chemiczne, instalacje do odsalania wody morskiej, włókna optyczne dla elektroniki
Ren	superstopy wysokotemperaturowe dla lotnictwa i astronautyki, katalizatory dla przemysłu petrochemicznego
Srebro	telefony komórkowe, komputery
Tytan	lekkie stopy dla lotnictwa i astronautyki, katalizatory dla przemysłu chemicznego, powłoki ochronne

Źródło: [Stefanowicz 2014; Ministerstwo Rozwoju 2017b].

Udokumentowane zasoby mineralne, z których można pozyskiwać pierwiastki i surowce krytyczne, są w Polsce niewielkie i dotyczą nielicznych surowców. W tej sytuacji popyt na antymon, beryl, grafit naturalny, ind, niob, tantal oraz pierwiastki ziem rzadkich pokrywany jest importem, głównie z Chin oraz Brazylii. W statystykach handlu zagranicznego odnotowywany jest również rosnący import gotowych wyrobów, zawierających te surowce [GUS 2010-2016].

Możliwości zwiększenia pozyskiwania pierwiastków i surowców krytycznych w Polsce można upatrywać w podniesieniu stopnia ich odzysku w procesach hutnictwa i elektrorafinacji w przedsiębiorstwie KGHM Polska Miedź S.A. [Pindór 2016]. W dłuższej perspektywie potencjalnym źródłem pierwiastków i surowców krytycznych może być złożo koncentracji metalonośnych, zalegających na dnie Oceanu Spokojnego w obszarze Clarion-Clipperton [Pindór, Preisner 2016].

Należy podkreślić, że w strategii rozwoju Polski [Ministerstwo Rozwoju 2017a] problematyce reindustrializacji opartej o technologie innowacyjne, nadano kluczowe znaczenie.

Warto w tym miejscu również zasygnalizować, że uwarunkowania wprowadzania technologii innowacyjnych i zagrożenia z nich wynikające są przedmiotem licznych prac badawczych, konferencji i publikacji [OECD 2016; UNESCO Report 2014].

3. Zakończenie

Kryteria trwałego i zrównoważonego rozwoju gospodarki nieodnawialnymi zasobami naturalnymi wyznaczają kluczowe uwarunkowania w obszarze poszukiwania nowych kierunków badań naukowych, zarówno podstawowych, jak i stosowanych. W zakończeniu artykułu zamieszczono najważniejsze wnioski wynikające z analizy synergicznych efektów wykorzystania innowacyjnych osiągnięć wielu dyscyplin technologii, w szczególności: inżynierii materiałowej, inżynierii mechanicznej, elektroniki i fotoniki, a także biologii, chemii i biochemii.

1. Technologie innowacyjne zasadniczo dynamizują popyt na alotropowe odmiany węgla, krzemu, germanu oraz cyny, a także na pierwiastki i surowce krytyczne.

2. Wśród najważniejszych efektów implementacji materiałów i technologii przełomowych należy wymienić następujące:

- obniżenie jednostkowych wskaźników zużycia materiałów i surowców oraz energii wtórnej w procesach wytwórczych;
- obniżenie jednostkowych kosztów produkcji i w efekcie również cen produktów pozyskanych w wyniku wykorzystania technologii innowacyjnych;
- rozszerzenie popytu na produkty innowacyjne;
- zmniejszenie presji antropogenicznej na środowisko przez obniżenie tempa szczypania nieodnawialnych zasobów mineralnych oraz pierwotnych nośników energii, pomimo wielkiej skali produkcji;
- obniżenie poziomu zagrożeń środowiskowych, w szczególności w odniesieniu do funkcji i komponentów środowiska;
- szybkie rozprzestrzenianie osiągnięć technicznych i technologicznych;
- upowszechnienie w skali globalnej dostępu do takich czynników rozwojowych, jak:
 - informacja,
 - wiedza, w tym nowa wiedza i bazy danych,
 - techniczne możliwości komunikacji społecznej;
- zastosowanie nanomateriałów i nanotechnologii w medycynie, w szczególności do konstrukcji instrumentów badawczych oraz robotów chirurgicznych, zasadniczo rozszerzyło możliwości diagnozowania, leczenia oraz rehabilitacji chorych.

3. Materiały i technologie przełomowe można zidentyfikować jako kluczowe, antropogeniczne czynniki rozwoju trwałego i zrównoważonego w skali globalnej, a także na poziomie poszczególnych regionów świata i państw. Wykorzystanie materiałów i technologii przełomowych otwiera nowy rozdział rozwoju cywilizacyjnego.

Literatura

- Błaszke W., Witkowska-Kita B., Biel K., 2015, *Analiza możliwości pozyskiwania krytycznych surowców mineralnych*, Rocznik Ochrona Środowiska, t. 17.
- Christensen C.M., 2010, *Przełomowe innowacje*, Wyd. Profesjonalne PWN, Warszawa.
- EU Commission, 2010, Critical Raw Materials for the European Union – Report of the Ad-hoc Working Group on defining Critical Raw Materials, EU Commission – DG Enterprise and Industry.
- GUS, 2010-2016, Rocznik Statystyczny Handlu Zagranicznego.
- Komunikat, 2014, Komunikat Komisji Europejskiej do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów w sprawie przeglądu wykazu surowców krytycznych dla UE i wdrażania inicjatywy na rzecz tych surowców, Bruksela.
- Ministerstwo Rozwoju, 2017a, Strategia na rzecz Odpowiedzialnego Rozwoju do roku 2020, z perspektywą do 2030 r.
- Ministerstwo Rozwoju, 2017b, Surowce dla przemysłu – plan działań na rzecz zabezpieczenia podaży nieenergetycznych surowców mineralnych.
- Nanotechnology Market Reports – Trends, Analysis & Statistics, 2013-2016.
- Nowy Przemysł, 2010-2017.
- OECD, 2015, Key Nanotechnology Indicators.
- OECD, 2016, Opportunities and Risks of Nanotechnologies.
- PIG, PIB, 2015, Bilans Gospodarki Surowcami Mineralnymi Polski i Świata 2013, Państwowy Instytut Geologiczny, Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa.
- Pindór T., 2016, *Reindustrializacja Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego*, Barometr Regionalny: Analizy i Prognozy, t. 14, nr 1.
- Pindór T., Preisner L., 2016, *Zagospodarowanie morskich zasobów mineralnych dla trwałości rozwoju*, [w:] Graczyk A., Czaja S. (red.), *Ekonomia i środowisko: księga jubileuszowa profesora Bogusława Fiedora*, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego, Wrocław.
- Postępy Nanotechnologii, 2010-2016.
- Stefanowicz J., 2014, *Surowce krytyczne*, ISP PAN, Warszawa.
- UNESCO Report, 2014, Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnologies.
- UNIDO, 2016, Industrial Development Report.