

Wykorzystanie metod rozpoznawania obrazów do wspierania procesu decyzyjnego dotyczącego klasyfikacji węgla ze względu na wybrane cechy petrograficzne

MARIUSZ MŁYNARCZUK, KATARZYNA GODYŃ

Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków

Streszczenie

W ramach prac wykonano wstępne badania pozwalające na opracowanie metod rozpoznawania obrazów mikroskopowych węgla, możliwych do wykorzystania w procesie decyzyjnym dotyczącym klasyfikacji cech petrograficznych (takich jak skład macerałowy) oraz strukturalnych (np. stopień destrukcji). Bazując na wcześniejszych badaniach uznano, że najbardziej istotna z punktu widzenia układu węgiel-gaz będzie identyfikacja wityrynytu, inertynytu, kataklazy oraz (ze względów pomiarowych) kleju, w którym zatopione są badane okruchy węgla. Zdefiniowano wielowymiarową przestrzeń cech, która pozwoliła – bazując na metodach rozpoznawania obrazów – w sposób automatyczny klasyfikować wspomniane cechy. W wyniku przeprowadzonych analiz otrzymano poprawne klasyfikacje tych cech na poziomie sięgającym 96%. Wykazano tym samym, że metody sztucznej inteligencji, pozwalają na identyfikowanie wybranych parametrów petrograficznych i strukturalnych węgla. Dalsze rozwijanie tej metodyki może doprowadzić do opracowania uniwersalnego narzędzia, które pozwoli na obiektywizm w ocenie większej ilości cech petrograficznych i strukturalnych węgla.

Słowa kluczowe: rozpoznawanie obrazów, analiza ilościowa węgla, macerały, struktura węgla

1. Wstęp

Mikroskopowe analizy ilościowe węgla prowadzone są zazwyczaj w sposób nieautomatyczny, a jedną z kluczowych kwestii w tych badaniach jest poprawna i powtarzalna identyfikacja składu macerałowego oraz cech strukturalnych. Wcześniejsze badania prowadzone w IMG PAN wskazują, że nie jest to zagadnienie trywialne.

Badania ilościowe struktury węgla są istotne nie tylko ze względu na zagadnienia czysto naukowe, ale przede wszystkim z uwagi na powiązanie budowy strukturalnej węgla z właściwościami sorpcyjnymi, a także z zagrożeniem metanowym i wyrzutowym w kopalniach podziemnych. Obecność takich gazów jak CO₂ i CH₄ w pokładach węgla, jest bezpośrednio związana z procesami torfotwórczymi, które w rezultacie prowadzą do powstania węgla humusowego (dominującego w GZW). Z kolei wewnętrzna budowa węgla, możliwa do śledzenia wyłącznie pod mikroskopem, może ujawnić pewne cechy (szczególnie obecność spękań, kataklazy czy też mylonitu), które odpowiadają za zwiększoną pojemność gazową. Umożliwia to wskazanie na pokład szczególnie zagrożony zjawiskami gazogeodynamicznymi. Należy tutaj wymienić pewne istotne cechy i właściwości macerałów odpowiadające w pewnym stopniu także za parametry wytrzymałościowe pokładu węgla (np. macerały grupy wityrynytu są najbardziej kruche, a z kolei liptynit jest twardszy od wityrynytu i cechuje się własnościami spajającymi i znaczną sprężystością, co wpływa na wytrzymałość mechaniczną pokładów. Macerały grupy inertynytu posiadają natomiast większą od pozostałych grup macerałów twardość, ich duża zawartość w pokładzie wpływa na zwiększenie wytrzymałości mechanicznej. Odmiany komórkowe, czyli fuzynit i semifuzynit, gdy posiadają komórki wypełnione substancją mineralną są bardzo wytrzymałe i odporne na kruszenie. Znajomość składu macerałowego, czy też mikrolitotypów budujących analizowany węgiel pozwala wstępnie oszacować czy dany pokład, przez który przebiega uskoki, będzie miał tendencje

do silnych deformacji strukturalnych, czy też większa zawartość macerałów inertynitu i liptynitu wpłynie na nieco mniejsze destrukcje w jego wnętrzu. Zwrócić należy również uwagę na podwyższoną zawartość pierwotnych zrostów węglowo-mineralnych (tzw. karbominerytu), które powodują zwiększenie wytrzymałości w tych fragmentach pokładu, które są bogate w synsedymacyjny materiał nieorganiczny.

2. Charakterystyka wybranych cech petrograficznych węgla kamiennego

Węgiel kamienny jest skałą osadową należącą do grupy kaustobiolitów (Maneck, Muszyński, 2008). Osady te postawały z różnorodnych szczątków organicznych, głównie roślinnych. Przeobrażenie szczątków organicznych w kaustobiolity nosi nazwę uwęglenia, czyli zmiany składu chemicznego, co skutkuje przed wszystkim wzrostem pierwiastka C, redukcją zawartości wodoru i tlenu w osadzie (wg reguły Schumanna) oraz zmniejszeniem się ilości części lotnych (prawo Hilta) (Van Krevelen D.W., Schuyer J., 1959). Stopień uwęglenia materii organicznej w znacznym stopniu determinuje cechy jakościowe węgla obserwowane tak w skali makro jak i w powiększeniach mikroskopowych.

Wskaźnik refleksyjności witynitu (R_o), wyrażony liczbowo stosunkiem intensywności światła odbitego do intensywności światła padającego prostopadle do wypolerowanej powierzchni zglądu (Maneck, Muszyński, 2008) wzrasta proporcjonalnie ze wzrostem uwęglenia. Zmiany zawartości tego wskaźnika korelują ze zmianami właściwości chemicznych węgla, z zawartością części lotnych czy też z zawartością pierwiastków węgla i wodoru (Blaschke, 2009; Lorenz, 2010). Wraz ze wzrostem stopnia uwęglenia zmieniają się cechy makroskopowe węgla, co jest widoczne jako wzrost połysku. Zmieniają się także cechy obserwowane w powiększeniach mikroskopowych, takie jak m.in. barwa, struktura czy też mikrotwardość.

2.1. Macerały węgla kamiennego

Węgiel jest skałą, która posiada szczególne właściwości, wyróżniające się spośród innych typów skał osadowych. Podstawową cechą wyodrębniającą węgiel jest jego składnik elementarny, rozróżnialny jedynie pod mikroskopem. Jest to macerał, a nie jak w przypadku niemal wszystkich pozostałych typów skał minerał. Macerały to utwory jednorodne pod względem morfologicznym, fizycznym i chemicznym (Ryka, Maliszewska 1991). Bazując na znajomości składu macerałowego możliwe jest określenie mikrolitotypów (zrostów macerałów) czy też karbominerytów (zrosty macerałów i minerałów).

W budowie węgla kamiennego uczestniczą tkanki oraz części roślin, które były odporne na czynniki destrukcyjne działające podczas procesu fosylizacji roślin. Węgiel kamienny posiada zwykle budowę pasemkową. Pasemka te, ułożone są zgodnie z uwarstwieniem, składają się z poszczególnych składników węgla, różniących się połyskiem i twardością (tzw. litotypów)

W powiększeniach mikroskopowych możliwe jest określenie przerostów macerałów w formie mikropasemek węgla o minimalnej grubości 50 μm , czyli tzw. mikrolitotypów (tab. 1).

Tab. 1. Mikrolitotypy węgla kamiennego (Maneck, Muszyński, 2008)

Mikrolitotypy	Grupa macerałów (całkowita zawartość $\geq 95\%$ obj. bez substancji mineralnej)	
	monomaceralne	wityn
liptyt		liptynitu
inertyt		inertynit
bimaceralne	klaryt	witynit + liptynitu
	witynertyt	witynit + inertynit
	duryt	inertynit + liptynit
trimaceralne (trimaceryty)	duroklaryt	witynit > inertynit, liptynitu
	witynertoliptyt	liptynit > inertynit, witynit
	klaroduryt	inertynit > witynit, liptynit

Określenie mikrolitotypów węgla pociąga za sobą potrzebę rozróżnienia trzech głównych grup macerałów: grupy witynitu (rys. 1a i 1b), liptynitu (rys. 2a i 2b) oraz inertynitu (rys. 3a i 3b). W każdej z tych trzech grup wyróżnia się poszczególne macerały, różniące się genezą, budową, właściwościami (tab. 2).

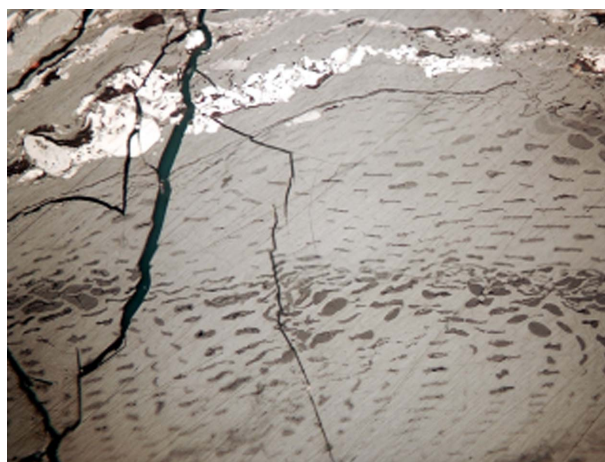
Tab. 2. Macerały węgla kamiennego (Maneck, Muszyński, 2008)

Grupa macerałów	Podgrupa macerałów	Macerał	Submacerał	Odmiana macerałów
witrynit	telowitrynit	telinit	telinit 1 telinit 2	kordaitotelinit sigillariotelinit
		kolotelinit		
	detrowitrynit	witrodetrynit		
		kolodetrynit		
	żelowitrynit	korpożelinit żelinit		
liptynit		sporynit		tenuisporynit krassisporyni
		kutynit		
		rezynit		
		alginit		telalginit lamalginit
		liptodetrynit		
		bituminit suberynit		
inertynit		fuzynit	pirofuzynit degardofuzynit	
		semifuzynit		
		mikrynit		
		makrynit		
		funginit		
		sekretynit		
		inertodetrynit		

Grupa witrynit (rys. 1a i 1b) utworzona jest z tkanki roślinnej bogatej w celulozę i ligninę. Grupa ta występuje w formie pasemek, soczewek o grubości od kilkudziesięciu μm do kilku cm. W grupie witrynit wyróżnia się takie macerały jak telinit, kolotelinit (na tym składniku określana jest refleksyjność węgla kamiennego), witrodetrynit, kolodetrynit, korpożelinit i żelinit. Obserwowana w analizach mikroskopowych szara barwa witrynit, wraz ze wzrostem stopnia uwęglenia staje się coraz bardziej biała lub żółtawo-biała. W węglach nisko i średnio uwęglonych barwa witrynit jest pośrednia pomiędzy barwą liptynit i inertynit. Liptynit zawsze będzie ciemniejszy od witrynit, natomiast inertynit zawsze będzie jaśniejszy od witrynit. W węglach wysoko uwęglonych barwa witrynit będzie jaśniejsza od barwy inertynit. Macerały grupy witrynit są najbardziej kruche z wszystkich pozostałych grup, charakteryzują się występowaniem



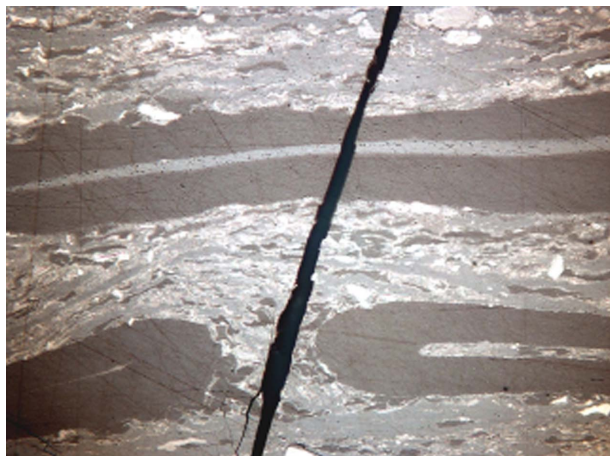
Rys. 1a. Grupa witrynit – kolotelinit (dawniej kolinit). Macerał, w którym brak jest wyraźnej budowy komórkowej. Na jego nieodmienionej – czystej powierzchni określany jest stopień refleksyjności. Immersja, pow. 500 \times



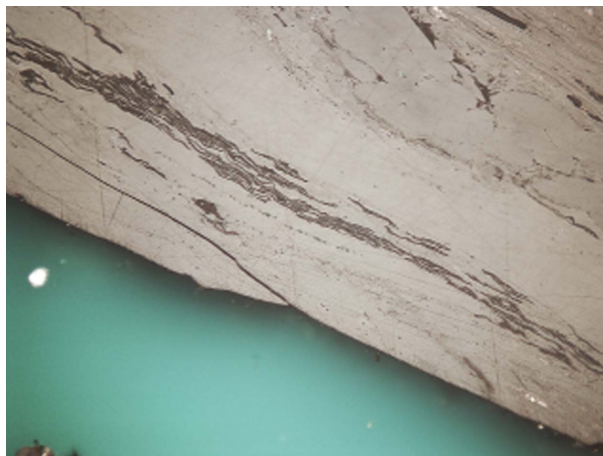
Rys. 1b. Grupa witrynit: telinit. Jest to komórkowa odmiana macerału z grupy witrynit. Na fotografii komórki telinit wypełnia ciemnoszary rezynit (macerał z grupy liptynit). Immersja, pow. 500 \times

w nich prostopadłych do siebie spękań i szczelin (tzw. szczelinek kontrakcyjnych), tym wyraźniejszych im wyższy stopień uwęglenia. Te szczelinki zwiększają kruchość węgla wityrinitowego (Olszewska i in. 1965; Kruszevska, Dybowa-Jachowicz 1997; Ryka, Maliszewska 1991; Manecki, Muszyński, 2008).

Grupę macerałów liptynitu (dawniej egzynitu) (rys. 2a i 2b) tworzą spory, pyłki, żywice, woski. W skład tej grupy wchodzi takie macerały jak: sporynit, kutynit, rezynit, alginit, bituminit, suberynit i liptodetrynit. Barwa macerałów z tej grupy zmienia się, wraz ze stopniem uwęglenia, od brunatnawej poprzez ciemnoszarą do jasnoszarej. W węglach zawierających mniej niż 18% części lotnych liptynit nie jest rozpoznawalny w badaniach mikroskopowych. Zależnie od wzrostu stopnia uwęglenia następuje zmiana barwy, reliefu i mikrotwardości tych macerałów. (Ryka, Maliszewska, 1991; Manecki, Muszyński, 2008).



Rys. 2a. Grupa liptynitu – wydłużone, ciemnoszare fragmenty sporynitu (w postaci makrospor), tkwiące w węglu zbudowanym z macerałów grupy inertynitu (gl. inertodetrynitu) oraz wityrinitu. Immersja, pow. 500×



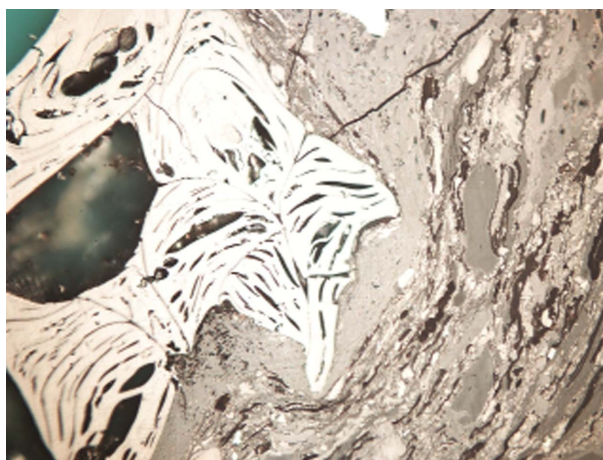
Rys. 2b. Grupa liptynitu: cienkie wydłużone, ciemnoszare fragmenty kutynitu (zbudowanego z kutikul). Macerały te tkwią w wityrinitowej masie. Immersja, pow. 500×

W węglach z dużą zawartością części lotnych liptynit jest twardszy od wityrinitu. Posiada także własności spajające i znaczną sprężystość, co wpływa na wytrzymałość mechaniczną pokładów węgla (Olszewska i in., 1965).

Grupę inertynitu (rys. 3a i 3b) reprezentują macerały inertne, tj. częściowo lub całkowicie obojętne na procesy technologiczne (koksowanie). Należą do niej: fuzynit, semifuzynit, mikrynit, makrynit, funginit,



Rys. 3a. Grupa inertynitu – fuzynit o pustych, dobrze zachowanych owalnych komórkach. Immersja, pow. 500×



Rys. 3b. Grupa inertynitu: fragment sklerotynitu tkwiącego w otoczeniu innych macerałów grupy inertynitu: semifuzynitu, inertodetrynitu oraz macerałów grupy wityrinitu i liptynitu. Immersja, pow. 500×

sekretynit i inertodetrynit. Ich cechą charakterystyczną jest wysoka refleksyjność i wysoki relief. (Ryka, Maliszewska, 1991; Manecki, Muszyński, 2008). Macerały grupy inertynitu posiadają większą od pozostałych grup macerałów twardość, ich duża zawartość w pokładzie powoduje zwiększenie wytrzymałości mechanicznej. Odmiany komórkowe, czyli fuzynit i semifuzynit, jeżeli ich komórki wypełnione substancją mineralną, są bardzo wytrzymałe, odporne na kruszenie (Olszewska i in., 1965).

2.2. Karbomineryty

W węglu kamiennym niemal zawsze występują pewne domieszki substancji mineralnej, która osadziła się wraz z fragmentami organicznymi lub też wtórnie, podczas przemian diagenetycznych, metamorficznych lub też zaburzeń tektonicznych dostała się do pokładu węgla ze skał zalegających w stropie pokładu węgla.

Zrosty macerałów ze składnikami mineralnymi, w zależności od typu substancji nieorganicznej to:

- karbankeryty – macerały + węglany,
- karbopiryty – macerały + siarczki żelaza,
- karbargility – macerały + minerały ilaste,
- karbosilicyty – macerały + minerały grupy SiO₂ (gł. kwarc).

Karbomineryty cechują się zwartą i zbitą strukturą oraz znaczną wytrzymałością mechaniczną.

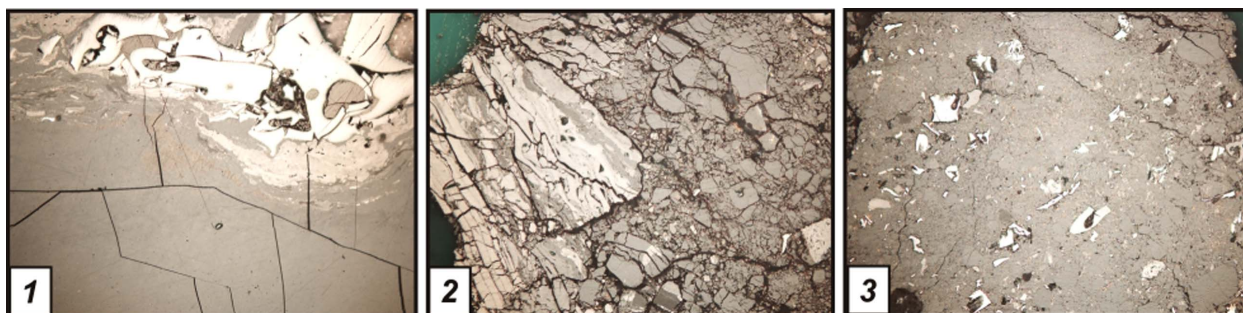
2.1. Węgiel „odmieniony strukturalnie”

W pokładach węgla dochodzi do lokalnych zmian w jego wewnętrznej strukturze¹, które w szczególności są obserwowane w powiększeniach mikroskopowych. Zmiany te dotyczą wszystkich typów węgla, niezależnie od stopnia uwęglenia czy składu petrograficznego. Jednakże intensywność tych zmian w dość istotnej mierze uzależniona jest od tych dwóch cech węgla. Zmiany strukturalne dotyczą przede wszystkim miejsc i obszarów w pokładach węgla, w których występują deformacje tektoniczne (głównie uskoki). Rejon wpływu takiej deformacji na pokład węgla to tzw. share zone (Bodziony i Lama 1996). Strefa taka cechuje się występowaniem węgla osłabionego strukturalnie, spękanego i pokruszonego. Na skutek tego węgiel z takiego obszaru posiada mniejszą zwięzłość oraz większą pojemnością gazową. Miejsca takie są niezwykle niebezpieczne z uwagi na podwyższone ryzyko zaistnienia w tam niekontrolowanych zjawisk gazogeodynamicznych (Shepherd i in., 1980; Beamish i Crosdale, 1998; Cao i in., 2000; Li i in., 2003). Klasyfikację węgla odmienionego strukturalnie przedstawiono w tabeli nr 3, a przykładowe zdjęcia struktur odmienionych z GZW zamieszczono na rysunku 4.

Tab. 3. Klasyfikacja węgla kamiennego odmienionego strukturalnie na podstawie węgla przyuskokowego z górnoląskich pokładów KWK Borynia-Zofiówka, Pniówek i Brzeszcze (wg Godyń 2012)

Typ struktury węgla		Charakterystyczne cechy	
Węgiel nieodmieniony strukturalnie		Węgiel lity, brak spękań egzogenicznych, możliwa obecność spękań endogenicznych wynikających z naturalnych procesów uwęglania.	
Węgiel odmieniony strukturalnie	Spękana	Sieć nieregularnych spękań o egzogenicznej genezie).	
	Katakłaza	Prekatakłaza	Gęsta sieć nieregularnych spękań. Struktury pierwotne wyraźnie dostrzegalne.
		Mezokatakłaza	Bardzo gęsta sieć spękań, część okruchów pokruszona, przemieszczona. Struktury pierwotne częściowo zatarte.
		Porfirokatakłaza	Silne spękania, częściowe roztarcie materiału. Dominacja dwóch wielkości populacji osobników (drobne i duże okruchy - 50-200µm). Struktury pierwotne dostrzegalne tylko w dużych fragmentach (porfiroklastach).
		Katakłaza właściwa	Zmielone i przemieszczone względem siebie okruchy. Struktura pierwotna całkowicie zatarta.
	Mylonit	Premylonit	Etap przejściowy między kataklazą a mylonitem. Nakładanie się deformacji kruchych i plastycznych (cechy kataklazy właściwej i mylonitu właściwego).
Mylonit właściwy		Niemal całkowity brak okruchów. Powstanie nowej, przeobrażonej struktury, często z mikrofałdami i wtórnymi spękaniem.	

¹ Struktura węgla w tym opracowaniu jest rozumiana jako zbiór cech strukturalno-teksturalnych nazywanych ogólnie „strukturą”. Nazewnictwo takie jest stosowane w kontekście węgla w strefach przyuskokowych m.in. przez takich autorów jak Li H. i in., 2003; Jiang i in. 2004; Gentzis T, 2006



Rys. 4. Węgiel odmieniony strukturalnie. 1 – węgiel spękany; 2 – węgiel kataklastyczny; 3 – mylonit

3. Rozpoznawanie obrazów

Rozpoznawanie obrazów (*Pattern Recognition*) jest najstarszym obszarem badań w sztucznej inteligencji (Flasiński, 2011). Rozpoznawanie obrazów ma na celu określenie przynależności różnego typu obiektów do pewnych, uprzednio zdefiniowanych klas. Obiektem może być zarówno przedmiot znajdujący się na obrazie, jak również cały obraz lub nawet jakieś zjawisko fizyczne, socjalne lub ekonomiczne, itp. Mając powyższe na uwadze, należy zasygnalizować pewien problem natury terminologicznej, a mianowicie, że metodyka ta powinna raczej nosić nazwę *Rozpoznawanie Wzorców* (co byłoby prostym tłumaczeniem angielskiej nazwy) – jednakże nazwa taka nie przyjęła się w literaturze polskojęzycznej.

Rozpoznanie zazwyczaj jest prowadzone w sytuacji braku apriorycznej informacji dotyczącej przynależności obiektu, a jedyną informacją, jaką dysponujemy zawarta jest w ciągu uczącym, złożonym z obiektów, dla których znana jest prawidłowa klasyfikacja. (Tadeusiewicz i Flasiński, 1991).

Pierwszym etapem w procesie rozpoznawania obrazów jest odwzorowanie recepcja, prowadząca do zamiany obiektów w punkty pewnej przestrzeni, zwanej przestrzenią cech. Struktura tej przestrzeni jest z reguły arbitralna i zdeterminowana przez możliwości i potrzeby pomiarowe. Jej elementami są n -wymiarowe wektory cech.

Metody rozpoznawania obrazów bazują na wykorzystaniu tzw. ciągów uczących. Ciąg uczący zdefiniowany jest jako zbiór par składający się z wektora cech pewnego obiektu oraz z informacji na temat numeru klasy, do której obiekt jest zaliczony. Wybór elementów ciągu uczącego powinien zapewnić reprezentatywność. W praktyce stanowi on często losowo wybraną próbę ze zbioru rozpoznawanych obiektów.

Podejmowanie decyzji co do klasyfikacji nieznanego obiektu odbywa się na podstawie pewnych funkcji przynależności. W literaturze jest zdefiniowanych wiele takich funkcji, co prowadzi do istnienia wielu metod rozpoznawania obrazów. W niniejszej pracy skupiono się na sześciu funkcjach przynależności, zestawionych w trzech zasadniczych grupach, a mianowicie:

- metody minimalnoodległościowe:
 - metoda najbliższego sąsiada (NN),
 - metoda k najbliższych sąsiadów (kNN).
- metody wzorców:
 - metoda optymalnych otoczeń kulistych (OOK),
 - metoda najbliższej mody (NM),
- metody aproksymacyjne:
 - metoda aproksymacji liniowej (AL),
 - metoda aproksymacji kwadratowej (AK).

Zasada najczęściej stosowanej metody a mianowicie najbliższego sąsiada (NN) polega na wybraniu – jako rozpoznanie – tej klasy, do której należy obiekt najbliższy rozpoznawanemu obiektowi (a dokładniej jego wektorowi cech).

Niekiedy stosuje się modyfikację metody NN poprzez wyznaczenie odległości do k najbliższych sąsiadów (obiektów) z ciągu uczącego. Nieznany obiekt klasyfikuje się do tej klasy, która najczęściej występuje pośród tych „ k najbliższych obiektów” (kNN). Modyfikacja ta ma za zadanie eliminację wpływu ewentualnych błędów występujących w ciągu uczącym.

Typowym przykładem metody wzorców są metody otoczeń kulistych. Polegają one na obtoczeniu każdego elementu ciągu uczącego kulą (w n -wymiarowej przestrzeni cech). Gdy kule przyjmują największe możliwe promienie, takie że ich otoczenia nie zachodzą na otoczenia punktów z innych klas mamy do czynienia z metodą optymalnych otoczeń kulistych (OOK). Rozpoznawany obiekt przypisujemy do tej klasy, w otoczeniu której się znajduje. Jeżeli obiekt nie znajduje się w żadnym otoczeniu mamy wtedy do czynienia z brakiem rozpoznania (co jest charakterystyczną, często pozytywną cechą tych metod).

Inna z metod opartych na wzorcach polega na zastąpieniu każdej klasy ciągu uczącego jednym reprezentantem – modą. Istnieje wiele sposobów wyznaczania mody jednakże najczęściej wyznacza się ją jako „środek ciężkości” danej klasy. Decyzja o klasyfikacji podejmowana jest w oparciu o odległość nieznanego obiektu od najbliższej mody (NM).

W metodach aproksymacyjnych, na podstawie wektorów tworzących ciąg uczący dokonywany jest podział przestrzeni cech na podprzestrzenie. Bazuje się przy tym na różnych funkcjach podziału przestrzeni, np. na funkcjach liniowych (AL.), kwadratowych (AK), itp. Rozpoznawany obiekt przypisywany jest do tej klasy, w obrębie podprzestrzeni której się znalazł.

4. Materiał pomiarowy

W badaniach wykorzystano węgiel z górnośląskich kopalń węgla kamiennego. Węgiel wykorzystany w pracy pochodzi z następujących pokładów:

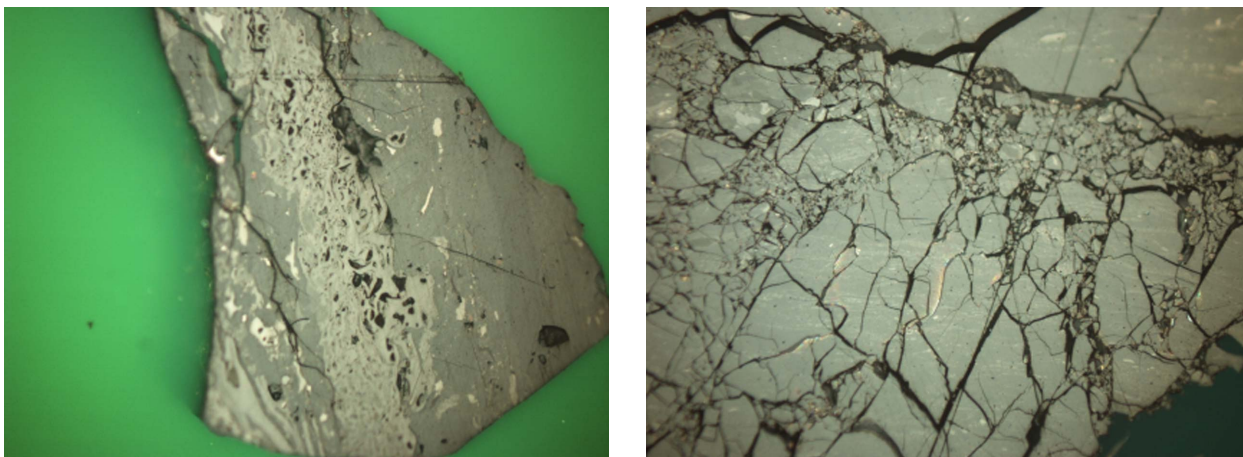
- KWK Zofiówka, chodnik nadścianowy G-2, pokład 412 łg+łd – górnośląska seria piaskowcowa – warstwy rudzkie – próbka nr 104 pobrana z rejonu uskoku ($R_o = 1,17\%$)
- KWK Pniówek, pokład 404/4 + 404/5, pochylnia wentylacyjna V – seria mułowcowa – warstwy załęskie – próbka 103 pobrana z rejonu uskoku ($R_o = 1,03\%$)
- KWK Pniówek, ściana B-5, pokład 403/3 – seria mułowcowa – warstwy załęskie – próbka 117 pobrana z rejonu uskoku ($R_o = 0,98\%$).
- KWK Borynia-Zofiówka, chodnik nadścianowy F-1, pokład 406/1 – seria mułowcowa – warstwy załęskie – próbka 120, rejon uskoku ($R_o = 1,05\%$)
- KWK Budryk, pochylnia odstawcza D, pokład 358/1, – seria mułowcowa – warstwy załęskie – próbka 152 (masy powyrzutowe) – $R_o = 0,82\%$, oraz próbki 153 i 157 ($R_o = 0,99\%$)

Próbki pochodziły z warstw załęskich, z górnośląskiej serii piaskowcowej, z warstw rudzkich oraz z serii mułowcowej, z warstw załęskich (wg podziału: Dembowski 1972, ze zmianami Jureczka 1988, Kotas i in., 1988)

Do analiz zastosowano mikroskop polaryzacyjny AXIOPLAN firmy ZEISS oraz sterowany komputerowo stolik mechaniczny XYZ. Obraz spod mikroskopu optycznego przekazywany był za pomocą kamery CCD na monitor. Stosowano powiększenie $500\times$, co jest zgodne z PN-ISO 7404-3: 2001, dotyczącą petrograficznych analiz węgla kamiennego. Wszystkie pomiary wykonano przy użyciu immersji olejowej. Przykładowe obrazy zarejestrowane na próbkach przedstawiono na rysunku 5.

W pracy podjęto próbę identyfikacji grupy macerałów wityrynytu oraz inertynitu, a także węgla „odmienionego strukturalnie”. Wybór tych trzech składników podyktowany był faktem, że we wcześniejszych latach wykorzystywano je do oceny przyczyn wyrzutów węgla i gazu w kopalniach węgla kamiennego. Należy zaznaczyć, że jako węgiel odmieniony strukturalnie rozumiano węgiel spękany, kataklazę oraz mylonit, gdyż w badaniach z ubiegłych lat niejednokrotnie zwracano uwagę, że taki właśnie węgiel występuje w strefach przyuskokowych, a co za tym idzie w dużej mierze odpowiada, za niekontrolowane zjawiska gazogeodynamiczne (Jakubów i in. 2006; Młynarczuk i Wierzbicki; 2009, Wierzbicki i in., 2012).

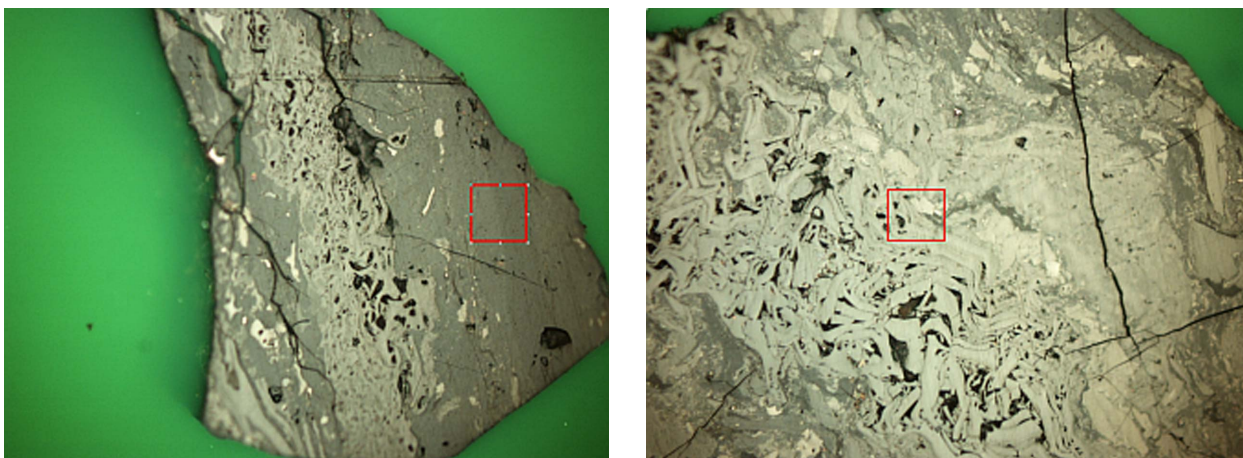
Bazując na powyższym uznano, że na obecnym etapie badań dotyczących możliwości wykorzystania metod sztucznej inteligencji do ilościowej oceny struktury węgla, kluczowym zadaniem będzie utworzenie metodyki pozwalającej na przeprowadzenie opisanych wyżej badań w sposób automatyczny.



Rys. 5. Przykładowe zdjęcia próbek ziarnowych węgla, na których przeprowadzono analizy. Powiększenie 500×. Imersja

5. Metodyka badań

Ogląd struktur zaprezentowanych na wcześniejszych rysunkach prowadzi do wniosku, że poszczególnych zdjęć nie można analizować całościowo (tzn. stwierdzić że na zdjęciu znajduje się wyłącznie jakaś struktura), ale należy analizować ich obszary. W najprostszym podejściu, od którego rozpoczęto badania, przyjęto, że poszczególne obszary mogą obejmować wityrynit, inertynit, kataklazę oraz klej. Przykłady obszarów obejmujących wityrynit i inertynit zaprezentowano na rysunku 6.



Rys. 6. Przykłady obszarów obejmujących wityrynit i inertynit

6. Wyniki badań

Uznano też, że na obecnym etapie badań wyznaczane dla tych obszarów parametry powinny bazować na analizie poziomów szarości tych obszarów oraz na parametrach statystycznych opisujących rozkłady poziomów szarości. Dlatego też dla każdej składowej barwy RGB z wybranych obszarów wyznaczono:

1. Średni poziom szarości obrazu,
2. Odchylenie standardowe dla poziomu szarości obrazu
3. Współczynnik skośności dla poziomu szarości obrazu
4. Kurtozę dla poziomu szarości obrazu
5. Średni poziom szarości obrazu gradientu,
6. Odchylenie standardowe dla poziomu szarości obrazu gradientu
7. Współczynnik skośności dla poziomu szarości obrazu gradientu
8. Kurtozę dla poziomu szarości obrazu gradientu

Wszystkie te parametry unormowano do zakresu 0-100.

W związku z tym, że parametry te obliczano dla każdej z trzech składowych RGB obrazu, dysponowano 24 parametrami opisującymi zaznaczony obszar obrazu. Parametry te definiowały 24 wymiarową przestrzeń cech

Na obrazach zaznaczono obszary będące podstawą do dalszej analizy. Prowadziło to do uzyskania określonej liczby wektorów cech. Część z tych wektorów cech stanowiła losowo obrany ciąg uczący. Pozostałe wektory uznane zostały za nieznanne i poddane rozpoznaniu różnymi metodami.

Tabela 4 zestawia wyniki badań w których dysponowano 590 obiektami (obszarami). Ciąg uczący dla powyższej próby wynosił 200 obiektów (po 50 obiektów na każdą z czterech klas: wityrynit, inertymit, kataklazę i klej). Do rozpoznań wykorzystano pozostałe 390 obiektów, które traktowano jako nieznanne.

Tab. 4. Zestawienie wyników rozpoznań cech strukturalnych węgla

Metoda	Brak rozpoznania [%]	Błędne rozpoznanie [%]	Poprawne rozpoznanie [%]
NN	0	4,1	95,9
kNN (K = 3)	0	5,4	94,6
kNN (K = 5)	0	6,7	93,3
kNN (K = 7)	0	5,1	94,9
kNN (K = 11)	0	5,6	94,6
NM	0	16,1	83,9
OOK	30,0	0,0	70,0
AL	0	5,9	94,1
AK	0	5,4	94,6

Widać, że w automatyczny sposób uzyskano rezultaty, które pokrywają się z klasyfikacją dokonaną przez obserwatora. Najlepsze wyniki zwracała metoda najbliższego sąsiada (NN), stosunkowo dobre metody kNN oraz metody aproksymacyjne (AL i AK). Zdecydowanie najgorsze z powyższych metody używała metoda najbliższej mody (NM). Należy również zwrócić uwagę, że metoda optymalnych otoczeń kulistych (OOK) mimo, że miała najmniejszy odsetek poprawnych rozpoznań (70%), nigdy nie popełniła błędu w rozpoznaniu (zwracała natomiast dość często decyzję w postaci braku rozpoznania). Można więc uznać, że metoda ta jeżeli zwraca jakieś rozpoznanie, to ma ono wysoki stopień prawdopodobieństwa.

W badaniach wykazano, że zmiana ciągu uczącego w niewielki sposób wpływa na wyniki rozpoznań oraz, że zmniejszenie wymiaru przestrzeni cech wpływa, aczkolwiek w nieduży sposób na wyniki rozpoznań. W tabeli 5 przedstawiono wyniki rozpoznań powyższego przykładu dla 12 wymiarowej przestrzeni cech zdefiniowanej przez parametry:

1. średni poziom szarości obrazu,
2. odchylenie standardowe dla poziomu szarości obrazu
3. średni poziom szarości obrazu gradientu,
4. odchylenie standardowe dla poziomu szarości obrazu gradientu

Tab. 5. Zestawienie wyników rozpoznań cech strukturalnych węgla

Metoda	Brak rozpoznania [%]	Błędne rozpoznanie [%]	Poprawne rozpoznanie [%]
NN	0	5,6	94,4
kNN (K = 3)	0	5,4	94,6
kNN (K = 5)	0,5	4,4	95,1
kNN (K = 7)	0	4,1	95,9
kNN (K = 11)	0	5,4	94,6
NM	0	13,85	86,2
OOK	34,6	0,8	64,6
AL	0	11,0	89,0
AK	0	6,7	93,3

Tabela ta potwierdza, że dla analizowanej struktury można znacznie zredukować wymiar przestrzeni cech. Należy jednak zaznaczyć, że liczba rozpoznawanych obiektów sprawiała, że pomimo zmniejszenia wymiaru przestrzeni cech zysk mierzony czasem obliczeń był praktycznie pomijalny.

W innej próbie dysponowano 1250 obiektami (obszarami). Jako ciąg uczący wykorzystano 200 obiektów ciągu uczącego z poprzedniego przykładu (z 24 wymiarową przestrzenią cech). Tak więc wszystkie 1250 obiektów traktowano jako nieznanie i poddano rozpoznaniu. Należy jednocześnie zaznaczyć, że w tym przykładzie wyboru obiektów dokonywał, oraz informację o ich poprawnej klasyfikacji wprowadzał inny obserwator niż we wcześniejszym przykładzie. Wyniki rozpoznań dla tego przykładu zestawia tabela 6.

Tab. 6. Zestawienie wyników rozpoznań cech strukturalnych węgla dla 1250 obiektów

Metoda	Brak rozpoznania [%]	Błędne rozpoznanie [%]	Poprawne rozpoznanie [%]
NN	0	5,2	94,8
kNN (K = 3)	0	5,9	94,1
kNN (K = 5)	0,1	6,3	93,6
kNN (K = 7)	0	7,0	93,0
kNN (K = 11)	0,2	8,0	91,8
NM	0	23,7	76,3
OOK	44,4	0,4	55,2
AL	0	7,7	92,3
AK	0	8,0	92,0

Dokładna analiza wyników rozpoznań najlepiej działającej metody (NN), wykazała, że najczęstszym błędem była niepoprawna identyfikacja inertynitu jako kataklazy (patrz tabela 7). Było to najprawdopodobniej wynikiem tego, że struktura spękań oraz pasemek inertynitu była (z punktu widzenia wykorzystywanych w analizie parametrów) do siebie zbliżona. Zaskakującym wynikiem były pomyłki w identyfikacji kleju. Jednakże po dokładniejszym oglądzie zdjęć uznano, że pomyłki na styku klej-witrynit wynikać mogą z faktu, że zarówno jedna jak i druga struktura są „w miarę gładkie” bez wyraźnych gradientów. Dodatkowo na niektórych zdjęciach barwa kleju upodabnia się do barwy witrynit. Pomyłki na styku kataklaza-klej, autorzy tłumaczą tym, że często w spękania wnika klej, co może być najprawdopodobniej przyczyną tych kilku niepoprawnych rozpoznań.

Tab. 7. Ilość błędnych rozpoznań w rozłożeniu na poszczególne obiekty dla metody NN (całkowita ilość obiektów wynosi 1250)

	Struktura mylnie rozpoznana jako:			
	inertynit	witrynit	kataklaza	klej
inertynit	-	10	32	0
witrynit	0	-	0	4
kataklaza	1	1	-	9
klej	0	9	0	-

7. Podsumowanie

W pracy przedstawiono możliwości zastosowania metod rozpoznawania obrazów do identyfikacji wybranych cech petrograficznych i strukturalnych węgla. Cechami tymi były: witrynit, inertynit, kataklaza i (ze względów pomiarowych) klej. W wyniku przeprowadzonych analiz otrzymano poprawne klasyfikacje tych struktur na poziomie sięgającym 96%. Wykazano tym samym, że metody sztucznej inteligencji, pozwalają na identyfikowanie wybranych cech petrograficznych i strukturalnych węgla.

Autorzy postawili sobie za cel wykonać zaplanowane prace wieloetapowo, aby w efekcie opracować metodę, która pozwoli na analizę ilościową węgla przy wykorzystaniu metod sztucznej inteligencji. Planowane jest, w miarę możliwości, poszerzenie opisywanych tu badań o:

- wyodrębnienie pełnego składu macerałowego, najpierw tylko poszczególnych grup (witrynit, inertynit i liptynit), a następnie także i wybranych, najpospolitszych macerałów z każdej grupy,
- przyporządkowanie (na podstawie znajomości składu macerałowego) analizowanych próbek to poszczególnych mikrolitotypów,
- identyfikację stopnia spękań w węglu, a w dalszych krokach także opracowanie takich metod, aby było możliwe identyfikowanie stopnia zaawansowania zmian strukturalnych węgla (kataklaza, mylonit),

- zidentyfikowanie substancji mineralnej towarzyszącej pokładom węgla, najpierw jedynie jej obecności, a w kolejnych krokach także i rozróżnienie poszczególnych, najpospolitszych rodzajów karbominerytów.

Praca została wykonana w roku 2012 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

8. Literatura

- Beamish B., Crosdale P.J., 1998: *Instantaneous outbursts in underground coal mines: An overview and association with coal type*. International Journal of Coal Geology 35. 27-55.
- Blaschke W.S., 2009: *Przeróbka węgla kamiennego - wzbogacanie grawitacyjne*. Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN.
- Bodziony J., Lama R.D., 1996: *Sudden outburst of gas and coal in underground coal mines*. Publisher Lama & Associates, 130 Brokers Road, Mt. Pleasant, NSW 2519, Australia.
- Cao Y., Mitchell G.D., Davis A., Wang D., 2000: *Deformation metamorphism of bituminous and anthracite coals from China*. International Journal of Coal Geology 43, 227-242.
- Dembowski Z., 1972: *Ogólne dane o Górnośląskim Zagłębiu Węglowym*. Pr. Inst. Geol., vol. 61.
- Flasiński M., 2011: *Wstęp do sztucznej inteligencji*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Gentzis T., 2006: *Economic coalbed methane production in the Canadian Foothills: Solving the puzzle*. International Journal of Coal Geology, Vol. 65, Iss. 1-2, p. 79-92.
- Godyń K., 2011: *Struktury odmienione węgla kamiennego w strefach zaburzeń tektonicznych - Propozycja Klasyfikacji*. Prace IMG PAN, T. 13, nr 1-4.
- Jakubów A., Tor A., Wierzbicki M. 2006: *Własności strukturalne węgla w rejonie wyrzutu węgla i gazu w chodniku transportowym D-6 pokład 409/4 KWK „Zofiówka”*. Konferencja Naukowo-Techniczna „Górnictwo i Zagrożenia Naturalne”.
- Jiang B., Ju Y., Quin Y., 2004: *Textures of tectonic coals and their porosity*. Mining and Science technology. Taylor&Group, London, 317-320.
- Kotas A., Buła Z., Jureczka J., 1988: *Problematyka podziału litostratigraficznego górnośląskiej serii piaskowcowej karbonu Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w świetle zasad kodeksu stratygraficznego*. Materiały XI Sympozjum Geologia Formacji Węglonośnych Polski, Formacja karbońska. Wyd. AGH. Kraków.
- Kruszewska K., Dybowa-Jachowicz S., 1997: *Zarys petrologii węgla*. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice.
- Li H., Ogawa Y., Shimada S., 2003: *Mechanism of methane flow through sheared coals and its role on methane recovery*. Fuel 82, 1271-1279.
- Lorenz U., 2010: *Gospodarka węglem kamiennym energetycznym*. Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN.
- Manecki A., Muszyński M. (red.), 2008: *Przewodnik do petrografii*. Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków.
- Młynarczuk M., Wierzbicki M., 2009: *Stereological and profilometry methods in detection of structural deformations in coal samples collected from the rock and outburst zone in the “Zofiówka” Colliery*. Arch. Min. Sci., Vol. 54, No 2, p. 189-201.
- Olszewska K., Magnes C., Ziółkowski J., Kuhl J., 1965: *Atlas petrograficzny górnośląskich kamiennych węgla humusowych*. Główny Instytut Górnictwa. Wydawnictwo Śląsk, Katowice.
- Ryka W., Maliszewska A., 1991: *Słownik Petrograficzny*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Shepherd J., Rixon L.K., Creasey J.W., 1980: *Analysis and prediction of geological structures associated with outbursts at Collinsville, Queensland*. The Occurrence, Prediction and Control of Outbursts in Coal Mines Symposium, Australian Institute of Mining and Metallurgy, Parkville, Victoria, Australia, 159-171.
- Tadeusiewicz R., Flasiński M., 1991: *Rozpoznawanie obrazów*, PWN, Warszawa.
- Van Krevelen D.W., Schuyer J., 1959: *Węgiel. Chemia węgla i jego struktura*. Wydawnictwo PWN, 1959
- Wierzbicki M., Młynarczuk M., 2006: *Microscopic analysis of structure of coal samples collected after an gas and coal outbursts in the gallery D-6, coal seam 409/4 in the „Zofiówka” coal mine (Upper Silesian Coal Basin)*. Arch. Min. Sci., Vol. 51, No 4, p. 577-588.

Application of the image recognition methods to support the decision- making in classification of coal in terms of selected petrographic properties

Abstract

Preliminary tests were performed to develop methods supporting the recognition of microscopic images of coal, to be used in the decision-making processes involved in coal classification in terms of their petrographic (maceral composition) and structural properties (the extent of structural damage). Results of previous tests reveal that identification of vitrinite, inertinite, catalase as well as adhesives encapsulating the tested coal fragments is of particular importance in the case of coal-gas systems. The multi-dimensional space of coal properties is defined, allowing an automatic classification of pre-defined features, basing on image recognition methods. This procedure allowed for correct classification of those properties, the accuracy level approaching 96%. It appears that AI (artificial intelligence) methods enable the identification of selected petrographic and structural parameters of coal. Further development of this methodology may result in creation of an universal tool allowing the objective evaluation of a larger number of petrographic and structural properties of coal.

Keywords: image recognition, quantitative analysis of coal, macerals, coal structure