



## Kierunki innowacji technicznych i technologicznych w rozpoznawaniu złóż kopalin oraz działalności górniczo-przetwórczej

Barbara Radwanek-Bąk<sup>1</sup>



**Tendencies of technical and technological innovation in mineral deposits exploration, mining and mineral processing.** Prz. Geol., 68: 675–681.

*Abstract.* Innovation is an integrated part of most human activities. In recent years, along with the development of digitization, computerization and automation, it creates new areas of activity, enabling the integration of people, machines and systems. These changes are so far-reaching and so dynamic, that they are considered as the fourth industrial revolution. Obviously, they also apply to the field of mineral deposits exploration, as well as the mining and processing industry. This article presents the main trends conducted in these fields, illustrating them with selected examples, showing some of the most promising technologies, processes and devices.

**Keywords:** innovation, mineral deposits exploration, mining activity, processing

Historia poszukiwań złóż kopalin oraz ewolucja metod ich wydobywania, a następnie przetwórstwa w celu uzyskania pożądanego surowca mineralnego jest nie tylko historią wielkich odkryć i wizjonerskich sukcesów, ale również historią stosowanych metod badawczych i sprzętu. Pozostawiając te niewątpliwie interesujące wątki historyczne do odrębnych rozważań, autorka postanowiła skupić się na przyszłości, przedstawiając główne kierunki wielorakich, innowacyjnych działań prowadzonych w celu lepszego wykorzystania zasobów mineralnych Ziemi, w szczególności zasobów kopalin stałych, począwszy od etapu ich poszukiwania i rozpoznania, poprzez górnicze pozyskiwanie, a kończąc na przeróbce i przetwórstwie. Przegląd ten nie będzie ani kompletny, ani zbyt szczegółowy, gdyż mnogość poszczególnych rozwiązań, zwłaszcza w sferze innowacyjnych technik wydobywczych i ulepszania parku maszynowego, jest bardzo duża i zróżnicowana. Intencją autorki jest przybliżenie tych zagadnień geologom, a zwłaszcza geologom złożowym, którzy z natury swej specjalizacji powinni interesować się górnictwem.

W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki badań prowadzonych w ramach międzynarodowego projektu *Min-Guide*, w którym autorka uczestniczyła jako wolontariusz konsultant, oraz wiele informacji opublikowanych w znanych czasopismach górniczych, np. *Mining Magazine*, *Industrial Minerals*, raportach *US Geological Survey*, a także w krajowych czasopismach branżowych, takich, jak *Przegląd Górniczy*, *Surowce i maszyny budowlane* oraz *Kruszywa*. Wzmiankowany projekt *Min-Guide* ([www.min-guide.eu](http://www.min-guide.eu)) był jednym z wielu projektów UE realizowanych w ramach programu *Horyzont 2020*, ale jednym z nielicznych poświęconych prezentacji dobrych praktyk i rozwiązań do szerszego wdrażania innowacyjnych technologii w górnictwie kopalin stałych. Projekt *Min-Guide* realizowano w latach 2016–2019. Dotyczył on określenia polityki Unii Europejskiej w dziedzinie innowacji w poszukiwaniu i wy-

dobywaniu kopalin. Koncentrował się na wskazaniu głównych tendencji innowacyjności w poszukiwaniu i wydobywaniu kopalin oraz ich przetwórstwie, a także na identyfikacji elementów sprzyjających innowacyjności i hamujących ją (analiza potrzeb i luk prawnych), zwłaszcza w odniesieniu do głęboko położonych i słabo dostępnych złóż. Aspektów zastosowań nowych technologii w górnictwie dotyczą również inne projekty należące do unijnego programu *Horyzont 2020: Unexmin, Infact, GHMP 2030* i *Robominers*.

Bliźniaczą problematykę – dotyczącą węglowodorów – która jednak ze względu na swoją specyfikę nie została w tym artykule opisana, prezentują odrębne specjalistyczne projekty, opracowania i publikacje (np. Ciechanowska, 2016; Tarełko, 2016). Poza zakresem niniejszego przeglądu pozostają również działania dotyczące optymalizacji pozyskiwania surowców wtórnych i odpadowych, które koncentrują się na zagadnieniach technologicznych oraz logistyczne, a w Polsce również na aspektach prawnych. Stanowią one duży, odrębny i dynamicznie rozwijający się segment innowacyjności.

Jak wskazano w projekcie *Min-Guide* (Deliverable 3.2, [www.min-guide.eu](http://www.min-guide.eu)), pierwszym i najważniejszym elementem warunkującym rozwój innowacyjności w całym szeroko pojętym przemyśle wydobywczym jest pozyskanie, gromadzenie, harmonizacja i przetwarzanie dużej ilości danych geologicznych. Dopiero ich sprzężenie z nowoczesnymi rozwiązaniami technicznymi umożliwia optymalizację działań. Koniecznym warunkiem wdrożenia innowacyjnych rozwiązań są też aspekty formalno-prawne.

### EKSPLORACJA

Głównymi celami innowacyjności w fazie eksploracji i rozpoznania złóż kopalin są:

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Oddział Karpacki, ul. Skrzatów 1, 31-560 Kraków; [barbara.radwanek-bak@pgi.gov.pl](mailto:barbara.radwanek-bak@pgi.gov.pl)

- szybkie tempo i możliwość kompleksowego prowadzenia badań;
- lepszy efekt końcowy tych badań;
- mała inwazyjność wobec środowiska naturalnego;
- możliwość prowadzenia badań w obszarach trudno dostępnych oraz na dużych głębokościach;
- eksploracja starych, zatopionych kopalń podziemnych.

Analizując nowoczesne techniki eksploracyjne, należy zwrócić uwagę na stały rozwój metod geofizycznych, pozwalających na uzyskiwanie coraz dokładniejszych wyników i lepszą ich porównywalność oraz korelację w przypadku stosowania kilku metod (np. zdjęcia magnetycznego ze zdjęciem grawimetrycznym, badaniami radiometrycznymi czy VLF-EM). Zaletą metod geofizycznych jest również umożliwienie penetracji obszarów słabo dostępnych oraz krótki czas wykonywania badań, co przekłada się – choć nie wprost – na efekty ekonomiczne. Główne rodzaje stosowanych metod geofizycznych pozostają takie, jak dotychczas stosowano (sejsmika, grawimetria, magnetyka, magnetotelluryka, metody elektryczne i elektromagnetyczne), ważne są jednak ich modyfikacje i udoskonalanie, w szczególności w zakresie pozyskiwania i przetwarzania danych, a także narzędzi pomiarowych.

Najważniejszą bodaj techniką poszukiwań, rozwijaną obecnie na szeroką skalę, są badania prowadzone z powietrza – za pomocą urządzeń zainstalowanych na samolotach lub bezzałogowych dronach (Williams, 2017; Kawalec, 2019). Obiecujące jest zwłaszcza zastosowanie dronów, choć na razie jest ono ograniczone ze względu na krótki czas lotu, niewielki zasięg oraz dopuszczalny ciężar udźwigu. Jednak wyniki badań wskazują, że istnieją duże możliwości postępu w tej dziedzinie. Drony są używane do tworzenia cyfrowych modeli terenu, wykorzystywanych później w wielu metodach prospekcji geologicznej, a także do badań geofizycznych, w szczególności: magnetycznych, radiometrycznych i mikrograwimetrii. Możliwość efektywnego użycia dronów do konstrukcji ortofotomap 3D wiązała się z koniecznością dopracowania technik fotogrametrycznych i zapewnienia bardzo wysokiej rozdzielczości obrazów w celu stworzenia precyzyjnych modeli cyfrowych terenu, stanowiących podstawę analiz (np. eksploracji z zastosowaniem metod mikrograwimetrycznych). Coraz szersze zastosowanie znajdują również badania georadarowe, prowadzone zarówno z ziemi, jak i z powietrza (Butra i in., 2017).

Prowadzenie badań geofizycznych z powietrza jest więc coraz łatwiejsze, głównie dzięki zastosowaniu technik GIS do identyfikacji położenia punktów pomiarowych oraz dzięki cyfrowej transmisji i gromadzeniu danych. Zaletą tych usprawnień jest znaczne zwiększenie tempa i dokładności pomiarów, lepsze zobrazowanie terenu, a także monitoring przesyłanych obrazów w czasie rzeczywistym. Niewątpliwą zaletą takich badań jest również możliwość prowadzenia ich na obszarach trudno dostępnych. Rozwój badań geofizycznych prowadzonych z powietrza napotyka jednak coraz więcej barier formalnych, w szczególności dotyczących uzgodnień planowanych badań z agencjami ruchu powietrznego, ze względu na potencjalne zagrożenie ruchu lotniczego. Jeszcze bardziej skomplikowana wydaje się kwestia użycia dronów z uwagi na możliwość ich kolizji, awarie skutkujące zagrożeniem bezpieczeństwa ludzi pozostających na terenie takich badań, a także naruszenie

prywatności terenu. Rozwiązania będą wymagać również problemy faktycznej i potencjalnej uciążliwości prowadzenia takich badań w terenach zamieszkałych, ze względu na ich oddziaływanie (np. czasowe zaburzenie sygnałów telefonii komórkowej, odbiorników telewizyjnych, hałas, potencjalne oddziaływanie pól elektromagnetycznych itp.). Problemy te są już sygnalizowane w wielu krajach, gdzie drony są szerzej stosowane. Konieczna jest więc formalizacja i standaryzacja badań w tym zakresie oraz zmiana regulacji prawnych – dopuszczenie ich stosowania i ujęcie we wnioskach koncesyjnych oraz wprowadzenie procedur uzyskiwania zezwoleń na taką działalność – uzgodnienia ze służbami lotniczymi i użytkownikami terenu (Tamir i in., 2016; Tost, 2017). Metody geofizyczne, zwłaszcza georadarowe, geoelektryczne, geofizyki wiertniczej i sejsmiki otworowej, są również coraz szerzej wykorzystywane w trakcie eksploatacji złóż do ich szczegółowego rozpoznania i planowania robót górniczych (Kozioł i in., 2013).

Innym ważnym kierunkiem nowoczesnych poszukiwań złóż surowców mineralnych jest zastosowanie metod geochemicznych, a wśród nich badanie rozmieszczenia pierwiastków śladowych jako wskaźników mineralizacji złożowej czy też zastosowanie technologii mobilnych jonów metali – MMI (Mann, 1998; Amendoji i in., 2013). Innowacyjne rozwiązania w prospekcji złożowej dotyczą również szerokiego spektrum modelowania geologicznego przy użyciu coraz bardziej wyrafinowanego oprogramowania, np. modelowania paleonaprężeń jako wskaźnika potencjalnej mineralizacji związanej z tektoniką, modelowania strukturalnego, modelowania rozkładów parametrów geofizycznych, temperatur (*hot spots*), modelowania rozkładu minerałów w przestrzeni itp.

Wdrażane są coraz to nowsze i bardziej efektywne programy komputerowe, umożliwiające m.in. konstrukcję lepszych map prospekcyjnych, a także modelowanie potencjalnych struktur złożowych w technice 3D oraz budowę modeli genetycznych złóż. Opracowanie precyzyjnych, cyfrowych modeli złożowych staje się obecnie standardem postępowania i wieńczy rozpoznanie złóż. Modele te są wykorzystywane do lokalizowania optymalnego wariantu rozcięcia złoża i projektowania procesu wydobywania. W fazie wydobywczej do modelu złoża przyłącza się kolejne moduły pozwalające na efektywne prowadzenie eksploatacji i jej monitoring. Jednym z takich rozwiązań jest np. Zintegrowany System Zarządzania Złożem, będący platformą integrującą wyniki różnych badań w jeden model złożowy, stosowany m.in. w KGHM Polska Miedź S.A. (Szewczyk, 2015).

Spośród nowoczesnych technik i narzędzi wykorzystywanych do znacznego przyspieszenia badań i obniżania ich kosztów, należy wymienić narzędzia wielofunkcyjne. Niektóre z nich, o potwierdzonej już dużej przydatności i rozpowszechnione w ostatnim czasie, to:

- małosrednicowe wiercenia, w tym również kierunkowe, o dużej wydajności, ze stałym monitoringiem uzysku rdzenia i automatyczną analizą zawartości składników użytecznych (integracja wierceń i badań analitycznych);
- sondy wieloparametrowe, które mogą dokonać równoczesnego pomiaru właściwości minerałów, np. siarczkowych, zawartych w próbkach rdzenia wiertniczego lub w próbkach skalnych zebranych na powierzchni. Sondy te mierzą podatność magne-

tyczną oraz względne i bezwzględne wartości przewodności elektrycznej;

- przenośne, polowe analizatory spektralne (np. XRF, XRD i NIR), które po odpowiednim skalibrowaniu umożliwiają szybką analizę zawartości kilkudziesięciu pierwiastków (mogą służyć do badań wskaźnikowych w fazie prospekcji geologicznej, a w niektórych przypadkach zastępować tradycyjne analizy chemiczne). Są one również coraz powszechniej używane w trakcie rutynowego opróbowania wyrobisk w czynnych kopalniach do oceny zawartości metali w rudach;
- skanery rdzeni wiertniczych, umożliwiające analizę zawartości określonych pierwiastków, ale też ocenę strukturalną i składu petrograficznego skał, przy równoczesnym, automatycznym gromadzeniu pozyskanych danych;
- montowane na dronach bardzo czułe mierniki zmian pola magnetycznego (SQUID), używane m.in. do poszukiwań zakrytych złóż siarczkowych rud niklu i innych metali (Lee i in., 2002).

Narzędzia te są sprzężone z oprogramowaniem komputerowym i łącznością internetową, co umożliwia szybkie przesyłanie danych, a coraz częściej również ich wprowadzanie do baz danych, następnie analizę i konstrukcję map, zestawień wynikowych lub modeli złóż.

Jak już wspomniano, innowacyjność w poszukiwaniach złóż kopalin to również ekspansja takiej działalności na jeszcze niezbadane, trudno dostępne tereny. Do takich obszarów, dotychczas w większości niedostępnych, należą stare, zalane kopalnie podziemne. Ich penetracji za pomocą specjalnie w tym celu skonstruowanych robotów, wyposażonych w system sensorów i próbników, był poświęcony jeden z projektów UE – *Unemix (Underwater explorer for flooded mines)*; [www.unemix.eu](http://www.unemix.eu)). Głównym zastosowaniem takich robotów jest rozpoznanie i ocena potencjału surowcowego opuszczonych i zatopionych kopalń, oprócz tego mogą być one stosowane również do eksploracji jaskiń oraz badania lub monitoringu środowiska zbiorników wodnych. Innym przykładem zastosowania tego typu robotów może być prospekcja den mórz i oceanów (Mazurkiewicz, 2011; Brożyna, 2014). Jest ona prowadzona już od pewnego czasu, ale postęp techniczny ostatnich lat znacznie ją zdynamizował. Dotychczasowe wyniki badań den oceanicznych wskazują na obecność perspektywicznych obszarów koncentracji siarczkowych i tlenkowych rud metali występujących w postaci trzech głównych typów genetycznych (Abramowski, Kotliński, 2011; Piestrzyński, 2011; Zawadzki, Kotliński, 2011; Szamałek, 2018):

- hydrotermalnych, masywnych rud siarczkowych;
- tlenkowych naskorupień żelazowo-manganowych i kobaltowych;
- polimetalicznych, tlenkowych kongrecji żelazowo-manganowych.

W ostatnich latach podwyższoną zawartość niektórych metali stwierdzono także w przybrzeżnych mułach i ilach oceanicznych, np. w pobliżu Japonii. Na razie nie mają one znaczenia ekonomicznego.

Badania dna morskiego są intensywnie rozwijane. Obecnie już 29 firm, które są kontraktorami *International Seabed Authority (ISA)*, prowadzą poszukiwania, rozpoznanie i przygotowania do eksploatacji złóż kongrecji polimetalicznych (Hannington i in., 2010; Maciąg i in., 2015;

Szamałek, 2018). Polska, w ramach kontraktu zawartego z Międzynarodową Organizacją Dna Morskiego (ISA), uczestniczy jako członek konsorcjum *Interoceanmetal (IOM)* w rozpoznaniu jednej ze stref kongrecyjnych strefy Clarion–Clipperton (Jędrysek, 2010). Rozpoznanie jest prowadzone głównie poprzez: opróbowanie dna oceanicznego, foto- i TV-profilowanie, profilowanie sejsm akustyczne oraz poziomy i pionowy echosondaż dna morskiego z zastosowaniem echosondy wielowiązkowej (Kotliński, 2011; Abramowski i in., 2017).

Najbardziej obiecująco rysuje się wizja rozpoczęcia eksploatacji złóż kongrecji manganowych na dnie morskim (Kozioł, Brożyna, 2014; Niedoba, 2015). Jednak możliwość pozyskiwania bogactw mineralnych z den oceanicznych może być dość odległa w czasie (mimo że ten kierunek badań jest obecnie intensywnie rozwijany) i to nie z przyczyn technicznych i technologicznych, które oczywiście są ważnym czynnikiem warunkującym powodzenie tej działalności, ale z powodu ustalenia prawnych, międzynarodowych regulacji w tym zakresie, a w szczególności z powodu istotnych i nie w pełni poznanych negatywnych oddziaływań takiej eksploatacji na środowisko mórz i oceanów (Wołkiewicz, Paulo, 2019). Ten aspekt zadecydował o przerwaniu zaawansowanych już działań związanych z uruchomieniem eksploatacji pierwszego z takich złóż (Solwara 1), usytuowanego na Morzu Bismarcka, w wyłączonej strefie ekonomicznej Papui Nowej Gwinei, na głębokości 1600 m. Rudy występujące w złożu Solwara 1 zawierają m.in. 8,1% Cu i 6,4 g/t Au (Golder Associates, 2012).

Kolejnym kierunkiem prospekcji geologicznej, pozostającym na pograniczu *science fiction*, są badania możliwości pozyskania surowców mineralnych z innych planet, zwłaszcza z Marsa, a także z naszego Księżyca oraz z asteroid (Brożyna, 2014). Możliwościami wykorzystania bogactw mineralnych kosmosu jest zainteresowanych wiele krajów: USA (NASA), Rosja, Indie, Chiny, Japonia, państwa Unii Europejskiej (Europejska Agencja Kosmiczna) i Zjednoczone Emiraty Arabskie. W Polsce jednostką, która zajmuje się różnymi aspektami badań kosmosu, jest Centrum Badań Kosmicznych PAN. Istnieje też pokaźna liczba prywatnych firm zajmujących się tą problematyką i realizujących programy eksploatacji kosmicznej (np. *Moon Express, Space X, Deep Space Industry, Planetary Resources Inc.* i in.). Badania koncentrują się na: przygotowaniu i realizacji bezzałogowych misji poszukiwawczych, polegających na wysyłaniu małych teleskopów obserwacyjnych (np. typu *Akryd*), a następnie sond do poboru i analiz próbek, produkcji prototypowych narzędzi: próbników, penetratorów (np. polski MIKRORES), pojazdów, mobilnych spektrometrów i innych urządzeń do prowadzenia analiz *in situ*. Oprócz aspektu ekonomicznego tych nieco futurystycznych działań, kluczowe znaczenie mają wyzwania natury technicznej i technologicznej. Do najważniejszych należą: problem zapewnienia odpowiedniego paliwa dla pracujących urządzeń, opracowanie technologii przyszłej eksploatacji w warunkach bez grawitacji oraz transport pozyskanej kopaliny. Zaawansowane są np. prace nad rozwojem techniki napędu słoneczno-elektrycznego (SEP – *solar electric propulsion*) czy konstrukcją silnika jonowego przeznaczonego do podróży kosmicznych.

Kompleksowym projektem UE dotyczącym nowoczesnych metod poszukiwań złóż w Europie jest projekt



INFACT (*Innovative, non-invasive and fully acceptable exploration technologies*; [www.infactproject.eu](http://www.infactproject.eu)). Dotyczy on złóż kopalin strategicznych, rozumianych jako krytyczne dla gospodarki UE, oraz innych, mających duże znaczenie ekonomiczne. Jego cele to: identyfikacja obszarów perspektywicznych i wytypowanie kilku spośród nich do badań pilotażowych, przegląd metod poszukiwań z naciskiem na metody pasywne, badanie poziomu akceptacji społecznej dla działalności poszukiwawczej (i potencjalnie górniczej), ocena związanych z nią uwarunkowań formalno-prawnych oraz określenie wpływu takich badań na środowisko naturalne.

## WYDOBYWANIE KOPALIN

Innowacyjne technologie, rozwiązania organizacyjne oraz modernizacja parku maszynowego są również dynamicznie wprowadzane w górnictwie. Nadrzędnym i oczywistym celem tych innowacji jest optymalizacja zysków, na którą składa się wiele powiązanych ze sobą czynników, takich jak: racjonalne wykorzystanie zasobów złóż kopalin, poprawa bezpieczeństwa pracy i ograniczenie wypadkowości w górnictwie. Jednym z kluczowych kierunków działań branży górniczej, wymuszonym przez coraz to ostrzejsze wymagania formalno-prawne, jest obecnie zmniejszenie jej negatywnego oddziaływania na środowisko przyrodnicze. Dodatkowo wyczerpywanie się zasobów kopalin w złożach pierwotnych skutkuje wieloma działaniami ukierunkowanymi na sięganie po te, które są coraz trudniej dostępne. Wiąże się to z:

- ❑ eksploatacją małych, często ubogich, trudno dostępnych złóż o skomplikowanych warunkach geologiczno-górnicznych;
- ❑ wzrostem głębokości eksploatacji;
- ❑ rozwojem działalności wydobywczej w trudno dostępnych obszarach Arktyki;
- ❑ planowaną eksploatacją z dna mórz i oceanów (górnictwo podmorskie) oraz z kosmosu.

Optymalizacja zysków, a co najmniej zapewnienie pożądanych efektów ekonomicznych, przy spełnieniu rosnących wymagań środowiskowych i socjalnych (w tym bezpieczeństwa pracy w górnictwie), jest z kolei motorem działań ukierunkowanych na wdrażanie nowych metod wydobywania kopalin (np. podziemnej eksploatacji złóż kopalin skalnych tradycyjnie wydobywanych metodami odkrywkowymi) oraz wielkoskalową eksploatację odkrywkową.

Przed górnictwem stoją nowe wyzwania, które wymagają zastosowania innowacyjnych technik i technologii, polegających głównie na:

- ❑ optymalizacji procesów wydobywczych i ich powiązaniu z procesami przeróbki;
- ❑ automatyzacji procesów wydobywczych i ich zdalnym sterowaniu oraz programowaniu;
- ❑ robotyzacji, mającej na celu eliminację udziału człowieka w najbardziej niebezpiecznych czynnościach, zwłaszcza związanych z wydobywaniem na dużych głębokościach;
- ❑ wprowadzeniu monitoringu przebiegu różnych faz eksploatacji, prowadzonego w czasie rzeczywistym;
- ❑ budowie nowoczesnych maszyn urabiających i urządzeń transportowych.

Oczekiwania na dynamiczny wzrost automatyzacji i robotyzacji w górnictwie, prowadzący do tworzenia nowoczesnych, tzw. inteligentnych, kopalń, są ogromne. Według niektórych postulatów do 2030 r. górnictwo powinno być automatyzowane w 95%, tak jak obecnie przemysł samochodowy. Idea tzw. inteligentnej kopalni pojawiła się ok. 10 lat temu i zainicjowała realizację wielu projektów badawczych (Hejny, 2011). Jeszcze dalej poszła inicjatywa tzw. niewidocznej kopalni (*invisible mine*) ukierunkowana na rozwój podziemnej eksploatacji (i przeróbki) kopalin tradycyjnie wydobywanych metodami odkrywkowymi. Jej zasadniczym przesłaniem było ograniczenie negatywnego oddziaływania górnictwa na środowisko i minimalizacja przekształceń krajobrazowych (Galos, Guzik, 2013; Galos i in., 2014; Nowak i in., 2018). Jeszcze innym przejawem innowacyjności są programy tworzenia wirtualnej kopalni i symulacji wydobywania, poprzedzające realne działania górnicze (Jurdziak, Kawalec, 2011). Postępy we wdrażaniu nowych technologii do przemysłu, w szczególności w zakresie komputeryzacji, automatyzacji i robotyzacji, można porównać do czwartej rewolucji przemysłowej (Kawalec, 2018).

Jednym z ciekawych projektów dotyczących robotyzacji w górnictwie jest projekt *Robominers* ([www.robominers.eu](http://www.robominers.eu)), poświęcony nowatorskim rozwiązaniom w równoważonej produkcji surowców mineralnych. Jego głównym celem jest stworzenie prototypu robota górniczego inspirowanego cechami biologicznymi, wprowadzanego do górotworu modułowo przez wielkośrednicowe otwory wiertnicze, a następnie samomontującego się. Robot ten byłby przeznaczony do eksploracji oraz do selektywnej eksploatacji głębokich złóż o skomplikowanej budowie geologicznej i niewielkich zasobach.

Optymalizacja procesów wydobywczych obejmuje wiele elementów. Jej podstawą jest odpowiednie zaprogramowanie tych procesów w nawiązaniu do modeli złóż i ich głównych parametrów górniczych, oczekiwanej jakości kopaliny, przyjętego sposobu zagospodarowania złoża czy wreszcie planowanej wielkości wydobywania (np. Chudzik i in., 2017; Naworyta, 2017). Zarządzanie wydobywaniem kopaliny wymaga zgromadzenia danych w formie cyfrowej (digitalizacji) oraz dobrego oprogramowania do analizy danych, współpracującego z oprogramowaniem projektowym i wspierającym, a także zdalnego kierowania technologią wydobywania, logistyką gospodarki materiałowej i zarządzaniem zasobami ludzkimi. W polskim górnictwie odkrywkowym rozwiązaniem coraz powszechniej stosowanym w tym celu są tzw. górnicze systemy nawigacyjno-kontrolne (Kiełbasiewicz, 2014, 2015).

Wiele innowacyjnych rozwiązań wdrożono ostatnio na rzecz optymalizacji robót strzałowych, zarówno w górnictwie odkrywkowym, jak i podziemnym. Na przykład do pomiarów parametrów siatki strzałowej zastosowano lasery (Brych, Rogacz, 2012), wprowadzono automatyczne wiercenie otworów strzałowych, stosowanie techniki strzałowej o ultrawysokiej intensywności, wdrożono używanie i programowanie zapalników elektronicznych czy zdalne sterowanie robotami wiertniczo-strzałowymi (Maranda i in., 2014; Maranda, 2020). Dobrym przykładem oprogramowania do robót strzałowych jest program *O-Pitblast* (Hetmańska, 2019).

Jedną z widocznych tendencji w górnictwie jest też ograniczanie wewnętrznego transportu urobku, co przeja-

wia się w większym niż dotychczas powiązaniu wydobycia z przeróbką, stosowaniu kombinowanych systemów transportowych, używaniu coraz to większych maszyn i urządzeń zarówno urabiających, jak i transportowych.

Przykładem nowoczesnego sprzężenia procesów wydobycia i przeróbki jest zastosowanie procesów ługowania urobku na miejscu (*in situ leaching*), inne modyfikacje metod ługowania (*heap leaching*) lub bezpośrednia elektroliza siarczków. Wiele projektów badawczych zostało też poświęconych biogórnictwu, w szczególności technologii mikrobiologicznego utleniania lub ługowania żelaza i siarki w złożach rud siarczkowych (Watling, 2010; Goodboy, 2016; Sanwani i in., 2016) lub też materiale odpadowym (Xiang i in., 2010). Jednym z takich projektów był np. projekt *BioMore*, realizowany w ramach programu *Horyzont 2020*. Projekt ten został poświęcony eksploatacji górniczej głębokich złóż z zastosowaniem biotechnologii w celu ekstrakcji metali. W jego realizacji uczestniczyły KGHM Polska Miedź S.A. i Instytut Metali Nieżelaznych ([www.kierunekchemia.pl/artykuł50881](http://www.kierunekchemia.pl/artykuł50881)).

Wart odnotowania jest również futurystyczny projekt *CHPM2030* (*Combined Heat, Power and Metal extraction*; [www.chpm2030.eu](http://www.chpm2030.eu)), którego celem jest opracowanie i pilotażowe wdrożenie (do 2030 r.), a następnie komercyjne wykorzystanie (w horyzoncie do 2050 r.) innowacyjnej technologii skojarzonego pozyskiwania ciepła, energii i metali z ultragłębokich formacji metalicznych poprzez przekształcenie ich w systemy geotermalne. Spodziewanym efektem takiego rozwiązania jest podniesienie efektywności ekonomicznej odzysku ciepła geotermalnego. Samo zaś pozyskiwanie metali ma się odbywać metodami ługowania oraz elektrochemicznymi.

Kluczem do optymalizacji i automatyzacji procesów wydobywczo-przetwórczych są więc nowoczesne systemy zdalnego sterowania maszynami górniczymi, które wykorzystują sieć odpowiednio zaprojektowanych sensorów współpracujących z radarami, kamerami wizyjnymi, skanerami laserowymi i innymi urządzeniami rejestrującymi zmiany geometrii i parametrów górotworu, ruch innych maszyn i inne czynniki. Podstawowymi mediami transmisyjnymi systemów sterowania maszynami są infrastruktura światłowodowa, łączność radiowa i szkieletowa sieć bezprzewodowa *Ethernet*. Pozwalają one na szybkie przesyłanie danych na znaczne odległości i bieżące zdalne sterowanie procesami wydobywczymi, które odbywają się zgodnie z zaplanowanymi schematami i harmonogramami. Możliwość mobilnego kontaktu operatorów urządzeń z systemem sterującym i osobami kontrolującymi przebieg pracy pozwala też na szybką reakcję w przypadku wystąpienia zakłóceń lub nieprawidłowości.

Kolejną fazą automatyzacji jest robotyzacja, prowadząca do wyeliminowania człowieka z wykonywania najbardziej niebezpiecznych działań. Jest ona stosowana głównie w kopalniach podziemnych, ale również w odkrywkowych. Dotyczy nie tylko procesów sterowania, ale i całkowitej obsługi maszyn. Robotyzacja jest wykorzystywana zarówno w pracy maszyn wiertniczych (Marianowski, 2015), jak i kombajnów urabiających oraz w sprzężonych z nimi systemach transportu urobku, a także w pojedynczych maszynach lub urządzeniach. Przykładowo w wywrotkach *Komatsu 930E* (ładowność 290 t) zastosowano sztuczną inteligencję, która na bieżąco „uczy się” geografii kopalni i aktualizuje w pamięci komputera mapę

wyrobisk. Pojazd jest wyposażony w autonomiczny system jazdy, liczne sensory (radarowe i laserowe), wysokiej precyzji GPS, system detekcji przeszkód i sieć bezprzewodową.

Współcześnie funkcjonują już na świecie pierwsze bezzałogowe kopalnie. Przykładem niech będzie jedna z australijskich kopalń odkrywkowych rud złota (*West Angelles*, zarządzana przez giganta górniczego firmę *Rio Tinto*), w której zastosowano pełne zdalne sterowanie wszystkimi wywrotkami i ciężkimi wiertnicami obrotowymi, sprzężonymi ze zautomatyzowaną logistyką transportu i innymi czynnościami technologicznymi w odkrywce (Brożyna, 2015). Wszystkie czynności maszyn są sterowane z centrum operacyjnego w Perth, oddalonego o 1500 km. Natomiast operatorzy pracujący na terenie kopalni obserwują z ruchomych kabin i nadzorują pracę bezzałogowych maszyn. Jeszcze dalej posuniętym rozwiązaniem jest pełna, zdalna kontrola nad pracami maszyn dzięki zainstalowaniu na każdej z nich sensorów i wideokamer stale monitorujących pracę urządzeń urabiających. Nad takimi rozwiązaniami pracuje wiele firm górniczych na świecie i w Polsce. Wśród nich należy wymienić KGHM Polska Miedź S.A., który już obecnie posiada rozbudowaną bazę informatyczną i cyfrowe bazy danych, zarządzane przez Centrum Analiz Strategicznych i Bazę Zasobową. Znaczna część transportu urobku w kopalniach tej firmy jest zautomatyzowana, prowadzony jest skaning 3D wyrobisk górniczych, automatycznie kontrolowanych jest wiele etapów prac dołowych.

Zautomatyzowana i na bieżąco prowadzona kontrola procesów wydobywczych jest coraz szerzej rozwijana. Do jej prowadzenia w kopalniach odkrywkowych, np. do bieżącego kartowania ścian wyrobisk i monitoringu jakości powietrza coraz powszechniej używa się również dronów wyposażonych w odpowiedni osprzęt (Bui i in., 2019). Automatyzacja i robotyzacja procesów wydobywczych jest również warunkiem koniecznym do prowadzenia robót górniczych na coraz większych głębokościach.

Kolejnym elementem innowacyjnych badań na potrzeby górnictwa jest minimalizacja zużycia energii, m.in. coraz szersze zastosowanie silników hybrydowych, napędu elektrycznego, a także poszukiwanie nowych, alternatywnych źródeł energii. Obiecującym i oczekiwanym rozwiązaniem jest konstrukcja małych reaktorów modułowych, co umożliwi udostępnienie odległych i słabo dostępnych złóż. Badania takie są rozwijane m.in. w Kanadzie, przy wsparciu Ministerstwa Energii i Zasobów Naturalnych Prowincji Ontario (Gihm, 2017).

Innowacyjne techniki górnicze są ściśle powiązane z modernizacją całego parku maszynowego. Dotyczy to nie tylko automatyzacji oraz wspomnianego już wyposażenia sprzętu w różnego rodzaju czujniki, ale i konstrukcji nowych typów maszyn urabiających i urządzeń transportowych. Tu głównym celem jest wzrost ich pojemności i wydajności. Optymalizacji prac górniczych służy też odpowiednie wykorzystanie maszyn skonstruowanych w technologii *lean*, zapewniającej oszczędność i racjonalność. Przewiduje się, że dalsze działania innowacyjne będą ukierunkowane właśnie na oszczędność, poprawę bezpieczeństwa pracy – redukcję emisji, w tym CO<sub>2</sub> i innych zanieczyszczeń, minimalizację ilości odpadów oraz odpowiedzialność społeczną.

## WZBOGACANIE I PRZETWÓRSTWO SUROWCÓW

Przetwórstwo surowców daje duże pole do wdrażania nowych technologii. Działania te rozwijają się w kilku kierunkach:

- ❑ optymalizacja znanych już metod wzbogacania i przetwórstwa surowców;
- ❑ opracowanie i wdrożenie nowych metod;
- ❑ rozwój nowoczesnych, wydajnych maszyn i urządzeń.

Optymalizacja przetwórstwa surowców rozwija się zarówno w kierunku wzrostu efektywności odzysku składników użytecznych, np. z niskoprocentowych rud metali lub trudno wzbogacalnych rud, jak i ograniczenia ilości odpadów (np. w górnictwie kopalni skalnych), zwłaszcza szkodliwych, a także innych niekorzystnych oddziaływań przetwórstwa na środowisko. Dotyczy ona w szczególności modyfikacji stosowanych już technologii wzbogacania, np. flotacji (Carly, 2019), oraz przetwórstwa surowców, np. cyjanizacji. Przykładem takich optymalizacji jest: wykorzystanie węgla aktywnego (wytwarzanego z łupin kokosa lub z węgla drzewnego) do odzysku złota z roztworu po ługowaniu złota metodą cyjanizacji i inne modyfikacje tej standardowej już metody, a ponadto korzystanie z nowych adsorbentów do produkcji nanomateriału STARBON, stosowanego w celu odzysku metali szlachetnych (złota, platyny i palladu). Do odzysku metali krytycznych coraz powszechniej stosuje się unowocześnione metody piro- i hydrometalurgiczne oraz bezpośrednie ługowanie.

Opracowanie i wdrożenie nowych metod wzbogacania rud metali jest ukierunkowane na odzysk metali towarzyszących, które występują w bardzo niewielkich koncentracjach, a które dotychczas nie były odzyskiwane. Ma to szczególnie duże znaczenie dla odzysku tzw. surowców krytycznych. Wśród wielu nowoczesnych technologii do wiodących, a zarazem mających jeszcze wielki potencjał rozwoju, należą metody biotechnologiczne, np. biometalurgiczne (Goodboy, 2016). Niekiedy są one stowarzyszone z hydrometalurgicznymi jako tzw. metody hybrydowe, np. odzysk złota w wyniku biosorpcji lub zastosowanie bioługowania rud miedzi oraz bioflotacji do wzbogacania rud miedzi, żelaza, ołowiu i cynku (Sanwani i in., 2016). Testowane i stosowane są też techniki hybrydowe, polegające na łączeniu elementów kilku dotychczas stosowanych metod, np. wstępne, mechaniczne oddzielenie składników rud, a następnie zastosowanie procesów bio- i hydrometalurgicznych, połączonych z biosorpcją wydzielonych metali (głównie miedzi i złota). Istotą modyfikacji w innej metodzie ługowania, standardowo stosowanej do ekstrakcji platynowców ze zużytych katalizatorów, jest wspomagające, mikrofalowe podgrzewanie (*microwave assisted leaching*; Suoranta i in., 2015). Na etapie prób jest tzw. metoda mikrofluidalna, stosowana dotychczas w przemyśle farmaceutycznym i medycynie, w której proces ługowania pożądanego składnika odbywa się na poziomie nanocząsteczek, a którą próbuje się wykorzystać do odzysku platynowców i REE.

Dynamicznie rozwija się również zastosowanie maszyn i urządzeń nowej generacji w procesach przetwórstwa surowców mineralnych. Rozwój ten wyraźnie wpływa zarówno na większą wydajność i efektywność pozyskiwania surowców, jak i ograniczenie negatywnego oddziaływania tej działalności na środowisko naturalne. Osiągnięcia i in-

nowacje na tym polu dotyczą procesów uszlachetniania rud metali i kopalni skalnych, np. nowoczesne kruszarki i przesiewacze zaopatrzone w sensory umożliwiające otrzymywanie frakcji surowców o dużej czystości oraz ograniczające pylenie w trakcie rozdrabniania i przesiewania urobku. Kilka wybranych przykładów to np. system optycznego sortowania urobku, w kopalni magnezytu *Grochów* z powodzeniem wdrożony do rozdzielania magnezytu od serpentynitu (Szewczyk, 2013); osadzarki pulsacyjne, pozwalające na precyzyjne oddzielenie zanieczyszczeń organicznych i alkalicznych w żwirach (Kwiatkowski, 2013); śledzenie jakości rudy na przenośnikach taśmowych (Bardziński i in., 2019) i walcowe rozdrabniacze wysokociśnieniowe (HPGR – *high pressure grinding rolls*).

## PODSUMOWANIE

Dokonany w niniejszym artykule przegląd innowacji w przemyśle wydobywczym wskazuje na mnogość różnych działań w tej dziedzinie. Są one wprowadzane również w sektorze bezpieczeństwa prac i robót górniczych, a także szeroko pojętych działań kontrolno-zarządczych, zmierzających do integracji poszczególnych procesów w całym łańcuchu gospodarowania bogactwami mineralnymi Ziemi. Warto też zwrócić uwagę na to, że rozwój nowych technologii na wszystkich etapach działalności geologiczno-górnictwej wymaga rozwiązania wielu problemów formalno-prawnych, w szczególności:

- ❑ stworzenia nowych regulacji prawnych umożliwiających formalne wdrożenie innowacyjnych metod do stosowanych już procedur oraz uproszczenie tych procedur;
- ❑ opracowania regulacji prawnych dotyczących reguł wykorzystania dna mórz i oceanów na potrzeby górnictwa podmorskiego oraz dostosowanie zakresu raportów środowiskowych do tej specyficznej działalności (nowe spektrum oddziaływań środowiskowych);
- ❑ opracowania standardów lotniczych związanych z użyciem dronów i badaniami lotniczymi;
- ❑ uregulowania zasad przelotów nad terenami prywatnymi w celu prowadzenia badań z powietrza (ze względu na możliwość inwigilacji oraz uciążliwość);
- ❑ zapewnienia dostępu do podstawowych danych topograficznych, geologicznych archiwalnych, analitycznych itd. – na transparentnych zasadach (sugerowany wolny dostęp do tych danych, które w wielu krajach są traktowane jako dane środowiskowe);
- ❑ ograniczenia konfliktów społecznych poprzez lepsze regulacje odnośnie ograniczenia emisji do atmosfery CO<sub>2</sub> oraz innych szkodliwych substancji. Skrajnymi postulatami w tym zakresie są: rezygnacja ze sprzętu spalinowego w górnictwie i przetwórstwie surowców (*no diesel equipment*) oraz robót strzałowych (*no blasting*).

## LITERATURA

- ABRAMOWSKI T., KOTLIŃSKI R. 2011 – Współczesne wyzwania eksploatacji ocnicznych kopalni polimetalicznych. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 35 (4/1): 41–61.
- ABRAMOWSKI T., STEFANOVA V., CAUSSE R., ROMANCHUK A. 2017 – Technologies for the processing of polymetallic nodules from



- Clarion–Clipperton zone in the Pacific Ocean. *J. Chem. Tech. Metallurgy*, 52: 258–269.
- AMEDJOE CH.G., ADJOVU I.T. 2013 – Application of the mobile metal ion geochemical technique in the location of buried gold mineralization in Essace Concession, Eastern Region, Ghana. *J. Geol. Mining Res.*, 5 (6): 147–160.
- BARDZIŃSKI P., JURDZIAK L., KAWALEC W., KRÓL R. 2019 – Copper ore quality tracking in a belt conveyor system using simulation tools. *Natural Resources Res.*, 28: 1–10.
- BROŻYNA A. 2014a – Oceaniczny potencjał. *Sur. i Masz. Bud.*, 2: 47–52.
- BROŻYNA A. 2014b – Surowce z kosmosu – *science fiction* czy fakt? *Sur. i Masz. Bud.*, 6: 76–80.
- BROŻYNA A. 2015 – Roboty do roboty. *Sur. i Masz. Bud.*, 2: 21–26.
- BRYCH M., ROGACZ K. 2012 – Optymalne strzelanie. *Sur. i Masz. Bud.*, 2: 33–36.
- BUI X.N., LEE C., NGUYEN Q.L. 2019 – Use of Unmanned Aerial Vehicles for 3D Topographic Mapping and Monitoring the Air Quality of Open-Pit Mines. *Inż. Mineralna*, 44 (2): 223–239.
- BUTRA J., MADZIARZ M., PAWELUS D. 2017 – Wykorzystanie metody georadarowej w poszukiwaniu podziemnych wyrobisk górniczych oraz innych obiektów inżynierskich. *CUPRUM – Czasopismo Nauk-Tech. Górnictwa Rud.*, 83 (2): 5–27.
- CARLY L. 2019 – Froth Flotation for the 21<sup>st</sup> Century. *Eng. and Mining J.*, 12: 58–64.
- CHUDZIK W., CZARNOMSKI M., GARCZAREK J. 2017 – Wykorzystanie modelowania złóż w bieżącej obsłudze geologicznej kopalń odkrywkowych złóż kruszyw naturalnych oraz surowców skalnych. *Gór. Odkryw.*, 4: 18–22.
- CIECHANOWSKA M. (red.) 2016 – Poszukiwanie i eksploatacja złóż ropy i gazu ziemnego – nowe technologie, nowe wyzwania. *Wyd. Inst. Nafty i Gazu - PIB, Kraków*.
- GALOS K., GUZIK K. 2013 – Eksploatacja podziemna kamieni blocznych – podstawowe aspekty geologiczne i górnicze. *Zesz. Nauk. IGSMiE PAN*, 84: 25–36.
- GALOS K., GUZIK K., KOT-NIEWIADOMSKA A., STACHOWIAK A. 2014 – Eksploatacja podziemna kamieni blocznych w Europie. *Mining Science-Mineral Aggregates*, 21 (1): 49–64.
- GIHM B. 2017 – Alternative energy sources. Nuclear power on a micro-scale. *Mining Mag.*, 6: 30–32.
- GOLDER ASSOCIATES 2012 – Mineral resource estimate Solwara Project, Bismarck Sea, PNG. Technical Report compiled under NI43–101 for Nautilus Minerals Nuigini Limited.
- GOODBOY A. 2016 – Embracing the benefits of bacteria. *Mining Mag. Dec.*: 34–38.
- HANNINGTON M., JAMIESON J., MONECKE T., PETERSEN S. 2010 – Modern Sea-Floor Massive Sulfides and Base Metal Resources: Toward an Estimate of Global Sea-Floor Massive Sulfide Potential. *Econom. Geol. Spec. Publ.*, 15: 317–338.
- HEJNY H. 2011 – The intelligent deep mine. *Res. Develop.*, 3: 40–44.
- HETMAŃSKA M. 2019 – Strzał w rozwój. Oprogramowanie Pitblast jako wsparcie przy projektowaniu specjalistycznych strzelania metodami gładkościennymi. *Sur. i Masz. Bud.*, 3: 58–61.
- JĘDRYSEK M.O. 2010 – Krótka historia działań w zakresie złóż rud metali na dnach oceanów w strefach kontrolowanych przez Międzynarodową Organizację Dna Morskiego: Wybrane aspekty dotyczące prawa, możliwej eksploatacji i ochrony środowiska, Dzieje Górnictwa – element dziedzictwa kultury, t. 3, Wrocław.
- JURDZIAK L., KAWALEC W. 2011 – Wirtualna kopalnia – nowe możliwości zapewnienia bezpiecznej i efektywnej ekonomicznie eksploatacji. Jubileuszowa Międz. Konf. *X Szkoła Geomechaniki*. *Mat. Nauk. Wydz. Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej*: 93–111.
- KAWALEC P. 2018 – Kopalnia 4.0. *Science fiction czy rzeczywistość?* *Sur. i Masz. Bud.*, 5: 10–16.
- KAWALEC R. 2019 – Dron wylądował. *Sur. i Masz. Bud.*, 3: 54–57.
- KIELBASIEWICZ W. 2014 – Eksploatacja ze wspomaganiami. Zalety systemu kontroli w czasie rzeczywistym. *Sur. i Masz. Bud.*, 2: 42–46.
- KIELBASIEWICZ W. 2015 – Wspomaganie po nowemu. *Sur. i Masz. Bud.*, 2: 34–37.
- KOTLIŃSKI R. 2011 – Pole koncentracjonalne Clarion–Clipperton – źródło surowców w przyszłości. *Górn. i Geoinżynieria*, 35 (4/1): 195–212.
- KWIATKOWSKI R. 2013 – 99,99% czystości żwiru – 25 lat doświadczeń allmineral w innowacyjnych technologiach uszlachetniania. *Sur. i Masz. Bud.*, 3: 47–48.
- KOZIOŁ W., BROŻYNA A. 2014 – Technologie wydobywania i odzysku metali z koncentracji polimetalicznych zalegających na dnie oceanów. *Prz. Gór.*, 5: 113–116.
- KOZIOŁ W., BARAŃSKI K., BORCZ A., MACHNIAK Ł. 2013 – Zastosowanie metod geofizycznych do identyfikacji skał trudno urabialnych w kopalniach odkrywkowych. *Gór. Odkr.*, 54 (1): 13–21.
- LEE J.B., DART D.L., TURNER J.R., DOWNEY M.A. 2002 – Airborne TEM surveying with a SQUID magnetometer sensor. *Geophysics, Society of Exploration Geophysicists*, 82 (2): 468–477.
- MACIĄG Ł., ZAWADZKI D., KOTLIŃSKI A. 2015 – Współczesne wyzwania i ograniczenia górnictwa morskiego. IV Ogólnopolska Konf. Naukowa „Złóża kopalni – aktualne problemy prac poszukiwawczych badawczych i dokumentacyjnych”. *Abstrakty. PIG-PIB*: 75–78.
- MANN A.W., BIRRELL R.D., MANN A.T., HUMPHREYS D.B., PERDRIX J.L. 1998 – Application of the mobile metal ion technique to routine geochemical exploration. *J. Geochem. Expl.*, 61: 87–102.
- MARANDA A. 2020 – Charakterystyka materiałów wybuchowych stosowanych w górnictwie odkrywkowym. *Kruszywa*, 2: 48–55.
- MARANDA A., GOŁĄBEK B., RINK P., SUSZKA J. 2014 – Nowoczesne rozwiązania w technice strzelniczej. *Materiały Wysokoenergetyczne*. 6: 15–22.
- MARIANOWSKI J. 2015 – Wiercenie XXI w. *Sur. i Masz. Bud.*, 2: 27–33.
- MAZURKIEWICZ B. 2011 – Wydobywanie zasobów surowcowych dna mórz i oceanów naczelnym zadaniem polityki gospodarczej państwa. *Górn. i Geoinżynieria*, 35 (4/1): 267–281.
- NAWORZYTA W. 2017 – Meandry modelowania złóż – na podstawie doświadczeń i obserwacji. *Górn. Odkryw.*, 58 (4): 4–9.
- NIEDOBA T. 2015 – Polymetallic Concretions – Long-Range Source of Mineral Raw Materials. *Inż. Mineralna*, 1: 61–74.
- NOWAK J., KORTNIK J., STANIENDA-PILECKI K. 2018 – Podziemna eksploatacja wapieni na przykładzie kopalń Hotavlje i Sežana w Słowenii. *Prz. Gór.*, 4: 45–54.
- PIESTRZYŃSKI A. 2011 – Surowce mineralne oceanów. *Górn. i Geoinżynieria*, 35 (4/1): 303–310.
- RAJCHEL B., PYTLOWANY T. 2015 – Zastosowanie metody georadarowej w rozwiązywaniu problemów inżynierskich budownictwa komunikacyjnego. *Technika Transportu Szynowego*, 22 (12): 1295–1299.
- SANWANI E., CHAERUN S., MIRAHTI R., WAHYUNINGSIH T. 2016 – Bioflotation: bacteria-mineral interaction for eco-friendly and sustainable mineral processing. *Procedia Chemistry*, 19: 666–672.
- SUORANTA T., ZUGAZUA O., NIEMELA M., PERMAKI P. 2015 – Recovery of palladium, platinum, rhodium and ruthenium from catalyst material using microwave-assisted leaching and cloud point extraction. *Hydrometallurgy*, 154: 56–62.
- SZAMAŁEK K. 2018 – Stan rozpoznania oceanicznych zasobów mineralnych. *Prz. Geol.*, 66 (3): 189–193.
- SZEWCZYK S. 2013 – Oddzielić żółto-brązowe od szarego. *Sur. i Masz. Bud.*, 3: 62.
- SZEWCZYK S. 2015 – Science fiction czy przyszłość. *Sur. i Masz. Bud.*, 2: 11–13.
- TAMIR R., WAGNER J., CAMPBELL J. 2016 – The sky’s limit. *Mining Mag. Oct.*, 45–47.
- TAREŁKO W. 2016 – Systemy poszukiwania złóż ropy naftowej i gazu ziemnego pod dnem morskim. *Prz. Mech.*, 12: 52–56.
- TOST M. 2017 – Policy Laboratory 2 Report: Innovations and supporting policies for minerals exploration and extraction; [www.min-guide.eu](http://www.min-guide.eu).
- WATLING H.R. 2006 – The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides. *Hydrometallurgy*, 84: 81–108.
- WILLIAMS D. 2017 – UAVS and drones. [www.MiningMagazine.com](http://www.MiningMagazine.com)
- WOŁKOWICZ S., PAULO A. 2019 – Blue mining na Atlantyku – realne potrzeby czy potrzeba realizmu? *Prz. Geol.*, 67 (2): 91–103. [www.min-guide.eu](http://www.min-guide.eu)
- [www.kierunekchemia.pl/artyku50881](http://www.kierunekchemia.pl/artyku50881)
- XIANG Y., ZHU N., LIU W., WU J., LI P., 2010 – Bioleaching of copper from waste printed circuit boards by bacterial consortium enriched from acid mine drainage. *J. Hazard Mater.*, 184: 812–818.
- ZAWADZKI D., KOTLIŃSKI R. 2011 – Uwarunkowania występowania i rozmieszczenia perspektywicznych nagromadzeń tlenkowych skupień żelazowo-manganowych. *Górn. i Geoinżynieria*, 35 (4/1): 427–439.

Praca wpłynęła do redakcji 15.05.2020 r.  
Akceptowano do druku 12.08.2020 r.