

ANNALES
UNIVERSITATIS MARIAE CURIE-SKŁODOWSKA
LUBLIN – POLONIA

VOL. LXXX

SECTIO B

2025

WERONIKA SOFIŃSKA-CHMIEL

<https://orcid.org/0000-0002-1961-4980>

Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie

Wydział Chemii

pl. Marii Curie-Skłodowskiej 2, 20-031 Lublin, Polska

weronika.sofinska-chmiel@mail.umcs.pl

LUCJAN GAZDA

<https://orcid.org/0000-0003-0821-4348>

Państwowa Akademia Nauk Stosowanych

Instytut Nauk Technicznych i Lotnictwa

ul. Pocztowa 54, 22-100 Chełm, Polska

l.gazda@pollub.pl

MAŁGORZATA FRANUS

<https://orcid.org/0000-0003-2317-4196>

Politechnika Lubelska

Wydział Budownictwa i Architektury

ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, Polska

m.franus@pollub.pl

MARTA KUBERSKA

<https://orcid.org/0000-0002-3077-5718>

Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy

Zakład Geologii Regionalnej i Złóżowej

ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa, Polska

marta.kuberska@pgi.gov.pl

Badania fizykochemiczne, petrograficzne oraz mineralogiczne lubelskiego bursztynu

Physicochemical, Petrographic and Mineralogical Studies of Lublin Amber

Abstract: This study presents, for the first time, the results of research on Lublin amber and the associated glauconite and sandstones accompanying amber deposits. The material was collected directly from mining excavations. Comprehensive analyses were performed on glauconite, sandstones, and amber samples taken from the excavation walls of the Stellarium mine (Górka Lubartowska-Niedźwiada deposit). The

article includes petrographic and mineralogical characterization of glauconite and sandstones. FTIR spectroscopic analyses were conducted on amber samples obtained from the bottom, middle, and top sections of the deposit series, as well as from sandstones of varying hardness (hard, medium, soft). FTIR results did not reveal a clear relationship between the degree of amber depolymerization and its position in the profile, nor between the content of C=O and C–H bonds and the hardness of the host rock. However, a distinct increase in C=C bond content was observed in amber extracted from harder sandstones, which may indicate partial degradation of the polymer network leading to reduced crosslinking. AFM nanomechanical tests showed that amber from hard sandstones exhibits higher stiffness and brittleness with a simultaneous decrease in elasticity. Minor differences in elasticity values were also noted depending on sampling depth and amber color, with milky varieties showing higher Young's modulus values. The obtained results provide a basis for further research on the genesis of Lublin amber and its distinctiveness compared to other varieties of succinite (Baltic amber).

Keywords: amber; glauconite; Eocene; Lublin region

Abstrakt: W pracy przedstawiono po raz pierwszy wyniki badań lubelskiego bursztynu oraz glaukonitu i piaskowców, które towarzyszyły złożom bursztynu. Materiał do badań pozyskano bezpośrednio z wyrobisk górniczych. Przeprowadzono kompleksowe analizy glaukonitu, piaskowców oraz bursztynów pobranych ze ścian eksploatacyjnych kopalni Stellarium (złoże Górka Lubartowska-Niedźwiada). W artykule dokonano charakterystyki petrograficznej i mineralogicznej glaukonitu oraz piaskowców. Zaprezentowano również badania spektroskopowe FTIR bursztynów pobranych ze spągu, środkowej części oraz stropu serii złożowej, a także z piaskowców o różnej twardości (twarde, średnie, miękkie). Przeprowadzone badania FTIR nie wykazały jednoznacznej zależności pomiędzy stopniem depolimeryzacji bursztynu a jego położeniem w profilu ani pomiędzy zawartością wiązań C=O i C–H a twardością skały macierzystej. Zaobserwowano natomiast wyraźny wzrost zawartości wiązań C=C w bursztynach wydobytych z piaskowców o większej twardości, co może wskazywać na częściową degradację sieci polimerowej, prowadzącą do obniżenia stopnia usieciowania struktury. Badania nanomechaniczne AFM wykazały, że bursztyny z piaskowców twardych cechują się wyższą sztywnością i kruchością, przy jednoczesnym spadku sprężystości. Niewielkie różnice w wartościach modułu sprężystości odnotowano także w zależności od głębokości pobrania próbek i barwy bursztynu – odmiany mleczne charakteryzowały się wyższymi wartościami modułu Younga. Uzyskane wyniki stanowią podstawę do dalszych badań nad genezą bursztynu lubelskiego oraz jego odrębnością względem innych odmian sukcytnu (bursztynu bałtyckiego).

Słowa kluczowe: bursztyn; glaukonit; eocen; Lubelszczyzna

WSTĘP

Historia poznania lubelskiego bursztynu rozpoczyna się mocnym akcentem w 1762 r. „Posiadam kawałek, który został znaleziony w dobrach hrabiego Rzewuskiego, wojewody podlaskiego, w jego majątku w rejonie Chełma” – pisał w swoich notatkach Jean-Etienne Guettard, autor pierwszej mapy geologicznej Polski, która była ilustracją do opracowania o geologii ziem Polski, opublikowanego w pracach Francuskiej Akademii Nauk (Guettard, 1764, za: Daszkiewicz i Tarkowski, 2009, s. 152). Było to znalezisko na tyle intrygujące, że przedstawił je na forum Akademii

Królewskiej w Paryżu. Nieco później zaś, bo w 1803 r., relacjonował Staszic (1931, s. 385): „Wtenczas widziałem w Radzyniu kawałki bursztynu, znalezione czyli wykopane w szczelinach błotnistych, któremi dawniej zdaje się uchodziły wody do Tyśmienicy koryta”. „W dobrach Jana hr. Zamoyskiego we wsi Kozłowcu [Kozłowiec] pod Lubartowem, w czasie wiosennego orania w roku 1870, znaleziono sztukę bursztynu wielkości sporego bochenka chleba, szkoda jednak, że włościanin, który takową znalazł, przez niewiedzę rozbił ją na części” (Kurz [Antoni Zagrzejewski], 1873, s. 312). O bursztynie lubelskim pisał w swoich notatkach (materiały niepublikowane w zbiorach Muzeum Ziemi PAN) etnograf Adam Chętnik w latach 30. XX w. Niepublikowane są także informacje o lubelskim bursztynie prof. Jana Samsonowicza z lat 50. XX w., dostępne w Muzeum Ziemi PAN.

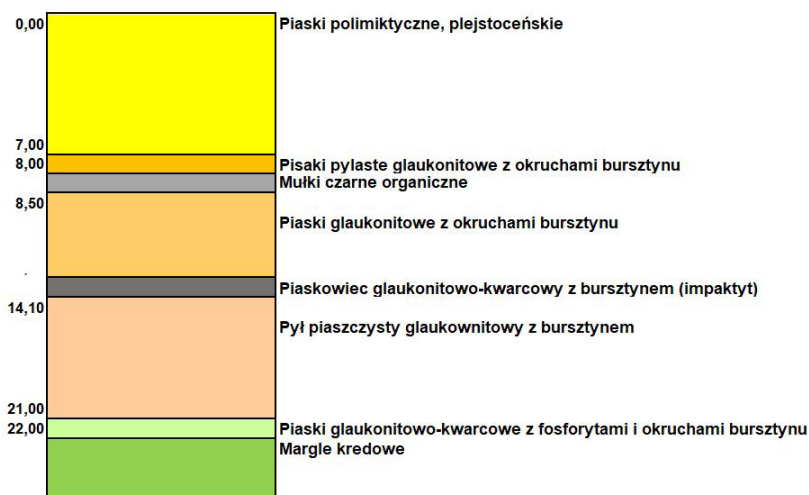
Naukowa historia lubelskiego bursztynu rozpoczyna się w latach 60. XX w. pracami Woźnego (1966) oraz Mojskiego i in. (1966). Pod koniec XX w. ukazały się pierwsze dokumentacje występowania i zasobów lubelskiego bursztynu. Obszar „bursztynonośny” został przedstawiony geologicznie na arkuszach Leszkowice (Żarski i Tekielska, 2019) i Lubartów (Kucharska i Krawczyk, 2021). W 1989 r. przy okazji dokumentacji złoża kruszywa naturalnego w Górcie Lubartowskiej Przedsiębiorstwo Geologiczne POLGEOL z Warszawy udokumentowało pierwsze złożo bursztynu, wówczas jako kopaliny towarzyszącej (Słodkowska i in., 2022; Strzelczyk i Danielewicz, 1990). Podsumowania tego pionierskiego okresu rozpoznawania lubelskiego bursztynu dokonano w trakcie konferencji, która odbyła się w 2015 r. pn. „Lubelski bursztyn – znaleziska, geologia, złoża, perspektywy”, zakończonej wydaniem monograficznego zbioru referatów pod tym samym tytułem (Gazda, 2016). W książce odniesiono się także do kontrowersyjnego dla niektórych badaczy terminu „lubelski bursztyn”, który zarówno w monografii, jak i w niniejszym artykule ma charakter geologiczno-złożowy, a nie mineralogiczno-surowcowy, dla którego zarezerwowany jest termin „bursztyn bałtycki” (Gazda, 2016), wokół którego Gdańsk – matecznik polskiego bursztynu – tworzy swoją markę. Semantyka tych terminów mogłaby być przedmiotem oddzielnej konferencji i publikacji. Nie rozstrzygnęła tego również konferencja pn. „Lubelski bursztyn – nowe horyzonty”, która odbyła się w 2025 r. (materiały są w przygotowaniu). Podsumowania dotychczasowej wiedzy o uwarunkowaniach geologicznych, paleośrodowiskowych i stratygraficznych występowania nagromadzeń złożowych bursztynu na Lubelszczyźnie znajdują się w pracy Słodkowskiej i in. (2022).

Od 2018 r. bursztyn lubelski stał się faktem górniczym, surowcowym. W ciągu kilku lat eksploatacji uruchomiono cztery kopalnie oraz wykonano kilkanaście dokumentacji geologiczno-złożowych, a na rynek trafiło ponad 50 t bursztynu. Odsłonięcia osadów eocenu górnego, w których występuje bursztyn w funkcjonujących kopalniach, dają możliwość bezpośrednich obserwacji geologicznych oraz badań bursztynu

(sukcyniktu), w tym skomplikowanych procesów, które nadały mu ostateczną postać fizyczną i skład chemiczny. Niniejszy artykuł jest pierwszą próbą syntetycznego ujęcia petrografii i mineralogii lubelskiego bursztynu w oparciu o opróbowanie dokonane bezpośrednio ze ścian wyrobisk górniczych. Celem jest petrograficzna oraz mineralogiczna analiza glaukonitu i piaskowców, a także fizykochemiczna charakterystyka bursztynów występujących w profilu serii złożowej oraz w piaskowcach o zróżnicowanej twardości.

MATERIAŁY

Próby do badań pobrano ze ścian eksploatującej kopalni Stellarium (złoże Górka Lubartowska-Niedźwiada). Na ryc. 1 przedstawiono schematyczny profil geologiczny z rejonu Górki Lubartowskiej z najwcześniej udokumentowanym ciągłym poziomem piaskowców w stropie eocenu.



Ryc. 1. Profil geologiczny z rejonu Górki Lubartowskiej z najwcześniej udokumentowanym ciągłym poziomem piaskowców w stropie eocenu (Gazda, 2016)

Fig. 1. Geological profile from the Górka Lubartowska area with the earliest documented continuous sandstone layer at the top of the Eocene (Gazda, 2016)

Przedmiotem opróbowania były drobnoziarniste piaski i mułki oraz występujące w ich stropie piaskowce kwarcowo-glaukonitowe. Drobnoziarnistość tych osadów i ciemnozielona barwa nie pozwalają na makroskopowe (poza wydzielaniem piaskowców) zróżnicowanie profilu pod względem litofacjalnym. Na ryc. 2 przedstawiono lokalizację piaskowców w profilu ściany eksploatacyjnej.



Ryc. 2. Lokalizacja piaskowców w profilu ściany eksploatacyjnej (badania własne)

Fig. 2. Location of sandstones in the profile of the exploitation wall (own research)

Pobrano łącznie 8 prób, odpowiednio: spąg (nr 1), środek (nr 2), strop (nr 3), piaskowiec miękki (nr 4), piaskowiec średni (nr 5), piaskowiec twardy (nr 6), nadkład (nr 7) oraz pliocen (nr 8), o masie około 20 kg każda. Próby poddano upłynnieniu (poza piaskowcami) i oddzieleniu frakcji powyżej 0,1 mm. Do dalszych badań pobrano bursztyn wydzielany makroskopowo i glaukonit separowany magnetycznie po wysuszeniu frakcji ziarnistej. Piaskowce analizowano mikroskopowo oraz izolowano z nich mechanicznie bursztyn. Ponadto bursztyny pobrane ze stropu, środka i spągu podzielono na dwie grupy ze względu na barwę: przezroczyste i mleczne.

Dla uzyskanych prób glaukonitu oraz piaskowców wykonano badania składu petrograficznego oraz badania mineralogiczne, natomiast dla pobranych próbek bursztynu – badania fizykochemiczne.

METODY BADAWCZE

Mikroskopia optyczna w świetle spolaryzowanym. Badania składu petrograficznego piaskowców wykonano w Laboratorium Państwowego Instytutu Geologicznego w Warszawie. Z oszlifowanych piaskowców wykonano płytki cienkie do analizy mikroskopowej dla oznaczenia składu petrograficznego. Analizy wykonano za pomocą mikroskopu optycznego w świetle spolaryzowanym (Optiophot 2 Pol firmy Nikon).

Dyfrakcja rentgenowska XRD oraz spektroskopia fluorescencji rentgenowskiej XRF. Badania mineralogiczne glaukonitu wykonano w Laboratorium Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej. Dokonano charakterystyki strukturalnej i składu mineralnego metodą dyfrakcji rentgenowskiej XRD (dyfraktometr rentgenowski X'Pert Pro MPD) dla preparatów proszkowych. Analizę składu pierwiastkowego wykonano metodą spektrometrii fluorescencji rentgenowskiej XRF.

Badania spektroskopowe FTIR oraz mikroskopowe AFM wykonano w Laboratorium Analitycznym w Instytucie Nauk Chemicznych Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie.

Spektroskopia FTIR. Do rejestracji widm wykorzystano spektrometr FTIR Thermo Nicolet 8700 z przystawką Smart Orbit™ diamond ATR i detektorem DTGS. W celu uzyskania dobrego kontaktu próbki z kryształem diamentowym próbki bursztynów utarto w moździerzu agatowym. Z otrzymanego proszku wykonano widma w zakresie liczb falowych $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$, z rozdzielczością spektralną 4 cm^{-1} . Otrzymane widma FTIR-ATR poddano operacjom korekcji ATR, korekcji linii bazowej oraz skalowanej normalizacji.

Mikroskopia sił atomowych AFM. Badania modułu Younga wykonano z wykorzystaniem mikroskopu sił atomowych AFM Veeco (USA) NanoScope V. Badania wykonano w trybie Peak Force QNM (Quantitative Nano Mechanical Property Mapping). Zastosowano sondę Golden Silicon Probe o współczynniku sprężystości 42 N/m .

WYNIKI

1. Wynik badań petrograficznych oraz mineralogicznych

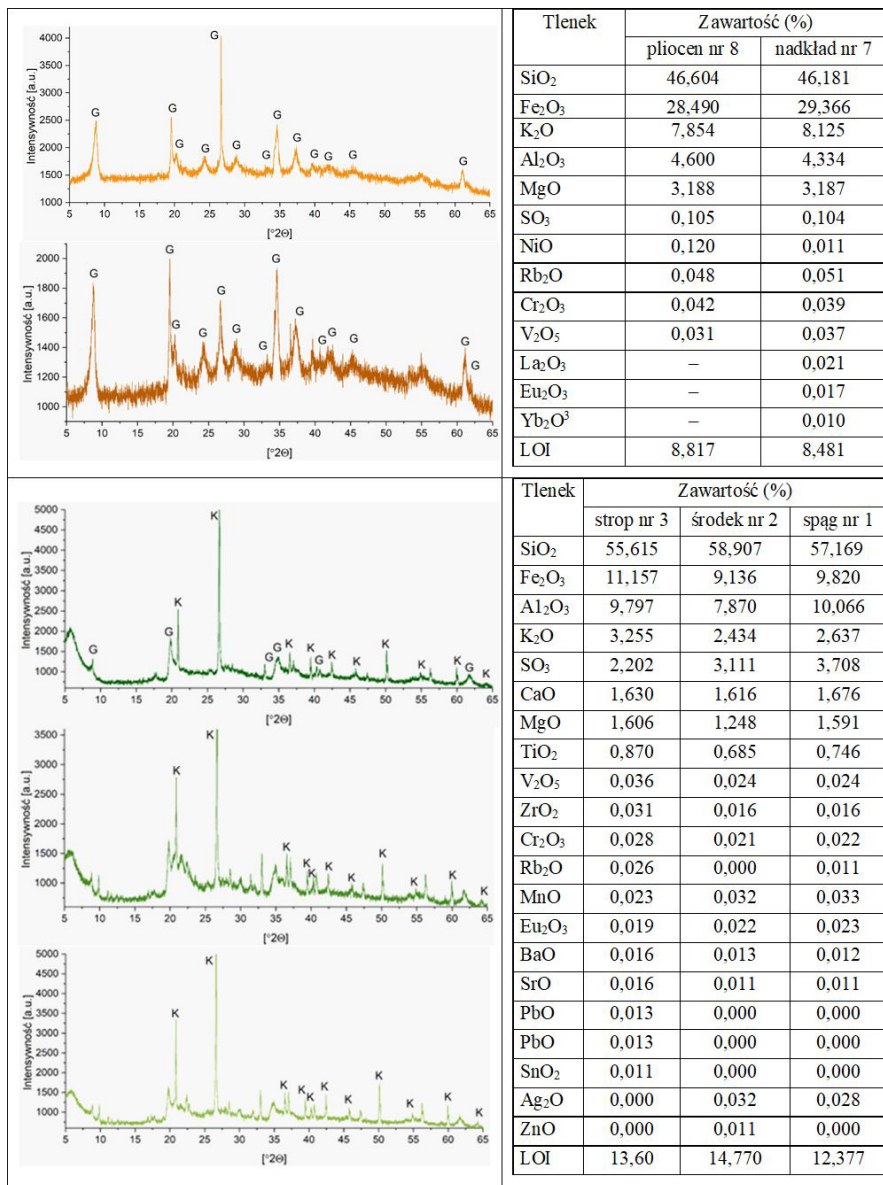
Bardzo charakterystycznym i czytelnym elementem w profilu serii bursztynonośnej są występujące w stropie piaskowce glaukonitowo-kwarcowe. W rejonie funkcjonujących kopalni tworzą one wyraźny poziom o grubości około 1 m z trzema ławicami o $15\text{--}25\text{ cm}$ grubości tkwiącymi w luźnych osadach mułkowych. Piaskowce te wykazują różny stopień lityfikacji. Górne są twarde, prawie kwarcytyczne, środkowe są średnio twarde z czytelnymi replikami skamieniałości, a dolne są miękkie, rozsypliwe, z czytelnymi skamieniałościami. Piaskowce są bezwęglanowe i zawierają w swoim składzie bursztyn (zob. ryc. 3).



Ryc. 3. Obraz mikroskopowy badanych próbek piaskowców: a) piaskowiec twardy; b) piaskowiec średni; c) piaskowiec miękki (badania własne)

Fig. 3. Microscopic images of the tested sandstone samples: a) hard sandstone; b) medium sandstone; c) soft sandstone (own research)

Charakterystykę mineralogiczną i chemiczną glaukonitu (za wyjątkiem glaukonitu zawartego w piaskowcach) zestawiono w formie dyfraktogramów i udziałów tlenków metali (zob. ryc. 4).



Ryc. 4. Zestawienie dyfraktogramów proszkowych glaukonitów: G – glaukonit; K – kwarc (opracowanie własne)

Fig. 4. List of powder diffraction patterns of glauconites: G – glauconite; K – quartz (own research)

Piaskowiec twardy (próbka nr 6) ma charakter glaukonitowy (40%) i kwarcowy (50%). Uzupełnieniem składu mineralnego są repliki (krzemionkowe) bioklastów i skalenie (3%). Spoiwo jest chalcedonowe i kwarcowe o charakterze kontaktowym i masy wypełniającej. Glaukonit tworzy skupienia agregatowe lub występuje jako pojedyncze ziarna. Wielkość ziaren jest zróżnicowana i wynosi od około 0,20 mm do około 1,50 mm. Większość ziaren jest spękana lub nieco nadtrawiona. Spękania miejscami wypełnione są krzemionką. Ziarna kwarcu wykazują różny stopień obtoczenia: od nieobtoczonych we frakcji drobniejszej (przeciętna średnica około 0,15–0,20 mm) do dobrze obtoczonych we frakcji grubszej (średnica ziaren dochodzi do 1,5 mm). Kwarc często jest spękany, występują również ziarna z charakterystycznymi zatokami korozyjnymi znanymi dla kwarców wulkanicznych. Wygaszanie światła w ziarnach kwarcu jest bardzo zróżnicowane: od jednorodnego po faliste, miejscami mozaikowe lub smużyste. Takie anomalie wygaszania światła często związane są z dynamicznymi odkształceniami w sieci krystalicznej kwarcu, który jest pod tym względem bardzo wrażliwy i zachowuje ich skutki.

W piaskowcu średnim (próbka nr 5) procentowy udział poszczególnych składników ziarnowych jest następujący: kwarc około 45% obj., glaukonit około 50% obj., bioklasty około 2% obj., skalenie około 3% obj. Glaukonit występuje głównie w formie pojedynczych ziaren. Ich wielkość jest zróżnicowana – wynosi od około 0,10 mm do około 1,00 mm. Spoiwo o charakterze masy wypełniającej tworzy bezpostaciowa krzemionka, być może z domieszką minerałów ilastych i/lub fosforanów.

W składzie materiału detrytycznego piaskowca miękkiego (próbka nr 4) wyróżniono ziarna kwarcu, glaukonit, nieliczne bioklasty i skalenie. Glaukonit występuje głównie w formie pojedynczych ziaren o wielkości od około 0,10 mm do około 0,70 mm. Ziarna kwarcu wykazują różny stopień obtoczenia: od nieobtoczonych (przeciętna średnica ziaren około 0,08 mm) we frakcji drobniejszej do dobrze obtoczonych we frakcji grubszej (średnica ziaren dochodzi do około 0,80 mm). Ziarna detrytyczne tkwią w masie krzemionkowo-ilasto-fosforanowej.

Glaukonit z osadów pliocenu (nr 8) jest strukturalnie dobrze uporządkowany, bez udziału pakietów pęczniejących. Brak w nim istotnego udziału innych faz mineralnych. Potwierdzeniem dobrego uporządkowania jest wysoka zawartość potasu (7,8%) i wysoka zawartość żelaza oraz niska strata prażenia. Interesująca w jego składzie jest podwyższona zawartość niklu i chromu. Dyfraktogram glaukonitu z nadkładu jest obrazem bardzo dobrze uporządkowanej struktury. W jego strukturze brak innych faz mineralnych. Bardzo wysoka zawartość potasu (8,1%) i żelaza (ponad 29%) oraz niska strata prażenia są tego potwierdzeniem. Interesująca jest podwyższona zawartość niklu, chromu i lantanowców. Dyfraktogram glaukonitu ze stropu (nr 3) jest obrazem średnio uporządkowanego glinokrzemianu pakietowego

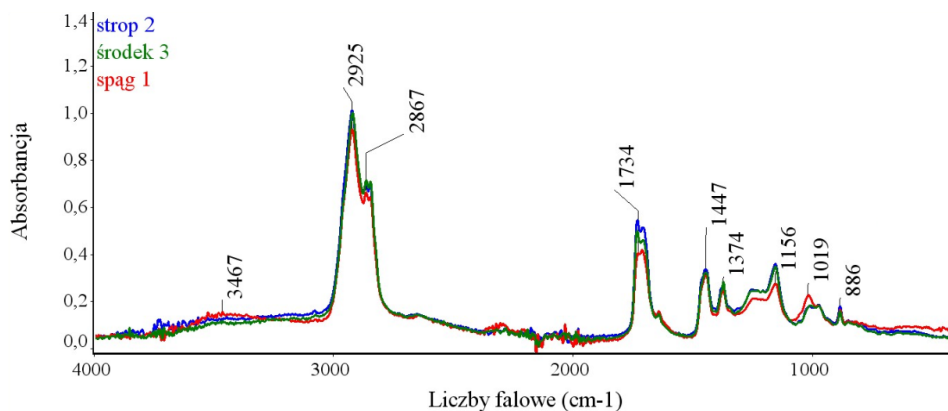
z małym udziałem pakietów pęczniejących. W agregatach glaukonitowych zarejestrowany jest duży udział kwarcu. Zawartość potasu (3,3%) i żelaza jest zaniżana domieszką mechaniczną kwarcu. Wysoka zawartość siarki wynika z obecności w jego strukturze siarczków żelaza. Dyfraktogramy glaukonitów ze środka (nr 2) i spągu (nr 1) serii złożowej są obrazem bardzo słabo uporządkowanych struktur pakietowych z dużym udziałem smektytów. Odnotowano przy tym duży udział w agregatach kwarcu i pirytu oraz kaolinitu, a także zawartość potasu poniżej 3% i żelaza poniżej 10% oraz duże straty prażenia.

2. Wyniki badań fizykochemicznych bursztynów

Kolejnym etapem prowadzonych badań była charakterystyka spektroskopowa bursztynów pobranych ze stropu (nr 3), środka (nr 2) i spągu (nr 1). Celem było określenie różnic w składzie chemicznym oraz w strukturze wiązań chemicznych bursztynów pobranych ze stropu, środka i spągu z wykorzystaniem spektroskopii w podczerwieni (FTIR). Analiza miała na celu identyfikację charakterystycznych grup funkcyjnych oraz ewentualnych zmian w ich położeniu lub intensywności wynikających z warunków geologicznych i procesów diagenety, a także ocenę stopnia zachowania i ewentualnych różnic w procesie fosylizacji w różnych poziomach złoża. Badaniom poddano po cztery próbki z każdej wysokości złoża, z których wykonano badania spektroskopowe FTIR. Wytypowane próbki poddano również badaniom z wykorzystaniem mikroskopii sił atomowych AFM. Celem było określenie różnic w wartościach modułu Younga bursztynów pochodzących z różnych poziomów złoża – stropu, środka i spągu – w celu oceny wpływu warunków geologicznych i stopnia diagenety na właściwości mechaniczne materiału. Analiza miała również doprowadzić do zidentyfikowania ewentualnych zmian w elastyczności bursztynu, wynikających z jego położenia w profilu złoża oraz czasu i warunków fosylizacji.

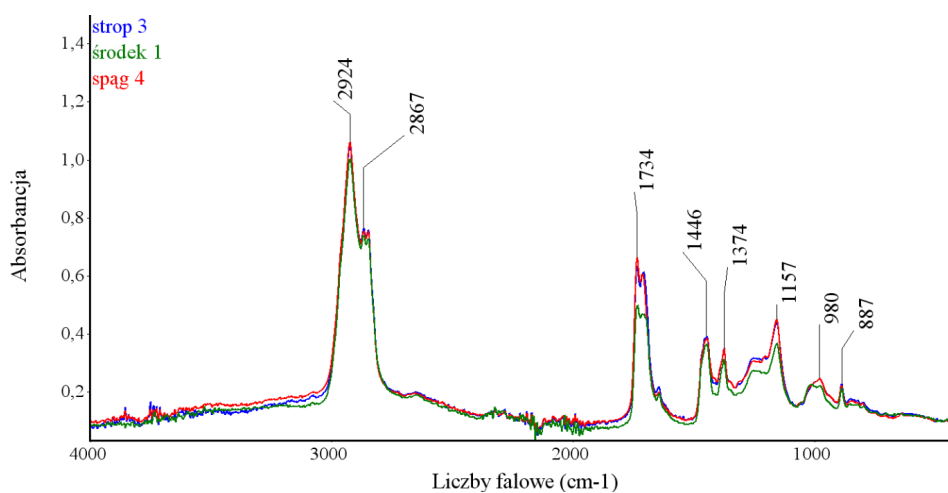
Analogiczne badania wykonano dla bursztynów pozyskanych z piaskowca twardego, średniego i miękkiego (zob. tab. 3–4).

Na ryc. 5–7 przedstawiono przykładowe widma FTIR-ATR badanych bursztynów pobranych ze stropu, środka i spągu oraz piaskowców o różnej twardości.



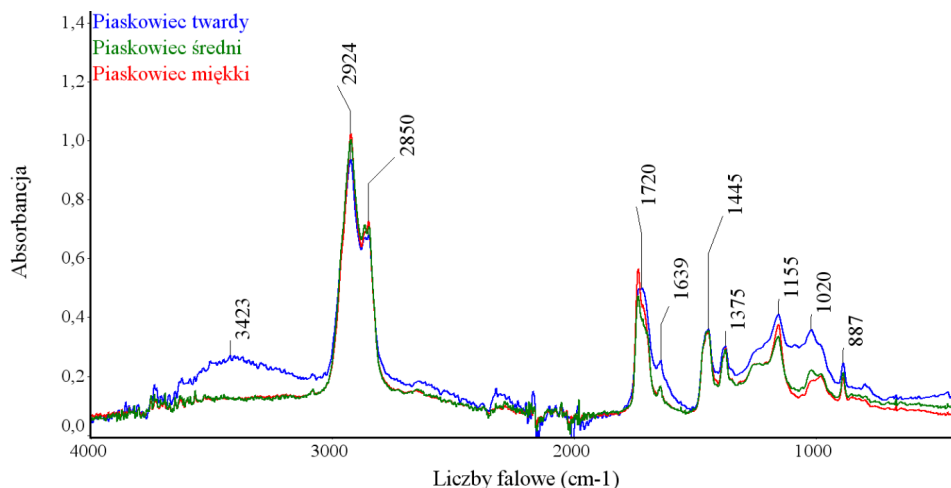
Ryc. 5. Zestawienie widm FTIR-ATR próbek bursztynów o zabarwieniu przezroczystym pobranych ze stropu, środka i spągu wraz z zaznaczonym położeniem pasm spektralnych (badania własne)

Fig. 5. Comparison of FTIR-ATR spectra of transparent amber samples taken from the melt, center and bottom with the position of spectral bands marked (own research)



Ryc. 6. Zestawienie widm FTIR-ATR próbek bursztynów o zabarwieniu mlecznym pobranych z części przystropowej, środkowej i przyspagowej serii bursztynonośnej z zaznaczonym położeniem pasm spektralnych (badania własne)

Fig. 6. Comparison of FTIR-ATR spectra of milky amber samples collected from the upper, middle and lower parts of the amber-bearing series with the position of spectral bands marked (own research)



Ryc. 7. Zestawienie widm FTIR-ATR próbek bursztynów pobranych z piaskowca twardego, średniego i miękkiego z zaznaczonym położeniem pasm spektralnych (badania własne)

Fig. 7. Comparison of FTIR-ATR spectra of amber samples taken from hard, medium and soft sandstone with the position of spectral bands marked (own research)

Analiza spektroskopowa FTIR wszystkich badanych próbek bursztynów (strop, środek, spąg) oraz pobranych z piaskowca twardego, średniego i miękkiego potwierdziła obecność typowych pasm absorpcyjnych charakterystycznych dla bursztynu bałtyckiego. We wszystkich badanych próbkach wykryto szerokie pasmo w zakresie 3600–3200 cm⁻¹, odpowiadające drganiom rozciągającym grup –OH obecnych w alkoholach oraz kwasach karboksylowych. W zakresie liczb falowych 3000–2800 cm⁻¹ i 1500–1350 cm⁻¹ stwierdzono obecność intensywnych sygnałów charakterystycznych dla drgań rozciągających i zginających wiązań C–H. Ponadto w zakresie 1735–1700 cm⁻¹ zaobserwowano pasma charakterystyczne dla drgań rozciągających wiązań C=O. Obecność kilku sygnałów w tym obszarze sugeruje występowanie grup zarówno karbonylowych, jak i estrowych. W niższym zakresie częstotliwości, tj. 1350–800 cm⁻¹, zarejestrowano pasma typowe dla drgań wiązań C–C, C–H oraz C–O, co wskazuje na obecność związków estrowych (Kosmowska-Ceranowicz i Vavra, 2015; Silverstein i in., 2007; Wagner-Wysiecka, 2018).

Przeprowadzone badania porównawcze otrzymanych widm nie wykazały istotnych różnic w położeniu pasm spektralnych. Badania wykazały natomiast różnice w intensywności sygnałów. W celu ilościowej oceny wiązań C=O, C=C oraz CH₃ i CH₂, które mogą wskazywać na różnice w stopniu polimeryzacji, dokonano analizy pól powierzchni pików odpowiadających drganiom rozciągającym grup C=O i C=C oraz drganiom deformacyjnym grup CH₃ i CH₂ (zob. tab. 1–2).

Tab. 1. Pola powierzchni pików wyznaczone z widm FTIR bursztynów pozyskanych z różnych serii złożowych (badania własne)

Tab. 1. Peak areas determined from FTIR spectra of ambers obtained from various deposit series (own research)

Pomiar/ Measurement	Pole powierzchni pików / Peak area 1828–1528 cm ⁻¹		
	strop/melt	środek/center	spąg/bottom
1	40,86	32,68	30,59
2	36,25	27,88	31,20
3	40,21	33,71	37,20
4	29,34	30,07	38,64
Pomiar	Pole powierzchni pików 1653–1606 cm ⁻¹		
	strop	środek	spąg
1	0,53	0,39	0,45
2	0,47	0,51	0,59
3	0,51	0,45	0,58
4	0,71	0,68	0,21
Pomiar	Pole powierzchni pików 1506–1402 cm ⁻¹		
	strop	środek	spąg
1	8,73	9,24	8,90
2	9,38	9,76	8,46
3	9,44	9,15	9,76
4	9,84	9,64	9,09

Przeprowadzone badania FTIR pola powierzchni pików w zakresach 1828–1528 cm⁻¹, 1653–1606 cm⁻¹ oraz 1506–1402 cm⁻¹ nie wykazały wyraźnej zależności procesów depolimeryzacji bursztynu lubelskiego od profilu serii złożowej.

Tab. 2. Pola powierzchni pików wyznaczone z widm FTIR bursztynów pozyskanych z piaskowców o różnej twardości (badania własne)

Tab. 2. Peak areas determined from FTIR spectra of ambers obtained from sandstones of different hardness (own research)

Rodzaj bursztynu / Type of amber	Pole powierzchni pików / Peak area 1828–1528 cm ⁻¹	Pole powierzchni pików / Peak area 1657–1627 cm ⁻¹	Pole powierzchni pików / Peak area 1503–1415 cm ⁻¹
Bursztyn pochodzący z piaskowca twardego / Amber from hard sandstone	38,16	0,716	7,88
Bursztyn pochodzący z piaskowca średnio twardego / Amber from medium-hard sandstone	26,09	0,579	8,95
Bursztyn pochodzący z piaskowca miękkiego / Amber from soft sandstone	30,13	0,484	8,33

Przeprowadzone badania spektroskopowe FTIR nie wykazały istotnej zależności pomiędzy liczbą wiązań C=O oraz wiązań C–H a twardością piaskowca, z którego pozyskano bursztyn. Zaobserwowano natomiast wyraźny wzrost liczby wiązań C=C w badanych bursztynach wraz ze wzrostem twardości piaskowca.

Tab. 3. Wyznaczone metodą AFM wartości modułów Younga dla próbek bursztynów pobranych z różnych warstw serii złożowej (badania własne)

Tab. 3. Young's modulus measurement results determined by the AFM method for amber samples taken from different layers of the deposit series (own research)

Pomiar/ <i>Measurement</i>	Moduł Younga / <i>Young's modulus</i> (MPa)			
	strop/ <i>melt</i>			
	próbka nr 1 – barwa przezroczysta	próbka nr 2 – barwa przezroczysta	próbka nr 3 – barwa mleczna	próbka nr 4 – barwa mleczna
1	2682	2582	2842	2855
2	2791	2937	2897	2977
3	2980	3034	2947	3109
4	3119	3055	3027	3137
5	3125	3116	3686	3205
Średnia arytmetyczna	2939	2945	3080	3057
Średnia ze wszystkich pomiarów	2962,63			
Pomiar	Moduł Younga / <i>Young's modulus</i> (MPa)			
	środek/ <i>center</i>			
	próbka nr 3 – barwa przezroczysta	próbka nr 4 – barwa przezroczysta	próbka nr 1 – barwa mleczna	próbka nr 2 – barwa mleczna
1	2964	2532	2869	2793
2	3039	2535	2973	3138
3	3093	2724	2999	3145
4	3160	2737	3007	3153
5	3289	2742	3386	3438
Średnia arytmetyczna	3109	2654	3047	3133
Średnia ze wszystkich pomiarów	2985,80			
Pomiar	Moduł Younga / <i>Young's modulus</i> (MPa)			
	spąg/ <i>bottom</i>			
	próbka nr 1 – barwa przezroczysta	próbka nr 2 – barwa przezroczysta	próbka nr 3 – barwa przezroczysta	próbka nr 4 – barwa mleczna
1	2775	2320	2610	2732
2	2814	2668	3082	2899
3	2876	3005	3188	3085
4	2964	3153	3240	3149
5	3241	3290	3492	3226
Średnia arytmetyczna	2934	2887	3122	3018
Średnia ze wszystkich pomiarów	2990,45			

Przeprowadzone badania modułu Younga z wykorzystaniem mikroskopii sił atomowych AFM wykazały, że parametry sprężystości bursztynu lubelskiego zależą od położenia w serii złożowej. Badania wykazały subtelny wzrost wartości modułu Younga wraz z głębokością pobrania próbek. Najmniejszą wartość modułu Younga uzyskano dla próbek pobranych ze stropu (2962,63 MPa), natomiast największą dla próbek pobranych z najgłębszej warstwy profilu, czyli ze spągu. Wartość ta wyniosła 2990,45 MPa.

Tab. 4. Wyznaczone metodą AFM wyniki pomiarów modułu Younga dla próbek bursztynów pobranych z piaskowców o różnej twardości (badania własne)

Tab. 4. Young's modulus measurement results determined by the AFM method for amber samples taken from sandstones of different hardness (own research)

Pomiar/ <i>Measurement</i>	Moduł Younga / <i>Young's modulus</i> (MPa)		
	bursztyn pochodzący z piaskowca twardego / <i>amber from hard sandstone</i>	bursztyn pochodzący z piaskowca średnio twardego / <i>amber from medium-hard sandstone</i>	bursztyn pochodzący z piaskowca miękkiego / <i>amber from soft sandstone</i>
1	1646	1772	1957
2	1921	2040	2101
3	1958	2236	2152
Średnia arytmetyczna	1842	2016	2070

Najwyższą wartość modułu Younga spośród analizowanych próbek otrzymano dla bursztynu pozyskanego z piaskowca miękkiego (2070 MPa), natomiast najniższą dla bursztynu z piaskowca twardego (1842 MPa). Wraz ze wzrostem twardości osadu macierzystego zaobserwowano stopniową redukcję modułu sprężystości bursztynu, wynoszącą około 11% między skrajnymi przypadkami.

PODSUMOWANIE

Odsłonięcie profilu eoceńskich osadów bursztynonośnych w kopalniach rejonu Niedźwiady dało możliwość przeprowadzenia badań dla ściśle określonych pozycji bursztynu, piaskowców i glaukonitu, których charakterystyki mogą być użyteczne do odtwarzania ich paleośrodowiska sedymentacji, diagenety i epigenety.

Przeprowadzone badania petrograficzne, mineralogiczne, mikroskopowe i spektroskopowe miały na celu dokonanie kompleksowej charakterystyki glaukonitu, piaskowców i bursztynów uzyskanych bezpośrednio z osadów eoceńskich zawierających bursztyn z wyrobisk górniczych. Dokonano charakterystyki mikroskopowej i spektroskopowej bursztynów w zależności od ich położenia w profilu serii złożowej oraz w zależności od twardości piaskowca, z którego pozyskano bursztyn.

Mineralogia i geochemia glaukonitu, wykazująca wyraźną pionową dwudzielność, może być podstawą do właściwej oceny surowcowej i wykorzystania jego zasobów. Petrografia piaskowców, wynikająca z ich genezy, wydaje się odgrywać kluczową rolę w procesach ostatecznej diagenety lubelskiego bursztynu oraz w kształtowaniu właściwości geochemicznych i strukturalnych glaukonitu. Zarówno piaskowce, glaukonit, jak i bursztyn, wraz z ich charakterystyką fizykochemiczną, mogą stanowić cenne wskaźniki litofacjalne w analizie osadów

nadległych (miocen–plejstocen), a także w interpretacji znalezisk archeologicznych z obszaru Lubelszczyzny.

Uzyskane wyniki analiz mineralogicznych, petrograficznych i geochemicznych stanowią istotne tło interpretacyjne dla badań spektroskopowych FTIR oraz pomiarów nanomechanicznych, które pozwalają określić wpływ procesów diagenety i stopnia lityfikacji osadów na strukturę chemiczną oraz właściwości mechaniczne bursztynu lubelskiego.

Badania spektroskopowe wykonane techniką FTIR nie wykazały jednoznacznej zależności pomiędzy procesami depolimeryzacji bursztynu lubelskiego a jego położeniem w profilu serii złożowej. Szczegółowa analiza widm FTIR nie wykazała również istotnej korelacji między liczbą wiązań C=O oraz C–H a twardością piaskowca, z którego pochodzi bursztyn. Zaobserwowano natomiast wyraźną tendencję wzrostu liczby wiązań C=C w bursztynach wraz ze wzrostem twardości skały macierzystej, co może wskazywać na częściową degradację sieci polimerowej. Zwiększona zawartość wiązań C=C wskazuje na mniejszy stopień usieciowania struktury i potencjalnie niższą sprężystość bursztynu, przy jednoczesnym wzroście jego sztywności i kruchości. Uzyskane wartości modułów Younga dla bursztynów pobranych z piaskowców o różnej twardości wykazały uplastycznienie bursztynu lubelskiego zgodne z trendem stopnia lityfikacji piaskowców, co jest zbieżne z badaniami FTIR.

Wyznaczone metodą mikroskopii sił atomowych AFM parametry sprężystości bursztynu w zależności od położenia w profilu serii złożowej wykazały niewielki wzrost wartości modułu sprężystości wraz z głębokością pobrania próbek. Dodatkowo odnotowano niewielkie różnice związane z barwą bursztynu. Wyższe wartości modułu Younga uzyskano w przypadku odmian o zabarwieniu mlecznym, co może sugerować istotny wpływ tekstury i stopnia nasycenia pęcherzykami na parametry nanomechaniczne materiału.

Rozpoznanie charakterystyki mineralogicznej i petrograficznej osadów bursztynonosisnych w rejonie rodzącego się Zagłębia Lubelskiego Bursztynu wymaga dodatkowych badań z innych rejonów występowania eocenu na Lubelszczyźnie oraz badań porównawczych z innymi bursztynami bałtyckimi. Uzyskane charakterystyki bursztynu, szczególnie cechy nanomechaniczne, mogą stanowić wstęp do ustaleń rozpoznawalności bursztynu lubelskiego wśród innych bursztynów bałtyckich (sukcynitu).

BIBLIOGRAFIA

- Daszkiewicz, P., Tarkowski, R. (2009). *Pobyt i badania przyrodnicze Jeana-Etienne'a Guetarda w Rzeczypospolitej (1760–1762)*. Kraków: Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Pedagogicznego.
- Gazda, L. (red.). (2016). *Lubelski bursztyn. Znaleźiska, geologia złoża, perspektywy*. Kraków: Wydawnictwo M.
- Kosmowska-Ceranowicz, B., Vavra, N. (2015). *Atlas widm w podczerwieni żywic kopalnych, subfossilnych i niektórych imitacji bursztynu*. Warszawa: PAN Muzeum Ziemi w Warszawie.
- Kucharska, M., Krawczyk, M. (2021). *Szczegółowa mapa geologiczna Polski 1:50 000, ark. Lubartów (713)*. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny. [dokument elektroniczny]
- Kurp [Zagrzejewski, A.] (1873). W: *Encyklopedia rolnictwa i wiadomości związek z nimi mających*. T. 1. Warszawa.
- Mojski, J., Rzechowski, J., Woźny, E. (1966). Górny eocen w Luszawie nad Wieprzem k. Lubartowa. *Przegląd Geologiczny*, 14(12), 513–517.
- Silverstein, M., Webster, F.X., Kiemle, D.J. (2007). *Spektroskopowe metody identyfikacji związków organicznych*. Warszawa: PWN.
- Słodkowska, B., Kasiński, J., Żarski, M. (2022). Uwarunkowania stratygraficzno-środowiskowe występowania nagromadzeń złożowych bursztynu na północnej Lubelszczyźnie. *Przegląd Geologiczny*, 70(1), 50–60. DOI: <https://doi.org/10.7306/2022.3>
- Staszic, S. (1803/1931). *Dziennik podróży Stanisława Staszica*. Kraków: PAU.
- Strzelczyk, G., Danielewicz, B. (1990). *Dokumentacja geologiczna w kategorii C2 złoża kruszywa naturalnego (piaski budowlane) wraz z określeniem występowania bursztynu w utworach trzeciorzędowych w rejonie Górka Lubartowska*. 503/WA/SD. Warszawa: Przedsiębiorstwo Geologiczne POLGEOL, Narodowe Archiwum Geologiczne, Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy.
- Wagner-Wysiecka, E. (2018). Mid-Infrared Spectroscopy for Characterization of Baltic Amber (Succinite). *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 196, 418–431. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.02.053>
- Woźny, E. (1966). Eocen z Siemienia koło Parczewa. *Kwartalnik Geologiczny*, 10(3), 843–850.
- Żarski, M., Tekielska, A. (2019). *Szczegółowa mapa geologiczna Polski 1:50 000, ark. Leszkowice (677)*. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny. [dokument elektroniczny]

PUBLICATION INFO		
SUBMITTED: 2025.07.18	ACCEPTED: 2025.09.08	PUBLISHED ONLINE: 2025.09.30