



Tadeusz SMAKOWSKI\*, Stanisław WOŁKOWICZ\*\*, Jerzy B. MIECZNIK\*\*\*

## ***Możliwe źródła zaopatrzenia w paliwo potencjalnych elektrowni jądrowych w Polsce***

Streszczenie: Plany rozwoju energetyki jądrowej w Polsce spowodowały kolejną falę zainteresowania występowaniem rud uranu w Polsce. Obecnie uran nie jest traktowany jako surowiec strategiczny i Polska potencjalnie może go pozyskać na zasadach rynkowych. Stąd też niniejsza analiza geologiczno-gospodarcza występień uranu w Polsce nawiązuje ściśle do aktualnych światowych trendów w geologii i gospodarce uranem. Postępujący rozwój technologii odzysku uranu i nacisk na efektywność ekonomiczną przedsięwzięć górniczo-przeróbczych spowodowały, że zainteresowanie budzą przede wszystkim złoża występujące na powierzchni terenu lub na bardzo małych głębokościach (złoża kalkretowe, w granitach/alaskitach i typu metasomatycznego) nadające się do taniej eksploatacji metodą odkrywkową, złoża typu piaskowcowego nadające się do eksploatacji metodą podziemnego ługowania, występujące do głębokości 500 m, oraz bardzo bogate złoża związane z niezgodnościami proterozoicznymi lub polimetaliczne złoża w brekcjach hematytowych. Dotychczas największymi producentami uranu były Kanada i Australia, ale od 2008 r. największym producentem został Kazachstan, dynamicznie rozwijający produkcję żółtego keku ze złóż w piaskowcach metodą ługowania *in situ*. Także państwa afrykańskie, przede wszystkim Namibia i Niger, oraz Rosja i Uzbekistan należą do poważnych producentów światowych. Natomiast kraje Europy środkowo-zachodniej, będące w przeszłości ważnymi dostawcami uranu (Francja, b. Czechosłowacja, b. NRD) praktycznie zaprzestały wydobycia na swoim terenie, co było spowodowane wyczerpaniem się zasobów złóż z jednej strony i restrykcyjnymi względami środowiskowymi z drugiej.

Wystąpienia uranu w Polsce znane są z dolnoordowickich łupków dictyonemowych obniżenia podlaskiego (typ łupków czarnych) i triasowych piaskowców syneklizy perybałtyckiej (złoża typu piaskowcowego). Głębokość występowania, niskie zawartości (łupki ordowiku), bardzo duża zmienność okruszcowania (piaskowce triasu) powodują, że nie mają one złożowego znaczenia i mogą być klasyfikowane co najwyżej jako wystąpienia rud U o niewielkich zasobach o charakterze prognostycznym lub perspektywicznym, występujące w trudnych warunkach geologiczno-górniczych oraz środowiskowo-krajobrazowych.

Słowa kluczowe: geologia gospodarcza, złoża uranu, elektrownie jądrowe, paliwo jądrowe

\* Mgr inż., \*\* Prof. nadzw. PIG-PIB dr hab., \*\*\* Dr, Państwowy Instytut Geologiczny-Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa; e-mail: tadeusz.smakowski@pgi.gov.pl, stanislaw.wolkowicz@pgi.gov.pl, jerzy.miecznik@pgi.gov.pl

## **Possible sources of nuclear fuel supply for potential nuclear power plants in Poland**

**Abstract:** The latest plans to develop a nuclear energy industry in Poland led to revival of interest in domestic uranium reserves. However, in the meantime uranium lost its status of a strategic raw material which opened possibilities to import that commodity. This makes it necessary to conduct geological-economic analysis of Polish uranium deposits in close reference to current world trends in development and management of uranium resources. The recent developments in technology of uranium production and market requirements for economic efficiency of mining operations and processing focus on deposits occurring at the surface or shallow depths (calcrete deposits, those related to granites/alaskites or of the metasomatic type) suitable for inexpensive open-pit mining, deposits of the sandstones type at depths not greater than 500 m and suitable for mining by underground leaching, and very rich deposits related to Proterozoic unconformities or hematite breccias. Canada and Australia had been the main uranium producers until 2008 when the first place has been taken over by Kazakhstan thanks to dynamic growth of its production of yellow cake from sandstone uranium deposits mined by in situ leaching. The other leading producers include Namibia, Niger and some other African countries, as well as Russia and Uzbekistan. In turn, several important suppliers from the past (as e.g. France, former Czechoslovakia or former East Germany) have practically ceased out the production due to exhaustion of economic resources and/or environmental restrictions.

In Poland uranium mineralization has been found in Lower Ordovician Dictyonema Shale in the Podlasie Depression (deposit of the black shale type) and Triassic Sandstones in the Peribaltic Syncline (deposit of the sandstone type). The depth of burial combined with low concentrations of uranium (Ordovician Shale) and very high variability in mineralization (Triassic sandstones) make these deposits uneconomic and classifiable as uranium ore occurrences with limited resources and of prognostic or perspective importance, additionally limited by geological-mining conditions and environmental restrictions.

**Key words:** economic geology, uranium deposits, nuclear power plants, nuclear fuel

### **Wprowadzenie**

Zwyżka cen uranu na początku lat dwutysięcznych przyczyniła się do ponownego wzrostu zainteresowania poszukiwaniami i rozpoznaniem jego złóż na całym świecie po niemal 30-letniej przerwie – po boomie na przełomie lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych ubiegłego wieku. Potęgowane było to też potrzebą zagospodarowania nowych złóż rud uranu wskutek stopniowego wyczerpywania się zasobów wcześniej eksploatowanych z reguły małych złóż typu żyłowego, głównie w Europie (w przeciwieństwie do Kanady, Australii, Kazachstanu i Namibii wciąż dysponujących znacznymi zasobami). Postępujący rozwój technologii pozyskiwania tlenu uranu metodami ługowania kwasami lub zasadami, w tym bezpośrednio ze złóża *in situ*, skala zapotrzebowania na uran, zastrzone wymagania środowiskowo-społeczne oraz efektywność ekonomiczna przedsięwzięć górniczo-przetwórczych skutkowały istotną zmianą podejścia do złóż rud uranu. Zainteresowanie gospodarcze budzą przede wszystkim złóża występujące na powierzchni lub blisko niej – głównie typu kalkretowego, w granitach/alaskitach i w skałach metasomatycznych – zdadne do taniej eksploatacji odkrywkowej, oraz złóża w piaskowcach, stwarzające możliwość ługowania *in situ* do głębokości maks. 500 m. Bardzo interesujące gospodarczo są też złóża związane z niezgodnościami proterozoicznymi z bogatymi lub bardzo bogatymi rudami U oraz rzadkie złóża brekcji hematytowych z kompleksowymi rudami Cu-Au-Ag-U. Wspomniane względy i uwarunkowania spowodowały znaczną modyfikację wydzielanych typów złóż, jak i rodzajów rud uranu.

## 1. Typy złóż rud uranu

W pracy wykorzystano klasyfikację złóż uranu opracowaną przez Dahlkami'ego (1979) z modyfikacjami wprowadzonymi m.in. przez Raport OECD-NEA&IAEA (2012). Typy złóż zostały uszeregowane wedle znaczenia praktycznego przez autorów niniejszej pracy, tj.:

- w piaskowcach/złoża piaskowcowe,
- związane z niezgodnościami geologicznymi,
- w kompleksowych brekcjach hematytowych,
- wietrzeniowo-skorupowe na powierzchni, w tzw. kalkretach,
- w skałach intruzywnych,
- w zlepieńcach,
- żyłowe,
- w skałach wulkanicznych kalder,
- metasomatyczne,
- brekcji zapadliskowych w kominach,
- fosforytów uranonośnych,
- złoża inne z podwyższoną zawartością uranu.

**Złoża w piaskowcach** występują w ich odmianach średnio i gruboziarnistych, powstałych jako fluwialne utwory lądowe lub w brzeźnych częściach basenów morskich. Minerale uranu – coffinit i uraninit – spotykane są w nich w warunkach redukcyjnych spowodowanych m.in. obecnością substancji węglowej, siarczków (pirytu), węglowodorów, minerałów Fe-Mn, np. chlorytu itp. Wydziela się cztery ich podtypy (Paulo, Piestrzyński 1991), a mianowicie:

- **wał frontowego (roll-front)** na pograniczu dyfuzyjnych granic piaskowców w warunkach redukcyjnych poniżej gradientu hydrologicznego z ostrymi granicami z piaskowcami utlenionymi powyżej tego gradientu. Strefy zmineralizowane mają formy wydłużone lub sinusoidalne usytuowane równoległe do rozciągłości lub prostopadłe do kierunku nanosu i przepływu wód podziemnych. Rudy tych złóż zawierają 0,05–0,25% U przy zasobach od kilkuset do kilkudziesięciu tysięcy ton uranu. Ich przykładami są Moinkum, Inkai i Mynkuduk w Kazachstanie, Crow Butte i Smith Ranche w Wyoming (USA), Bukinay, Sugraly i Uchkuduk w Uzbekistanie;
- **tabularyczne/rytmiczne** – impregnacje minerałami uranu w formie nieregularnych soczew w warstwach redukcyjnych piaskowców. Ciała rudne ułożone są w większości równoległe do kierunku sedymentacji. Rudy tych złóż zawierają 0,05–0,5% U, niekiedy 1% U, a ich zasoby wynoszą od kilkuset ton U do 150 000 ton U. Ich przykładami są Westmoreland w Australii, Nuhetting w Chinach, Hamr-Straż w Czechach, Akouta, Arlit i Imouraren w Nigerze i Colorado Plateau w USA;
- **paleodolin/kanalów dennych** – system paleodrenażu składający się z dolin o szerokości kilkuset metrów wypełnionych przepuszczalnymi i miększymi utworami aluwialno-fluwialnymi. Ciała rudne zawierają także detrytus roślinny i w planie mają kształt wydłużonych soczew lub konfiguracje żeber, natomiast w przekroju kształt soczewkowaty lub rzadziej wału. Rudy tych złóż zawierają 0,01–3,0% U przy zasobach od kilkuset do 20 000 ton U. Ich przykładem są złoża Dalmatowskoje, Malinowskoje i Chiangdinskoje w Federacji Rosyjskiej oraz Beverley w Australii Południowej;

- **tektoniczno-litologiczne** występujące w piaskowcach w pobliżu stref przepuszczalnych. Minerale uranu znajdują się w strefie otwartej, podobnej do rozwarcia tektonicznego. Rudy zawierają 0,1–0,5% U przy zasobach rzędu kilkuset do 5 000 ton U. Przykładem są Mas Laveyre we Francji i Mikouloungou w Gabonie.

**Złoża związane z niezgodnościami** – ciała rudne zlokalizowane są pod lub ponad strefą niezgodności, oddzielającą intensywnie zwietrzałe skały krystaliczne podłoża, głównie archaicznego, od nadległych utworów klastycznych wieku proterozoicznego lub fanerozoicznego. Wydziela się takie ich podtypy jak:

- na kontakcie z niezgodnością – bezpośrednio pod niezgodnością w strefie szczelinowej w skałach zmetamorfizowanych. Rudy są głównie uranowe (uraninit, smółka uranowa) średniej jakości 0,1–1,0% U, niekiedy z domieszką Ni, Co, Cu i Pb o zasobach od 1 000 do 150 000 ton U, np. złoża Rabbit Lake w basenie Athabasca, Kiggavik w basenie Thelon w Kanadzie. Rudy U spotykane są również w łałach występujących w spągu skał osadowych przykrywających bezpośrednio niezgodność. Zawierają rudy polimetaliczne o wysokiej (1–15% U) lub bardzo wysokiej zawartości (> 15% U), np. Cigar Lake, McArthur w basenie Athabasca. Zasoby tych złóż mogą dochodzić do 150 000 ton U;
- w zmetamorfizowanych skałach osadowych poniżej niezgodności, w których pozostały skały klastyczne. Złoża tego podtypu zawierają rudy niskiej i średniej jakości (0,01–1,0% U) o bardzo dużych zasobach, rzędu do 100 000 ton U, np. Jabiluka, Ranger w Australii.

**Złoża w kompleksowych brekcjach hematytowych** – występują w bogatych w hematyt brekcjach granitowych (około 27% Fe) i zawierają polimetaliczne rudy z Cu, Au, Ag, U i REE, z których uran pozyskiwany jest ubocznie. Jego zawartość w tych rudach wynosi 0,01–0,1%, a zasoby mogą przekraczać 200 000 ton U, jak np. największe na świecie złoża U w Olympic Dam w Południowej Australii oraz zlokalizowane w tym samym stanie złoża Prominent Hill, Carrapateena i Oak Dam, a także młodsze od nich Mount Painter.

**Złoża wietrzeniowo-skorupowe** związane są z szeroko rozprzestrzonymi trzeciorzędowymi i czwartorzędowymi uranonośnymi utworami okruchowymi (głównie piaski i żwiry) na powierzchni lub blisko powierzchni terenu, zcementowanymi węglanami Ca i Mg, gipsem, niekiedy halitem, nadającymi im charakterystyczną teksturę. Największe z nich występują w kalkretach (węglany wapniowo-magnezowe) rozwiniętych na głęboko zwietrzalnych granitach uranonośnych lub w ich pokrywie, m.in. w Australii Zachodniej, Namibii, Botswanie, Mauretanii i innych krajach. Rudy tych złóż należą do bardzo ubogich (0,001–0,01% U) lub ubogich (0,01–0,1% U), tworzą jednak olbrzymie zasoby do 100 000 ton U, np., Langer Heinrich, Trekkopje w Namibii, Yeelirrie w Australii. Głównym minerałem rudnym jest carnotyt – wanadan uranylowy, co pozwala na uboczne pozyskiwanie wanadu w procesie ługowania. Ze względu na łatwość i niskie koszty eksploatacji oraz opanowanie efektywnej technologii ich ługowania kwasami lub zasadami z późniejszą wymianą jonową, są – oprócz złóż w piaskowcach – w ostatnich latach najbardziej pożądanymi do zagospodarowania i eksploatacji. Podobne utwory osadowe wypełniają także doliny drenażowe w skałach trzeciorzędowych lub występują na plażach jezior. Także torfowiska i gleby torfowe mogą zawierać mineralizacje uranową.

**Złoża w skałach intruzywnych** występują w takich skałach jak: alaskity, granity, monzonity, syenity, pegmatyty i karbonatyty. Ich przykładem są złoża w granitach alas-

kitowych Rossing i Husab w Namibii, zawierających głównie rudy ubogie z 0,01–0,1% U, ale o zasobach sięgających ponad 100 000 ton U. Głównymi minerałami uranu są w nich uraninit, branneryt, coffinit, betafit, dawidyty. Należą do rud trudno wzbogacalnych ze względu na mikroziarnistość minerałów uranu, a także słabą rozpuszczalność w kwasie brannerytu lub nierozpuszczalność betafitu. Wymagają wielokrotnego kruszenia i mielenia przed ługowaniem kwasem siarkowym z dodatkiem utleniaczy w zbiornikach. Także złoża porfirowe rud Cu są wzbogacone w uran, np. Bingham Canyon i Twin Butte w USA, podobnie jak karbonatytowe rud metali, np. Palabora w RPA, Bancroft w Kanadzie.

**Złoża w zmetamorfizowanych zlepieńcach** – detrytus tlenkowych minerałów uranu występuje w spągowych częściach zmetamorfizowanych utworów fluwialnych i przybrzeżnych wieku 2,3–2,4 mld lat. Tlenkom uranu towarzyszą zwykle złoto i piryt, a w mniejszej ilości detrytyczne inne siarczki i tlenki. Ich rudy zawierają 0,001–0,15% U, przy zasobach od kilku tysięcy do kilkudziesięciu tysięcy ton U, który pozyskiwany jest jako składnik uboczny (*byproduct*). Przykładem są złoża Witwatersrand w RPA i wyeksploatowane Elliot Lake w Kanadzie.

**Złoża żyłowe** – najstarszy wykorzystywany typ złóż rud U, w których żyły kwarcowe i węglanowe z blendą smolistą (uraninitem) o różnej miąższości i długości występują w strefach rozluźnień i szczelinowatości różnych skał. Rudy tych złóż należą do średnich i bogatych z 0,1–2,5% U, ale o niedużych zasobach od kilkuset do 20 000 ton uranu. Ich przykładem są grube i masywne żyły uraninitu w Pribramie (Czechy), Schlema-Alberoda (Niemcy), Shinkolobwe (Kongo DR), żyłowo-sztokwerkowe w Bernardan we Francji i Gunnar w Kanadzie lub systemy żył z blendą smolistą w spękanych granitach lub otaczających skałach metamorficznych, np. Mina Fe w Hiszpanii i Singhbhum w Indiach.

**Złoża w kompleksach wulkanicznych kalder** – zlokalizowane są w kalderach lub ich pobliżu w zasadowych i pośrednich skałach wulkanicznych przewarstwiających się z klastycznymi skałami osadowymi. Mineralizacja uranowa występuje w kilku poziomach skał wulkanicznych i osadowych, rozciągając się niekiedy do starszego podłoża (wypełnia strefy spękań i szczelin). Rudy zawierają 0,01–0,02% U przy zasobach do 10 000 ton U. Minerale uranu współwystępują z molibdenitem i innymi siarczkami, fluorytem i kwarcem. Ich przykładem są złoża kaldery Strielcowskiej w Rosji, Dornot w Mongolii, Michelin w Kanadzie czy Nopal w Meksyku.

**Złoża metasomatyczne** występują w obszarach tektonicznych z rozwiniętym magmatyzmem na platformach prekambryjskich w pobliżu uskoków, gdzie powstały metasomatyty alkaliczne typu albitytów, alkalicznych amfibolitytów, węglanowo-żelazistych skał na bazie granitów, gnejsów, migmatytów i kwarcytów żelazistych. Rudy U, niekiedy z V, tworzą w nich soczewy lub pnie o miąższości kilku, kilkudziesięciu metrów i długości kilkuset metrów, sięgające do głębokości 1,5 km. Rudy zawierają 0,001–0,12% U i o połowę mniej wanadu. Minerale rudy są uraninit i branneryt, a ich zasoby mogą przekraczać 20 000 ton U. Ich przykładami są złoża Pierwomajskoje, Żółtoreczenskoje, Severinskoje na Ukrainie, Lagoa Real i Itataia w Brazylii oraz Valhalla z rudami U-V w Australii.

**Złoża brekcji zawałowych w kominach** związane są z koncentrycznymi i pionowymi kominami, zawierającymi okruchy skał otaczających. Rudy uraninitowe to pierwotne impregnacje przepuszczalnego lepiszcza łączącego okruchy brekcji oraz wypełniające łukowate szczeliny otaczające komin. Zawierają 0,1–1,0% U przy zasobach do 2 500 ton U. Są bardzo rzadkie i praktycznie znane są tylko na północ i południe od Grand Canyon w Arizonie, USA.

**Złóża fosforytów** powstałe na szelfie morskim zawierają rozproszony uran w drobnych ziarnach apatytów. Zawartość uranu jest bardzo niska, rzędu 0,001–0,015%, ale zasoby fosforytów są z reguły ogromne. Uran pozyskiwany jest ubocznie przy przetwarzaniu fosforytów na kwas fosforowy w zakładach chemicznych nawozów sztucznych. Ich przykładem są złoża New Wales i Uncle Sam w USA, Gantour w Maroku, Al-Abiad w Jordanii i wiele innych.

Wśród innych złóż można wymienić:

- złoża zmetamorfizowane, w których koncentracje uranu powstały dzięki procesom metamorficznym, np. Mary Kathleen w Australii, Forstau w Austrii,
- złoża w wapieniach, gdzie mineralizacja uranowa (uraninit) występuje w przestrzeniach międzywarstwowych i szczelinach sfałdowanych wapieni jurajskich w okręgu Grants w USA,
- złoża węgla brunatnych i kamiennych, w których uran występuje w węglach oraz przewarstwiających się z nimi piaskowcach i łupkach, np. Niżnie Ilijskoje w Kazachstanie, baseny węglowe Północnej i Południowej Dakoty. Zawartość uranu jest w nich niska i średnio nie przekracza 50 ppm.

Przyszłościowe znaczenie mogą ewentualnie mieć pegmatyty z minerałami ziem rzadkich i uranem, granity ze skałeniami potasowymi o podwyższonej zawartości uranu oraz czarne łupki ilaste z dużą ilością materii organicznej lub bogate w węgiel ily z pirytem, znane w wielu miejscach na świecie. Brak dotychczas ich złóż w sensie gospodarczym, są to tylko wystąpienia.

## **2. Rodzaje rud uranu**

Rodzaje rud uranu można wydzielać na podstawie kryteriów mineralogicznych, jakościowych i sposobu występowania w złożach lub ich kombinacji.

W wymienionych typach złóż rud uranu występują mono- i poliminerálne rudy, z których pozyskiwany jest koncentrat uranu jako produkt główny, współwystępujący lub uboczny. Najczęstszym rodzajem rud są rudy uraninitowe bądź odmiany utlenione, m.in. blenda smolista, tworzące samoistne ciała, m.in. żyłowe, lub koncentracje rozproszone, warstwowe czy sztokwerkowe w masie skalnej w zależności od typu złoża. Towarzyszą im zmienne ilości innych minerałów uranu jak: dawidyty, betafity, autunity, metaautunity, branneryty, coffinity. W złożach kalkretowych minerałami uranu są różne jego związki uranylowe, głównie carnotyt (wanadan uranylowy potasu). Najmniej pożądanymi ze względów praktycznych (nieługowalność lub niska ługowalność) są betafity i branneryty.

Ze względu na zawartość uranu wydziela się rudy bardzo bogate – ponad 15% U, np. w złożach północnego Saskatchewan związanych z niezgodnościami, bogate – 1–15% U, średniej jakości – 0,1–1% U (złoża w granitach), ubogie – 0,01–0,1% U i bardzo ubogie – 0,001–0,01% U. Dwa ostatnie rodzaje rud występują przede wszystkim w złożach piaskowcowych i kalkretowych, niekiedy tworząc ogromne zasoby. Z kolei rudy bardzo bogate i bogate są charakterystyczne dla złóż związanych z niezgodnościami proterozoicznymi, a bogate – także dla złóż żyłowych.

Rudy uranu są kopaliną główną monomineralną. Mogą im towarzyszyć niewielkie ilości wanadu, molibdenu, miedzi, złota, srebra. Rudy uranu mogą być też kopaliną współwystępującą z rudami Cu, Au, Ag, Mo, V, minerałami ziem rzadkich, fluorytem, np. złoża



Olympic Dam w Australii lub kopalinią towarzyszącą, np. rudom Au (złoża Witwatersrand w RPA), czy w złożach porfirowych Cu (w Chile i USA).

### 3. Przeróbka i przetwarzanie rud U

Wymienione typy złóż są eksploatowane tradycyjnymi metodami podziemnymi lub odkrywzkowymi w zależności od warunków geologicznych ich występowania, a pozyskany urobek jest kruszony, mielony i klasyfikowany do prekoncentratu rud U, który nie ma od wielu lat znaczenia handlowego i jest tylko półproduktem do produkcji tzw. **żółtego keku**. Pozyskiwany jest on w procesach ługowania kwasami (np. mieszanina kwasu siarkowego z tlenowodorem, tzw. kwas Caro) lub zasadami z dodatkiem utleniaczy (piroluzyt, tlenowódór, tlen) w temperaturze otoczenia lub po podgrzaniu do 60–92°C w różnych rozwiązaniach techniczno-technologicznych w osobnych zakładach. Roztwór/gęstwę po ługowaniu poddaje się wymianie jonowej w kolumnach lub ekstrakcji rozpuszczalnikowej, a w końcowej fazie precypitacji np. amoniakiem do diuranianu amonu, który kalcynuje się do postaci proszkowej. Proszek ma charakterystyczną żółto-szaro-zielonkawą barwę – stąd nazwa **żółty kek**, zawierający z reguły 70–99%  $U_3O_8$  w zależności od składu przetwarzanej rudy i stosowanej technologii ługowania oraz innych form tlenkowych uranu. Niemal w całości składa się z nierozszczepialnego izotopu ciężkiego  $^{238}U$  i zawiera tylko 0,72% izotopu rozszczepialnego  $^{235}U$ , wskutek czego może być stosowany tylko w reaktorach ciężkowodorowych. Jest to podstawowa forma produkcji górniczo-przetwórczej uranu na świecie oraz główna postać handlowa tego surowca, określana też mianem **koncentratu uranu**, dla której prowadzone są statystyki podaży, obrotów i zapotrzebowania. Żółty kek nie jest surowcem promieniotwórczym, a jego promieniowanie jest równe połowie promieniowania kosmicznego w danym regionie.

Od ponad 30 lat rozwijana jest metoda ługowania otworami w piaskowcach – *in situ*, po raz pierwszy zastosowana w Kazachastanie na unikalnych w skali światowej złożach, występujących w specyficznych warunkach geologicznych. Jeżeli nie jest możliwe ługowanie *in situ*, urobek, głównie ze złóż w kalkretach, piaskowcach lub granitach, deponowany jest w specjalnych zbiornikach z warstwą izolującą od spągu i ługowany kwasami lub zasadami, tzw. *heap leaching*. Roztwór uranonośny jest przetwarzany w skojarzonych zakładach wspomnianymi metodami wymiany jonowej lub ekstrakcji rozpuszczalnikowej na żółty kek. Udział ługowania *in situ* w pozyskiwaniu koncentratu uranu stale wzrasta i w skali świata przekracza już ponad 50% podaży. Nadal będzie on wzrastał wskutek niskich kosztów i krótkiego czasu realizacji inwestycji – do dwóch lat. Na przeszkodzie stają lub mogą stanąć przepisy ochrony środowiska lub lokalnych władz, np. w Argentynie władze prowincji zakazały używania kwasu siarkowego w kopalniach odkrywzkowych, a w Kanadzie i USA lokalne władze indiańskie nałożyły moratoria na zagospodarowanie złóż, podobnie jak stowarzyszenia Aborygenów na północy Australii.

Z żółtego keku poprzez działanie nań kwasem azotowym produkowany jest azotan uranylu  $UO_2(NO_2)_3$  ekstrahowany do czystej postaci. Następnie poddaje się go działaniu amoniaku i otrzymywany jest uranian amonu, redukowany wodorem do tlenku  $UO_2$ , który pod wpływem fluorowodoru tworzy  $UF_6$ . Związek ten jest wysoce toksyczny, reaguje z wodą i powoduje korozję, ale zawierać może do 20% izotopu  $^{235}U$ , zwykle 3–7%, a resztę

stanowi nierozszczepialny ciężki izotop  $^{238}\text{U}$ . Jest on kolejnym produktem przejściowym w procesie wzbogacania uranu do paliwa.

Wzbogacanie sześćsiofluorku uranu w postaci gazowej przeprowadza się w procesie dyfuzyjnym przy użyciu drobnooczkowych membran, przez które lżejszy izotop  $^{235}\text{U}$  przechodzi szybciej niż cięższy  $^{238}\text{U}$ . Proces dyfuzji powtarza się 1500 razy, aby otrzymać stężenie rzędu 3–5%  $^{235}\text{U}$ . Metoda ta jest bardzo energochłonna i mało wydajna, dlatego jest zastępowana bardziej efektywną metodą szybkiego wirowania w specjalnych wirówkach, która od 2017 r. będzie stosowana wyłącznie. Po konwersji i wzbogacaniu nietrwały i groźny sześćsiofluorek jest zamieniany w tlenek uranu  $\text{UO}_2$ , z którego w formie proszkowej wypieka się w temperaturze  $1400^\circ\text{C}$  pastylki o długości około 1,5 cm i średnicy 1 cm pakowane do cyrkonowych rurek, tzw. koszulek. Wypełniona i szczelnie zamknięta koszulka to pręt paliwowy. Kilkadziesiąt lub niekiedy kilkaset takich prętów tworzy zestaw paliwowy umieszczany w reaktorze, gdzie pozyskiwana jest energia dzięki rozszczepieniu jąder  $^{235}\text{U}$ . Gdy pręty ulegną wypaleniu, po okresie około dwóch lat usuwa się je i utylizuje. Najpierw na około 10 lat umieszcza się je w basenie z wodą dla obniżenia ich aktywności i schłodzenia. Wypalone paliwo wyjmuje się z basenu i transportuje do zakładu, gdzie oddziela się produkty rozszczepienia nie nadające się do ponownego użytku od uranu i plutonu, które można ponownie wykorzystać jako paliwo jądrowe. W wypalonym paliwie znajduje się jeszcze około 95% pierwotnej zawartości  $^{238}\text{U}$  oraz domieszka  $^{239}\text{Pu}$  i pozostałych produktów rozszczepienia – tzw. MOX, który powtórnie się przerabia.

#### **4. Kryteria geologiczno-zasobowe dla typowania potencjalnych złóż o znaczeniu gospodarczym**

Przegląd gospodarki złożami rud uranu w ostatnim okresie wskazuje, że największe znaczenie gospodarcze mają złoża:

- związane z niezgodnościami w utworach preprotozoicznych, dysponujące najbogatszymi rudami U,
- w piaskowcach z ubogimi rudami, nadającymi się do eksploatacji metodą ługowania *in situ*,
- w kompleksowych brekcjach hematytowych, w których uran jest kopaliną towarzyszącą rudom Cu z Au i Ag,
- w granitach alaskitowych z ubogimi rudami,
- wietrzeniowo-skorupowe tzw. kalkretów z biednymi rudami, w których istotną domieszkę stanowi pozyskiwalny wanad.

Złoża związane z niezgodnościami, kompleksowych brekcji hematytowych oraz w granitach alaskitowych, eksploatowane są tradycyjnymi metodami odkrywkowymi lub podziemnymi, a ich urobek wymaga także konwencjonalnego wzbogacania przed ługowaniem. Powoduje to, że nakłady inwestycyjne na ich zagospodarowanie i wykorzystanie są duże, podobnie koszty operacyjne, przekraczające z reguły 100 USD/kg U. Ponadto czas inwestycji jest długi, od kilku do 10 lat.

Z kolei złoża w piaskowcach, zwłaszcza zdatne do ługowania *in situ*, mimo ubogich rud, cechują się niskimi nakładami inwestycyjnymi, niskimi kosztami operacyjnymi poniżej 80 USD/kg U oraz krótkim czasem inwestycji, z reguły 2–3 letnim. Podobne relacje



obserwuje się dla złóż wietrzeniowo-skorupowych, gdzie stosowana jest niskokosztowa eksploatacja odkrywkowa, często ograniczająca się do stosowania koparek lub spychaczy, a urobek dostarczany jest do specjalnych zbiorników do ługowania o bardzo dużej pojemności. Ten typ złóż ze wspomnianych względów zyskuje w ostatnich latach coraz większe znaczenie gospodarcze w podaży uranu na świecie.

Kryterium zasobowe dla pożądaných obiektów złożowych wynosi 10 000 ton U w kategorii uzyskiwalnych, zapewniających co najmniej 10-letnią podaż na poziomie 1 000 ton U/rok niezależnie od jakości kopaliny. Bogate złoża związane z niezgodnościami pozwalają na wysokie uzyski uranu i bardzo wysoką jakość żółtego keku, nawet z 99%  $U_3O_8$ . Dla złóż w piaskowcach, wietrzeniowo-skorupowych oraz w granitach alaskitowych bardzo istotna jest minimalna zawartość brzeźna, wynosząca ostatnio 0,005–0,006% U i zapewniająca średnią zawartość w urobku, z reguły powyżej 0,02% U.

Złoża w piaskowcach zawierają łatwo ługowalny uraninit lub kompleksowe minerały uranylowe, natomiast w kalkretach głównym minerałem jest też łatwo ługowalny carnotyt – wanadan uranylowy potasu i inne minerały tej grupy. Natomiast złoża w granitach alaskitowych prócz uraninitu i minerałów uranylowych zawierają nieługowalne lub trudno ługowalne – betafit i branneryt. A zatem względy mineralogiczne odgrywają też niebagatelną rolę w wyborze złoża.

Interesujące są też złoża kompleksowych brekcji hematytowych zawierające rudy Cu z Au, Ag i U, ale praktycznie jedynym terenem, gdzie występują złoża tego typu – prócz złoża Olympic Dam – jest Australia Południowa.

Istotnymi czynnikami dla wyboru potencjalnego złoża są uwarunkowania polityczne (strefa Sahelu w Afryce, Australia, Kanada), społeczne (Argentyna, Australia, Kanada, USA), krajobrazowe (Australia, Kanada) i ochrony środowiska (w najmniejszym stopniu kraje afrykańskie, Kazachstan, Uzbekistan). Także bardzo istotnym czynnikiem jest wybór partnera biznesowego, którym powinna być firma posiadająca doświadczenie i dysponująca technologiami produkcji żółtego keku, m.in. Kazatomprom, Areva, Cameco, Paladin.

## **5. Polskie wystąpienia uranu na tle światowych złóż**

Polska pod względem występowania rud uranu jest dobrze poznana. Obszar Sudetów penetrowany był szczegółowo począwszy od 1948 roku. Do 1967 roku prace poszukiwacze i eksploatacyjne prowadzone były z udziałem Rosjan, których udział w pierwszej fazie był dominujący, w końcowej – szcztakowy. Okres ten został szczegółowo zbadany i opisany w wielowątkowej monografii Klementowskiego (2010). Sudety były również obiektem szczegółowych badań podjętych przez Państwowy Instytut Geologiczny, a także Akademię Górniczo-Hutniczą. Poszukiwania uranu prowadzone były metodami geochemicznymi, geofizycznymi oraz za pomocą wierceń i robót górniczych. Pomimo generalnej zasady tajności wyników poszukiwań rud uranu, literatura przedmiotu jest bardzo obfita. Wystąpienia uranu w bloku karkonosko-izerskim opisane są w pracach Jelińskiego (1965), Lisa i in., (1965), Lisa i Sylwestrzaka (1977), Jaskólskiego (1965), Mochnackiej (1966, 1975), Lisa i Przeniosły (1987). Depresja śródsudecka była przedmiotem badań Nielubowicza i Wróblewskiego (1963), Depciucha (1968), Sylwestrzaka (1972), Miecznika (1989, 1990), Wołkowicza (1988, 1992). Jednostki geologiczne Ziemi Kłodzkiej w aspekcie ich urano-

nośności badali Banaś (1965) i Przeniosło (1970). Z syntetycznych prac wykonanych w ostatnim okresie (Strzelecki, Wołkowicz 2011; Miecznik i in. 2011) oraz przeprowadzonej analizy światowej gospodarki uranem wynika, że na obszarze Sudetów brak jest złóż, które potencjalnie mogą nadawać się do eksploatacji, oraz perspektyw na ich występowanie.

Na obszarze Niżu Polskiego okruszcowanie uranowe znane jest przede wszystkim z dwóch formacji: skał drobnoklastycznych triasu dolnego oraz łupków dictyonemowych obniżenia podlaskiego.

Podwyższone zawartości uranu w utworach triasu rejestrowane są dość powszechnie na terenie Polski. Występują one w skałach środkowego pstręgo piaskowca od Perykliny Żar począwszy, a na syneklizie perybałtyckiej skończywszy (Sałdan, Strzelecki 1980). Najbogatsze okruszcowanie występuje w utworach górnego pstręgo piaskowca środkowej części syneklizy perybałtyckiej. Strzelecki (1988) zalicza je do złóż typu piaskowcowego, podtypu złóż tabliczkowo-soczewkowych (ang. *tabular*). Ich cechą jest bardzo duża zmienność lateralna i wertykalna, relatywnie duża głębokość występowania (najpłycej 750–800 m na Mierzei Wiślanej), związek z szarymi skałami o niewielkiej ilości substancji organicznej (Klimuszko i in. 2013), obecność wanadu, selenu, molibdenu, ołowiu, arsenu jako pierwiastków towarzyszących. Uran z tych skał dobrze się ługuje, zwłaszcza z zastosowaniem metody alkalicznej (Frąckiewicz i in. 2012). Zasoby uranu w tej strefie, opierając się na analizie porównawczej z innymi wystąpieniami uranu tego typu na świecie, oszacowano na około 20 tys. ton (Strzelecki, Wołkowicz 2011). Biorąc jednak pod uwagę stopień rozpoznania tej mineralizacji, głębokość jej występowania, zmienność okruszcowania, która skutkuje niedostateczną wiedzą o kształtach, formie i rozmiarach ciał rudnych, brak szczelnych warstw umożliwiających ekranowanie ługowania od spągu i stropu powoduje, że zasoby te należy uznać za hipotetyczne. Z przeglądu złóż światowych wynika, że nie prowadzi się ługowania otworowego rud U na tak dużych głębokościach, w praktyce maksymalne głębokości ograniczają się do 300–400 m. Ponadto powierzchniowe warunki środowiskowo-krajobrazowe w tym obszarze wykluczają jakąkolwiek działalność przemysłową tamże, a zwłaszcza związaną z uranem.

Dolnoordowickie łupki dictyonemowe obniżenia podlaskiego goszczą bardzo ubogie okruszcowanie polimetaliczne (U-V-Mo) typu łupków czarnych. Pod względem litologicznym są to iłowce i mułowce, w spągu barwy czarnej, przechodzące ku stropowi w brunatne. Ich miąższość waha się od kilkunastu centymetrów do około 4 m, średnio 2,7 m. Skały te zawierają znaczącą ilość substancji organicznej (do 11,5%), która wykazuje niski stopień dojrzałości odpowiadający wczesnemu stadium okna ropy (Grotek i in. 2013). Głębokość zalegania waha się od około 400 m w NE części obniżenia podlaskiego, stopniowo zwiększając się do ponad 1000 m w części SW tej struktury. Zawartości maksymalne uranu sięgające 2,4% związane są ze strefami spekań tektonicznych i jedynie fałszują obraz tego okruszcowania, bowiem proces migracji uranu i jego koncentracji w pułapkach przyuskokowych nie miał miejsca, jak zaistniało to np. w złożu Lodeve (Francja) (Landais, Connan 1980). Zawartości uranu obliczone z analizy kilku tysięcy próbek wskazują, że średnia jego zawartość w czarnej odmianie łupków wynosi około 70 ppm. Łupki brunatne są znacząco uboższe w uran, a jego średnia zawartość wynosi w nich około 30 ppm. Uran występuje głównie w formie związków metaloorganicznych. Przeprowadzone badania technologiczne wykazały, że metodą kwaśną ługuje się od 64 do 81% uranu, a metodą alkaliczną jedynie około 42% (Frąckiewicz i in. 2012). Potencjalne wydobycie uranu

występującego w łupkach dictyonemowych obniżenia podlaskiego wymagałoby budowy kopalni głębinowej o bardzo wysokich kosztach inwestycyjnych, przekreślających jakąkolwiek efektywność przedsięwzięcia.

Z obszaru Polski znane są jeszcze inne wystąpienia uranu, który w przeszłości były dość szczegółowo badane. Dotyczy to łupków menilitowych Karpat (Kita-Badak i in. 1965), węgla GZW (Sałdan 1965; Jęczalik 1970) i kopalni Staszic w Rudkach (Góry Świętokrzyskie) (Uberna 1970). Z tego ostatniego miejsca uran wydobywany był jako kopalina towarzysząca do 1968 r. (Zdulski 2000). Wszystkie te formacje geologiczne nie zawierają jednak takich koncentracji uranu, które mogłyby być uznane za potencjalnie perspektywiczne (Miecznik i in. 2011).

### **Podsumowanie**

Przegląd złóż rud uranu i gospodarki nimi na świecie wskazuje jasno, że zainteresowanie gospodarcze budzą przede wszystkim złoża występujące na powierzchni lub blisko niej. Dotyczy to przede wszystkim złóż typu kalkretowego, złóż w granitach/alaskitach i złóż metasomatycznych, które nadają się do taniej eksploatacji odkrywkowej, a także złóż w piaskowcach, zdalnych do ługowania *in situ*, występujących do głębokości nie przekraczającej 500 m. Zainteresowanie budzą też złoża związane z niezgodnościami proterozoicznymi zawierające bogate lub bardzo bogate rudy U oraz rzadkie złoża brekcji hematytowych z kompleksowymi rudami Cu-Au-Ag-U. Na tym tle tzw. złoża w Polsce można uznać jedynie za **wystąpienia rud U** o niewielkich zasobach i charakterze prognostycznym lub perspektywicznym, występujące w trudnych warunkach geologiczno-górnicznych oraz środowiskowo-krajobrazowych.

Analiza państw–producentów uranu i użytkowników uranu wskazuje wyraźnie, że można wytwarzać znaczące ilości uranu i go nie wykorzystywać do produkcji jądrowej lub produkować duże ilości energii z siłowni atomowych bez posiadania własnych złóż uranu. W dyskusjach dotyczących rozwoju energetyki jądrowej w Polsce pojawia się często argument konieczności posiadania własnych zasobów uranu, bo to zapewni nam bezpieczeństwo funkcjonowania elektrowni atomowych w hipotetycznych sytuacjach kryzysowych. Jest to jednak rozumowanie błędne, pozbawione racjonalnych przesłanek. Tzw. *yellow cake* (żółty kek), który jest koncentratem, jaki można uzyskać przy przeróbce rud uranu jest jedynie półproduktem, który zanim się stanie paliwem jądrowym, musi być podany procesom konwersji i wzbogacania izotopowego. Zakładami takimi dysponują niektóre kraje Unii Europejskiej (Francja, Wielka Brytania, Niemcy, Holandia) oraz USA, Kanada, Rosja, Chiny i Japonia (Kaniewski 2008). Istotne jest, by taką wiedzą dysponowali decydenci kreujący politykę energetyczną. W sytuacji takich państw jak Polska najlepszym rozwiązaniem problemu jest podpisanie umowy na budowę elektrowni atomowej wraz z dostawą paliwa do końca jej żywotności. Odrębnym problemem jest potencjalny odzysk uranu z fosforytów importowanych głównie z państw Afryki Północnej. Szczególnie fosforyty marokańskie są silnie wzbogacone w uran.

## Literatura

- Banaś M., 1965 – Przejawy mineralizacji w metamorfiku Śnieżnika Kłodzkiego. *Prace Geol. Komis. Nauk. Geol. PAN w Krakowie*, 27, 7–82.
- Dahlkami F.J., 1979 – Classification of uranium deposits. *Mineralium Deposita*, 13.
- Depciuch T., 1968 – Geochemia i geneza koncentracji uranu w górnokarbońskich osadach klastycznych niecki śródsudeckiej. *Biul. Inst. Geol.*, 214, 75–180.
- Frąckiewicz K., Kiegiel K., Herdzik-Koniecko I., Chajduk E., Zakrzewska-Trznadel G., Wołkowicz S., Chwaszowska J., Bartosiewicz I., 2012 – Extraction of uranium from low-grade Polish ores: dictyonemic shales and sandstones. *Nukleonika*, vol. 58, nr 4, 451–459.
- Grotek I., Klimuszko E., Wołkowicz S., Miecznik J.B., 2013 – Geochemistry of organic matter from Lower Ordovician Dictyonema Shale (Podlasie Depression, NE Poland). *Mineralogical Magazine*, str. 1221.
- Jaskólski S., 1965 – Polimetaliczna mineralizacja tlenkowo-siarczkowa w granitognejsach Gór Izerskich (Dolny Śląsk) i jej pochodzenie. *Prace Geol. Komis. Nauk Geol. PAN w Krakowie*, 43, 7–78.
- Jeliński A., 1965 – Geochemia uranu w granitowym masywie Karkonoszy z uwzględnieniem innych masywów granitoidowych Dolnego Śląska. *Biul. Inst. Geol.*, 193, 5–110.
- Jęczalik A., 1970 – Geochemia uranu w uranonośnych węglach kamiennych w Polsce. *Biul. Inst. Geol.*, 224, 103–204.
- Kaniewski J., 2008 – Bezpieczeństwo dostaw paliwa dla elektrowni jądrowych. *Postępy Techniki Jądrowej*, vol. 51, z. 2, 13–27.
- Kita-Badak M., Badak J., Sałdan M., 1965 – Charakterystyka łupków uranonośnych serii menilitowej w Karpatach Środkowych. *Kwart. Geol.*, 9, 1, 137–156.
- Klementowski R., 2010 – W cieniu sudeckiego uranu. *Kopalnictwo uranu w Polsce w latach 1948–1973*. Oddz. IPN we Wrocławiu. Wrocław.
- Klimuszko E., Wołkowicz S., Miecznik J.B., 2013 – Geochemistry of organic matter from Triassic U-bearing sandstones of Peribaltic Syncline (N Poland). *Mineralogical Magazine*, str. 1478.
- Landais P., Connan J., 1980 – Relation uranium-matiere organique dans deux bassins permians francais: Lodeve (Herauld) et Cerilly-Bourbon-l'Archambault (Allier). *Bull. SNEA*, 4, 709–757.
- Lis J., Sylwestrzak H., 1977 – O występowaniu rozproszonego uraninitu w granitach Karkonoszy. *Prz. Geol.* XXV, nr 6, 297–300.
- Lis J., Przeniosło S., 1987 – Badania geologiczno-poszukiwawcze złóż rud uranu w masywie Karkonoszy. *CAG Państwowy Instytut Geologiczny*, nr arch. 72/83.
- Lis J., Stępniewski M., Sylwestrzak H., 1965 – Branneryt i minerały współwystępujące w żyłce kwarcowej z Wpłowej Góry k/Kowar (Sudety). *Biul. Inst. Geol.*, 193, 207–228.
- Miecznik J.B., 1989 – Utwory wyższego silezu i autunu dolnego północno-wschodniego skrzydła depresji śródsudeckiej. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 363, 5–39.
- Miecznik J.B., 1990 – Koncentracje uranu w utworach karbonu górnego i permu depresji śródsudeckiej. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 364, 61–95.
- Miecznik J.B., Strzelecki R., Wołkowicz S., 2011 – Uran w Polsce – historia poszukiwań i perspektywy odkrycia złóż. *Przegl. Geol.*, Vol. 59, nr 10, 688–697.
- Mochnacka K., 1966 – Minerale kruszcowe polimetalicznego złoża w Kowarach (Dolny Śląsk). *Prace Mineralogiczne PAN*, 4, 7–71.
- Mochnacka K., 1975 – Mineralizacja skał metamorficznych części Pogórza Izerskiego. *Prace Geol. Komis. Nauk Geol. PAN w Krakowie*, 89, 7–87.
- Nielubowicz B., Wróblewski T., 1963 – Przyczynek do rozpoznania okruszcowania uranowego w węglach warstw radwanickich na Dolnym Śląsku. *Kwart. Geol.* 7, 1, 114–130.
- OECD-NEA&IAEA 2012 – Uranium 2011: Resources, Production and Demand. 486 str.
- Paulo A., Piestrzyński A., 1991 – Surowce energetyczne. [W:] *Materiały do ćwiczeń o złożach i geologii gospodarczej*, cz. I, 261–283. Skrypt uczelniany AGH 1270. Wyd. AGH, Kraków.
- Przeniosło S., 1970 – Geochemia uranu w aluwach wschodniej części obszaru metamorfiku Łądka i Śnieżnika Kłodzkiego. *Biul. Inst. Geol.*, 224, 205–298.
- Sałdan M., 1965 – Metalogeneza uranu w utworach karbońskich Górnos Śląskiego Zagłębia Węglowego. *Biul. Inst. Geol.*, 193, 111–169.
- Sałdan M., Strzelecki R., 1980 – Uranium in the Bunter Sediments in the Polish Area. *Biul. Inst. Geol.*, 328.

- Strzelecki R., 1988 – Mineralizacja uranowa utworów środkowego pstręgo piaskowca na obszarze syneklizy perybałtyckiej (praca doktorska). CAG Państwowy Instytut Geologiczny.
- Strzelecki R., Wołkowicz S., 2011 – Uran. [W:] Bilans perspektywicznych zasobów kopalin Polski wg stanu na 31 XII 2009 r. 71–75. PIG-PIB, Warszawa.
- Sylwestrzak H., 1972 – Geochemia uranu w młodopaleozoicznych wulkanitach Dolnego Śląska na tle ogólnego zróżnicowania geochemicznego tych skał. Biul. Inst. Geol., 259, 5–92.
- Uberna J., 1970 – Występowanie uranu w Górach Świętokrzyskich. CAG Państwowy Instytut Geologiczny, nr arch. 4531/865.
- Wołkowicz S., 1988 – O sedymentacji dolnopermskich łupków walchowych z Ratna Dolnego (depresja śródsudecka). Przegl. Geol., Vol. 36, nr 4, 214–218.
- Wołkowicz S., 1992 – Geneza mineralizacji uranowej w dolnopermskich łupkach walchowych (depresja śródsudecka) na tle wykształcenia litofacjalnego. Prz. Geol., XL, 4, 212–216.
- Zdulski M., 2000 – Źródła do dziejów kopalnictwa uranowego w Polsce. Naczelna Dyrekcja Archiwów Państwowych. Wyd. DiG, Warszawa.

