

STRATYGRAFICZNE I PRZESTRZENNE ASPEKTY ZRÓŻNICOWANIA SKŁADU CHEMICZNEGO PÓŻNOPLEJSTOCENSKICH SEKWENCJI LESSOWO-GLEBOWYCH W POLSCE – PRZYKŁADY PROFILI W TYSZOWCACH I BIAŁYM KOŚCIELE

The stratigraphic and spatial aspects of the differentiation of the chemical composition of the Late Pleistocene loess-palaeosol sequences in Poland – a case study of the Tyszowce and Biały Kościół profiles

JACEK SKURZYŃSKI*, ZDZISŁAW JARY*, JERZY RACZYK*,
PIOTR MOSKA**, MARCIN KRAWCZYK*

Zarys treści. Artykuł prezentuje porównanie składu geochemicznego i stopnia zwietrzenia chemicznego dwóch późnoplejstocennych sekwencji lessowo-glebowych, zlokalizowanych w SE i SW Polsce. Analiza chemiczna w zakresie pierwiastków głównych (Si, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, Ti, P) oraz wyliczonych na ich podstawie wskaźników (CIA, Ti/Al, K/Al, Mg/Ca, K/Ca, Na/K oraz Si/Al) wykazała, że obie sekwencje są zróżnicowane zarówno w ujęciu stratygraficznym, jak i przestrzennym. Zmienność stratygraficzna związana jest ze zmianami paleoklimatu warunkującymi natężenie zarówno procesów lito-, jak i pedogenezy. Zmienność przestrzenna może wynikać m.in. z odmiennych warunków klimatycznych w trakcie tworzenia się sekwencji lessowo-glebowych, recyklingu lessów lub nawet odmiennego źródła materiału. Istotna może być też dysproporcja miąższości sekwencji, skutkująca zróżnicowanym wpływem infiltracji wód opadowych.

Słowa kluczowe: less, gleba kopalna, geochemia, wskaźniki wietrzeniowe, metoda chemostratygraficzna

Abstract. The article presents the comparison of the geochemical composition and the degree of chemical weathering between two Late Pleistocene loess-palaeosol sequences of SE and SW Poland. The results of major element (Si, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, Ti, P) and geochemical index (CIA, Ti/Al, K/Al, Mg/Ca, K/Ca, Na/K oraz Si/Al) analyses indicate stratigraphical and spatial differentiation between sequences. The stratigraphic differentiation is connected with palaeoclimatic conditions which control the intensity of pedogenesis. The spatial variability may be attributed to different climatic conditions during the deposition of loess, the loess recycling process, or even to different source areas. The disproportion between the thicknesses of the loess covers can also be important. It can affect the rainwater infiltration effect.

Keywords: loess, palaeosol, geochemistry, weathering indices, chemostratigraphic method

Wstęp

Sekwencje lessowo-glebowe zawierają jeden z najdokładniejszych lądowych zapisów zmian klimatycznych zachodzących w czwartorzędzie (np. Kukła 1970, 1975, 1977, 1987; Dodonov 2007; Porter 2007; Rousseau i in. 2007; Muhs 2013; Marković i in. 2015). Wyjątkowa przydatność lessu dla rekonstrukcji klimatycznych polega na tym, że cząstki pyłowe, z których jest zbudowany, deponowane są bezpośrednio z atmosfery (subaerialnie), zatem profile lessowe pośrednio od-

zwierciedlają zmiany niektórych elementów paleoklimatycznych w czasie geologicznym (Jary 2007; Muhs 2007, 2013).

Cechy środowiska i klimatu, w jakim powstawały sekwencje lessowo-glebowe, rekonstruowane są na podstawie różnorodnych danych pośrednich (ang. *proxy data*). Do tego celu najczęściej używa się gleb kopalnych, wskaźników zmienności składu granulometrycznego, właściwości magnetycznych, badań malakologicznych, palinologicznych i wielu innych, które w połączeniu z zastosowaniem metod datowania wieku (np. TL, OSL, ¹⁴C) umożliwiają dokonanie, okre-

* Uniwersytet Wrocławski, Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego, Pl. Uniwersytecki 1, 50-137 Wrocław; e-mail: jacek.skurzynski@uwr.edu.pl, zdzislaw.jary@uwr.edu.pl, jerzy.raczyk@uwr.edu.pl, marcin.krawczyk@uwr.edu.pl

** Politechnika Śląska, Instytut Fizyki – Centrum Naukowo Dydaktyczne, ul. Konarskiego 22B, 44-100 Gliwice; e-mail: piotr.moska@polsl.pl

ślonych w czasie geologicznym, rekonstrukcji klimatyczno-środowiskowych (np. Pye 1995; Muhs 2007, 2013).

W literaturze z zakresu paleogeografii coraz częściej publikowane są wyniki badań składu chemicznego lessów i śródlessowych gleb kopalnych różnej rangi stratygraficznej (np. Taylor i in. 1983; Pye, Johnson 1988; Gallet i in. 1996, 1998; Muhs, Bettis III 2000; Jahn i in. 2001; Muhs i in. 2001, 2003, 2008; Yang i in. 2004, 2006; Buggle i in. 2008, 201; Ujvari i in. 2008; Ahmad, Chandra 2013; Tugulan i in. 2016). Także w polskiej literaturze lessowej, choć w znacznie mniejszym stopniu, są stosowane analizy geochemiczne (np. Łukaszew, Mojski 1968; Maruszczak 1976; Dwucet, Śnieszko 1996; Dwucet 1999; Jary 2007; Łącka i in. 2007; Łanczont i in. 2015a, b; Raczyk i in. 2015). Cytowane prace jednoznacznie wskazują na wysoką rolę analiz geochemicznych w badaniach paleośrodowiskowych późnoplejstocenijskich lessów zarówno w ujęciu przestrzennym, jak i stratygraficznym (Jary 2007; Raczyk i in. 2015).

Skład chemiczny eolicznie deponowanego materiału lessowego jest silnie związany ze składem mineralogicznym obszarów źródłowych. Podlega jednak zmianom wskutek postdepozycyjnych procesów wietrzeniowo-glebowych – mobilne pierwiastki są redeponowane, co powoduje relatywne wzbogacenie w pierwiastki niemobilne (Buggle i in. 2011). Wraz ze wzrostem intensywności procesów glebowych wzrasta stopień zwietrzenia chemicznego (np. Kraus 1999), co upoważnia, w celu weryfikacji wydzielen stratygraficznych, do zastosowania wskaźników zwietrzenia chemicznego.

W pracy porównano rezultaty badań składu chemicznego dwóch sekwencji lessowo-glebowych zlokalizowanych w Tyszowcach (Grzęda Sokalska) i w Białym Kościele (Wzgórze Niemczańsko-Strzelińskie). Są to obecnie kluczowe profile lessów w Polsce, zawierające względnie pełną sekwencję późnoplejstocenijskich jednostek lito-pedostratygraficznych (Jary 2007). W pracy Raczyka i in. (2015) zwrócono uwagę na odrębność geochemiczną lessów polskich w stosunku do innych obszarów europejskiego pasa lessów. Rezultaty badań opierały się jednak na analizie tylko jednego profilu lessowego (Dankowice) położonego w obrębie Wzgórz Niemczańsko-Strzelińskich (Polska SW), około 3 km na zachód od stanowiska w Białym Kościele. Nie publikowano do tej pory prac dotyczących przestrzennego różnicowania składu chemicznego lessów w Polsce.

Charakterystyka stanowisk badawczych

Stanowiska badawcze Tyszowce i Białe Kościół zlokalizowane są na linii W–E w odległości około 500 km (rys. 1). Tak duża odległość dzieląca badane sekwencje lessowe pozwoli na odniesienie się do wcześniej zgłaszanych hipotez, że pokrywy lessowe odzwierciedlają współczesne i plejstocenijskie cechy klimatu Polski: kontynentalne na wschodzie i bardziej oceaniczne na zachodzie (Cegła 1972; Jersak 1973; Maruszczak 1991a; Jary 2007).

W celu przedstawienia lessowo-glebowych jednostek stratygraficznych przyjęto nazewnictwo wprowadzone pierwotnie dla lessów chińskich (Kukla, An 1989), w modyfikacji Marković'a i in. (2008, 2015). W obu profilach reprezentowane są sekwencje późnoplejstocenijskie, składające się z pięciu głównych jednostek lito-pedostratygraficznych: dwóch kopalnych pedokompleksów (S1 i L1SS1), dwóch jednostek lessowych (L1LL2 i L1LL1) oraz gleby współczesnej (S0) w stropie.

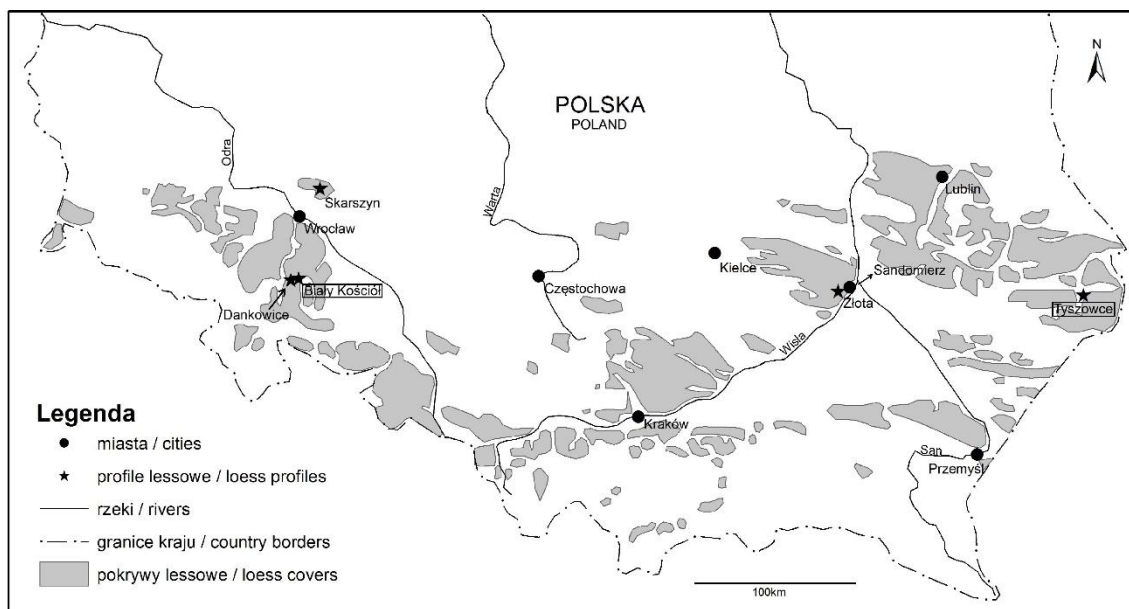
Pedokompleks S1 jest powszechnie korelowany z 5 morskim stadium izotopowym (*Marine Isotopic Stage* – MIS; Pisias i in. 1984; Martinson i in. 1987). W polskich schematach stratygraficznych gleba ta jest określana jako nietulisko I (Jersak 1973) lub Gi+GJ1 (Maruszczak 1991b). Lessy L1LL2 (MIS 4; dolny plenivistulian) odpowiadają lessom młodszym IIa (Jersak 1973) oraz lessom młodszym dolnym (LMd – Maruszczak 1991b). Gleba śródlessowa L1SS1 (MIS 3; środkowy plenivistulian) jest korelowana z glebą komorniki (Jersak 1973) oraz glebą Gi/LMd (Maruszczak 1991b), a lessy L1LL1 (MIS 2) deponowane w górnym pleniglacie ostatniego zlodowacenia należy korelować z lessem młodszym IIb (Jersak 1973) oraz lessem młodszym środkowym (LMs) i górnym (LMg; Maruszczak 1991b). Gleba S0 tożsama jest z glebą współczesną (Jersak 1973), czyli glebą GH (Maruszczak 1991b).

Tyszowce

Profil lessowy w Tyszowcach ($\lambda = 23^{\circ}42'45''$ E, $\phi = 50^{\circ}36'30''$ N) znajduje się w regionie lubelskim, w północnej części Grzędy Sokalskiej (Maruszczak 1991a). Grzęda Sokalska to skrajnie zachodni fragment Wyżyny Wołyńskiej (Maruszczak 1972; Kondracki 2002) będący równoleżnikowym garbem zbudowanym z utworów górnej kredy, przykrytym pokrywą lessową o miąższości 10–30 m. Od północy i południa ograniczona jest wyraź-

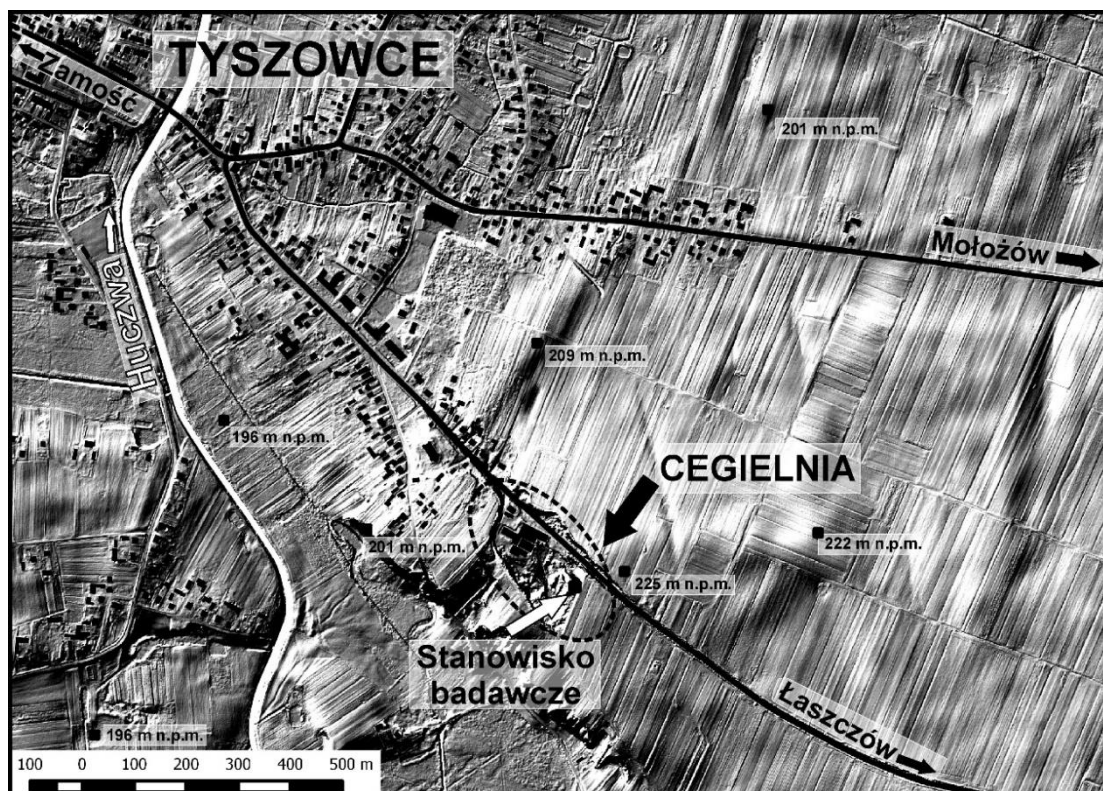
nymi krawędziami morfologicznymi o wysokości przekraczającej 10 m (Wojtanowicz, Buraczyński 1978). Profil lessowy w Tyszowcach zlokalizowano w wyrobisku czynnej cegielni na wysokości 226 m n.p.m., na skraju wierzchownicy lessowej tuż

przy zboczu doliny rzeki Huczwa, 30 m powyżej współczesnego jej dna (rys. 2). Miąższość pokrywy lessowej na obszarze cegielni lokalnie przekracza 20 m.



Rys. 1. Lokalizacja obszaru badań na tle polskich pokryw lessowych

Location of the research area against the background of loess covers in Poland



Rys. 2. Lokalizacja profilu lessowego w Tyszowcach

Location of the loess profile in Tyszowce

Lessy w Tyszowcach zostały po raz pierwszy opisane w pracy Maruszczaka (1974), który wyróżnił w profilu lessowym w Tyszowcach–Majdanie less młodszy górny (LMg) ze słabymi oznakami dwudzielności oraz sedymentem glebowym w spągu, less młodszy środkowy o cechach sedymentu glebowego oraz less młodszy dolny i najniższy z oznakami rozwoju procesów glebotwórczych. Poniżej cytowany autor udokumentował dobrze rozwiniętą glebę interglacialną z poziomami genetycznymi charakterystycznymi dla kopalnej gleby płowej. Gleba ta wytworzyła się na lessie piaszczystym.

Badania Maruszczaka (1974) uszczegółowili rok później Buraczyński i Wojtanowicz (1975), którzy wyróżnili w profilu dwie gleby kopalne rozdzielone i przykryte lessem. Młodszej, silnie oglejonej glebie genezy tundrowej przypisali rangę interstadialną. Starsza gleba, z bardzo dobrze wykształconym iluwium, została określona jako gleba rangi interglacialnej. W stropie tej gleby występował poziom próchniczny wykazujący ślady przemieszczenia i zaburzenia kriogeniczne w formie pseudomorfoz po sezonowym lodzie gruntowym.

W 2000 roku przeprowadzono szczegółowe badania litostratygraficzne późnoplejstoczeńskich lessów w cegielni w Tyszowcach, a ich rezultaty zostały opublikowane przez Jarego (2007). W sekwencji lessów wydzielono dwie główne fazy depozycji pyłu lessowego, które skorelowano z dolnym i górnym pleniglacjałem ostatniego zlodowacenia. Stwierdzono również sześć poziomów struktur peryglacialnych.

Nowy profil lessów w cegielni w Tyszowcach został przygotowany w listopadzie 2012 roku. Późnoplejstoczeńska sekwencja lessowo-glebova o wysokości 19 m została szczegółowo udokumentowana oraz opróbkowana w interwale co 5 cm. Przeprowadzone badania pozwoliły na stwierdzenie, że sekwencja lessowo-glebova w Tyszowcach zawiera prawdopodobnie jeden z najbardziej szczegółowych pośrednich zapisów zmian klimatyczno-środowiskowych w lessach polskich (Jary, Mroczek (red.) 2014; Jary i in. 2014; Moska i in. 2014). Dokładny opis lito-pedologiczny przedstawiono w pracy Moski i in. (2017).

W świetle przeprowadzonych badań (Jary, Mroczek (red.) 2014; Jary i in. 2014; Moska i in. 2014) późnoplejstoczeńska sekwencja lessowo-glebova w Tyszowcach jest zbudowana z pięciu jednostek lito-pedostratygraficznych: dwóch poligenetycznych kompleksów glebowych (S1

oraz L1SS1), dwóch jednostek lessowych (L1LL1 i L1LL2) oraz gleby współczesnej S0.

Pedokompleks S1 (korelowany z MIS 5) składa się z dwóch nałożonych na siebie czarnoziemowych poziomów humusowych (wczesny vistulian) oraz dobrze wykształconego, strukturalnego poziomu B utworzonego na pylasto-piaszczystym substracie (interglacjał eemski).

Dolna jednostka lessowa L1LL2 (MIS 4) jest w spągu wyraźnie smugowana (zawiera wkładki humusu) i oglejona. Jej cechy litologiczne wskazują na eoliczną depozycję oraz synchronicznie przebiegające procesy redepozycyjne po nachylonej powierzchni. Górna część lessów L1LL2 została przekształcona przez procesy glebowe związane z formowaniem się gleby kopalnej L1SS1. W lessach L1LL2 stwierdzono obecność pseudomorfoz klinów lodowych (Jary 2007, 2009), które są dowodem rozwoju i degradacji wieloletniej zmarzliny.

Gleba kopalna L1SS1 (MIS 3) rozdziela dwie główne fazy depozycji lessów w ostatnim glacjałe. W profilu Tyszowce jest reprezentowana przez słabo wykształcony horyzont typu *cambic* oraz 1–3 nałożone poziomy tundra-glejowe, zdeformowane przez procesy krioturbacji i geliflukcji.

Gleba kopalna L1SS1 w Tyszowcach przykryta jest bardzo miększym lessem L1LL1 (14 m), co jest dowodem niezwykle wysokiego tempa depozycji lessów w górnym plenivistulianie (MIS 2). W jednostce L1LL1 dominują litofacje lessów smugowanych i laminowanych – lessy masywne pojawiają się bardzo rzadko. W środkowej i górnej części powszechnie występują laminy piaszczyste, sugerujące krótkotrwałe epizody transportu materiału z pobliskiej doliny Huczwy. Dwie generacje różnowiekowych pseudomorfoz klinów lodowych wskazują na dwukrotny rozwój oraz degradację wieloletniej zmarzliny w trakcie sedymentacji lessów L1LL1.

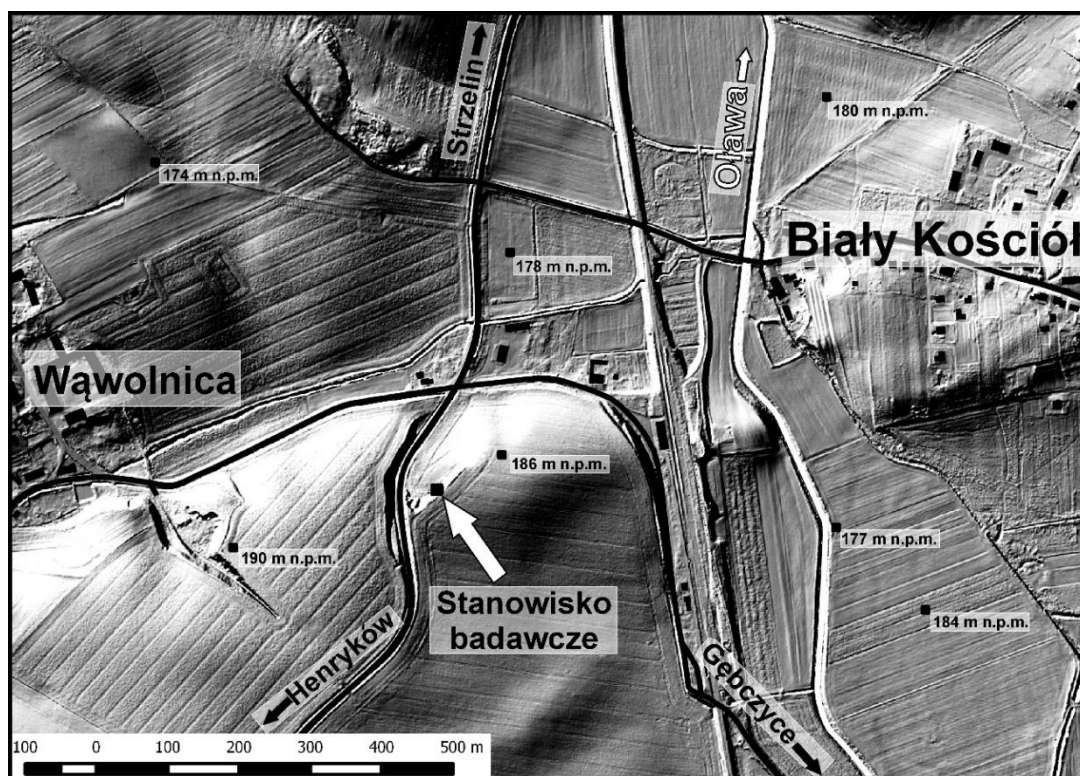
Biały Kościół

Odslonięcie lessów w Białym Kościele ($\lambda = 17^{\circ}01'30''$ E, $\phi = 50^{\circ}43'30''$ N, 185 m n.p.m.) położone jest w regionie dolnośląskim (Maruszczak 1991a), w obrębie Wzgórz Niemczańsko-Strzelińskich. Mezoregion ten stanowi wyżynną część Przedgórze Sudeckiego (Kondracki 2002) zbudowaną ze skał krystalicznych częściowo pokrytych pylastymi osadami genezy eolicznej. Lessy i osady lessopochodne występują tutaj w postaci nieciągłych pokryw o miąższości od

kilku do 12 m (Jary i in. 2002). Stanowisko badawcze znajduje się w nieczynnej gliniance na zboczu o ekspozycji północnej, u wylotu dolinki bezimiennego ciek do doliny Oławy w jej środkowym odcinku. Wyrobisko znajduje się w odległości 20–30 metrów od drogi łączącej Strzelin z Henrykowem (rys. 3).

Pełną sekwencję lessową profilu w Białym Kościele po raz pierwszy scharakteryzowano w pracy Ciszka i in. (2001). Rezultaty później-

szych multidyscyplinarnych badań zostały opublikowane w licznych publikacjach naukowych (Jary i in. 2002, 2004; Fedorowicz 2005, 2006; Jary 2007, 2009, 2010; Komar i in. 2009; Moska i in. 2011, 2012; Jary, Ciszek 2013). W świetle cytowanych prac sekwencja lessowo-glebova w Białym Kościele składa się z tych samych jednostek pedo- i litostratygaficznych co profil w Tyszowcach.



Rys. 3. Lokalizacja profilu lessowego w Białym Kościele

Location of the loess profile in Białym Kościół

Badania terenowe profilu lessowego w Białym Kościele ponowiono w 2008 roku. W pionowej ścianie 9-metrowego odsłonięcia ponownie zarejestrowano pełną sekwencję późnoplejstoceńskich osadów, składającą się z pięciu głównych jednostek. Dokładny opis litologiczny przedstawiono w pracy Jarego i in. (2014).

Poligenetyczny zespół gleb kopalnych S1 (MIS 5) w Białym Kościele składa się z mięszszego poziomu iluwalnego Bt, rozwiniętego na heterogenicznym piaszczysto-pyłowym substracie, poziomu eluwalnego Et i akumulacyjnego A. Ważnym markerem tej pedojednostki jest podpoziom przejściowy AE z nagromadzeniem węgielków drzewnych. W profilu zespołu gleb kopalnych można obserwować powierzchnie erozyjne i/lub deformacyjne świadczące o skom-

plikowanej historii rozwoju, zakończonej przekształceniem stropowych partii przez procesy glejowe i krioturbacyjne.

Powyżej jednostki S1 zalega około 1,5-metrowy poziom lessów L1LL2. Tak dobrze rozwinięta jednostka rzadko występuje w lessowych profilach południowo-zachodniej Polski (Jary 2007) – jest to charakterystyczną cechą sekwencji lessowej z Białego Kościoła. W jej stropie wykształciła się gleba (pedokompleks) L1SS1. W Białym Kościele jest ona zbudowana z nałożonych poziomów akumulacyjnych gleb glejowo-tundrowych, zalegających na zdegradowanym poziomie typu *cambic*. Strop gleby został zdeformowany przez procesy pęcznienia mrozowego i geliflukcji.

Powyżej gleby L1SS1 występuje rozbudowana jednostka lessowa L1LL1, wykazująca znaczne zróżnicowanie w profilu. Na uwagę zasługuje słabo zaznaczająca się gleba tundrowo-glejowa w spągowej części lessów L1LL1, poziomy deformacji peryglacialnych oraz kilka horyzontów inicjalnego oglejenia. Jary (2007) uważa, że są one dowodem nierównomiernego tempa depozycji lessu i zmiennych warunków klimatycznych w trakcie MIS 2. W stropie lessów L1LL1 wykształciła się współczesna gleba brunatna S0.

Material i metody badawcze

W trakcie prac terenowych starannie przygotowano wyczyszczone pionowe ściany, które opisano pod kątem sedimentologii i stratygrafii. Po wykonaniu opisu przystąpiono do poboru materiału. W obu przypadkach pionowy interwał próbkowania wynosił 5 cm, jednak do analizy składu chemicznego wytypowano tylko niektóre z próbek – liczbę oznaczeń zagęszczano w sąsiedztwie granic litologicznych. Dla profilu w Tyszowcach wykonano łącznie 85 oznaczeń, a dla Białego Kościoła – 48.

Skład chemiczny oznaczono zgodnie z metodą wprowadzoną do polskiej literatury lessowej przez Raczyka (Raczyk i in. 2015). Wytypowane do oznaczeń składu chemicznego próbki suszono w temperaturze 105°C przez okres 24 h. Roztarte w moździerz agatowym naważki suchego materiału (5 g) wyprażono w piecu muflowym (1000°C/1 h) w celu określenia straty prażenia (*loss on ignition* – LOI). Z każdej wyprażonej próbki, po ponownym roztarciu w moździerz agatowym, pobrano 250 mg materiału, zmieszano z topnikiem (czteroboran sodu) i umieszczono w platynowym tygielku. Tak przygotowany materiał stopiono w piecu muflowym (1000°C/5 min). W rezultacie, po ostudzeniu, otrzymano szkliste „pastylki”, które zalano 10% HCl w celu całkowitego rozpuszczenia. Powstałe roztwory zostały rozcieńczone wodą destylowaną do objętości 250 ml. Właściwa analiza składu chemicznego wykonana została metodą atomowej spektrometrii absorpcyjnej (AAS) – oznaczono w ten sposób sód (Na), potas (K), magnez (Mg), wapń (Ca), żelazo (Fe), mangan (Mn), glin (Al) oraz tytan (Ti). Fosfor (P) określony został kolorymetrycznie, po wcześniejszej mineralizacji w mineralizatorze mikrofalowym. Wszystkie otrzymane stężenia dla danej próbki przeliczono na tlenki, bez uwzględnienia składników lotnych. Krzemionki nie oznaczano, przyjmując, że stanowi dopełnienie do

100%. Oznaczenia zostały potwierdzone analizą certyfikowanych materiałów referencyjnych dla lessów, tj. ISE 934 oraz ISE 974, dostarczonych przez firmę Wepal. Autorzy nie mieli technicznej możliwości wykonania oznaczeń analitycznych zawartości CaO*, czyli wapnia (przeliczonego na tlenek wapnia) wyłącznie z minerałów krzemianowych, niezbędnego do wyliczenia wskaźnika CIA (*Chemical Index of Alteration*; Nesbitt, Young 1982) definiowanego równaniem $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] * 100$. CaO* oszacowano zatem zgodnie z metodą McLennan'a (1993).

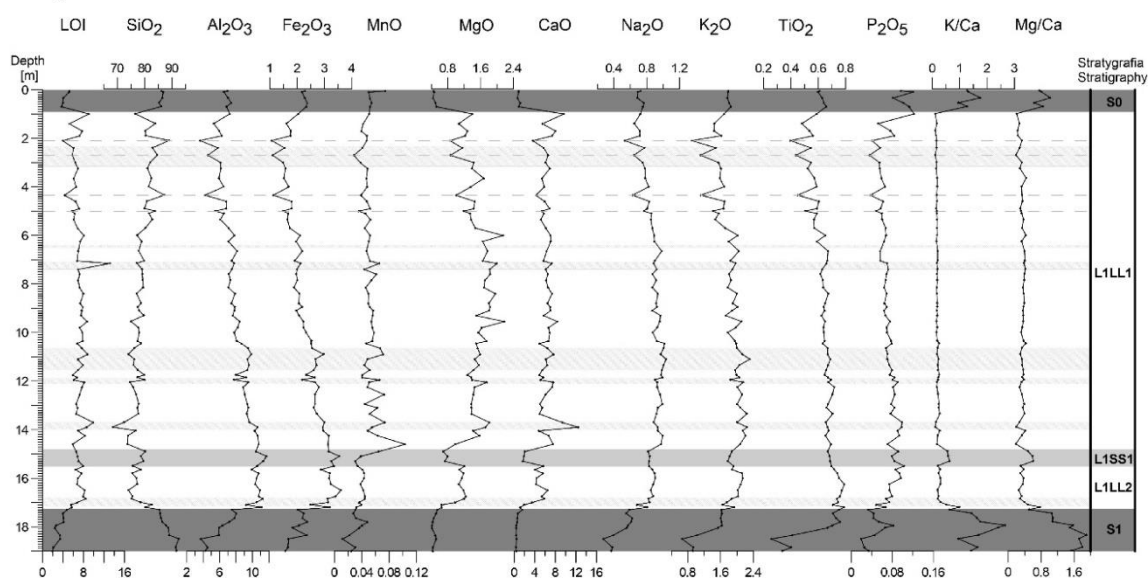
Wyniki oznaczeń składu chemicznego

Zmienność składu chemicznego w profilu pionowym przedstawiono na rys. 4 – dla ułatwienia przyjęto tę samą skalę. Wszystkie tlenki wyrażone są w procentach wagowych (wt%), bez straty prażenia (LOI). Dla lepszej percepcji głównych poziomów pedo- i litostratygraficznych dodano wykresy molowych stosunków K/Ca i Mg/Ca. Wartości pierwszego z nich wzrastają w glebach z powodu intensywnego rozpuszczania węglanów (np. Yang i in. 2004), drugiego zaś z powodu słabszego ługowania magnezu w stosunku do wapnia (Bokhorst i in. 2009). Pozostałe pochodne wskaźniki geochemiczne, wyliczone na podstawie oznaczonego analitycznie składu chemicznego, zaprezentowane zostaną w dalszej części pracy.

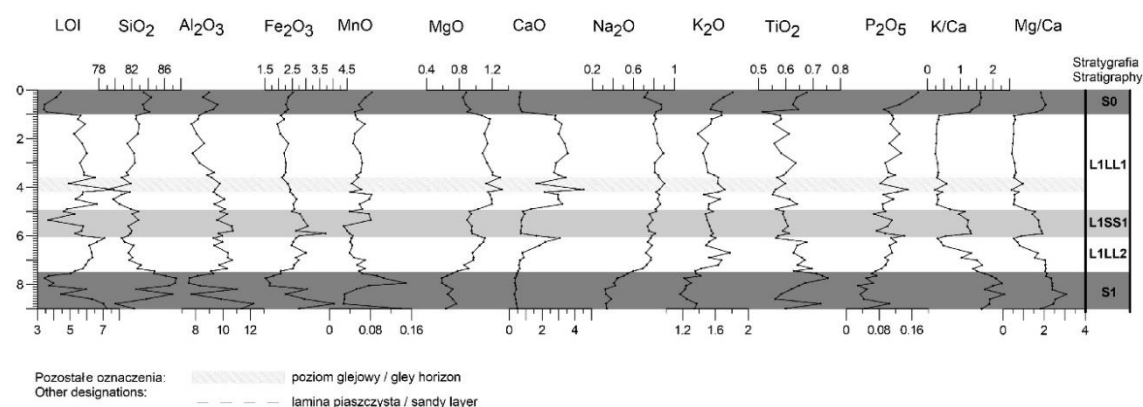
W tab. 1 przedstawiono przeciętne wartości oznaczanych pierwiastków (wyrażonych jako tlenki) oraz zakres ich zmienności w Tyszowcach (TYSZ) i Białym Kościele (BK). Na podstawie tych statystyk oraz zmienności przebiegu krzywych głębokościowych (rys. 4) możliwe było rozpozniowanie stratygraficzne na pięć jednostek lito- i pedostratygraficznych.

Gleba S0 charakteryzuje się bardzo silnym zubożeniem w wapń i magnez, w stosunku do lessów L1LL1, w których stropie się wykształciła. Jest to efekt wylugowania węglanów, powodujący również znaczne obniżenie wartości LOI. W obu sekwencjach obserwujemy wzrost krzemionki, do wartości porównywalnych tylko z glebą S1. Wzrasta też udział glinu, tytanu oraz fosforu. Ten ostatni osiąga w glebie S0 najwyższe wartości. W Białym Kościele, w stosunku do Tyszowców, gleba S0 jest mocno wzbogacona w glin, fosfor i magnez. Nieco więcej ma też sodu. Zawartość tytanu, manganu, żelaza i potasu jest zbliżona, znacznie mniej występuje krzemionki i wapnia.

A. Tyszowce



B. Biały Kościół



Rys. 4. Zmienność składu chemicznego sekwencji w Tyszowcach i Białym Kościele

The variability of the chemical composition of the sequences in Tyszowce and Biały Kościół

Lessy L1LL1 w obu sekwencjach cechują się najwyższą w profilu przeciętną zawartością wapnia i magnezu. W Tyszowcach udział tych mobilnych pierwiastków jest jednak znacznie wyższy niż w Białym Kościele, w którym obserwujemy znacznie więcej krzemionki, glinu i fosforu. Wraz z głębokością wzrasta udział glinu i żelaza. W sekwencji w Tyszowcach trend ten jest dużo lepiej widoczny. Jednostka L1LL1 jest silnie zróżnicowana pod względem litologicznym, co rzutuje na jej skład chemiczny. W Tyszowcach, na głębokościach 2,1, 2,7, 4,35 i 5,0 m występują laminy piaszczyste (rys. 4) – pobrane z nich próbki cechują się wyraźnym, skokowym obniżeniem zawartości wszystkich składników poza krzemionką. Wyraźnie zaznacza się również wpływ poziomów inicjalnych gleb glejowych (np. Biały Kościół na głębokości

od 3,6 do 4,2 m) i/lub deluwiów glebowych (np. Tyszowce od 13,5 do 14,6 m). W dolnej części lessów L1LL1 wzrasta udział glinu i żelaza, pojawiają się także silne wahania innych oznaczanych pierwiastków (rys. 4).

Gleba L1SS1 w obu sekwencjach od sąsiadujących jednostek różni się znacznym obniżeniem zawartości wapnia i magnezu, przy znacznym wzbogaceniu w glin i żelazo.

Lessy L1LL2 wykazują typowe dla poziomów lessowych wzbogacenie w wapń i magnez oraz charakterystyczny dla poziomów glebowych wysoki udział m.in. glinu. Jednostka łączy w sobie zatem cechy zarówno gleb, jak i lessów. Znamienny jest dla niej wzrost udziału tytanu, kontynuujący się aż do górnej części pedokompleksu S1.

Tabela 1

Przeciętne wartości i zakres zmienności pierwiastków w poziomach pedo- i litostratygraficznych profili w Tyszowcach i Białym Kościele

Mean values and ranges of the values of elements in pedo-litostratigraphic units in Tyszowce and Biały Kościół

	SiO₂ %	Al₂O₃ %	Fe₂O₃ %	MnO %	MgO %	CaO %	Na₂O %	K₂O %	TiO₂ %	P₂O₅ %	LOI	
S0	TYSZ	86,1 85,2-86,8	6,96 6,53-7,40	2,29 2,18-2,37	0,06 0,05-0,07	0,48 0,44-0,53	0,85 0,60-1,12	0,72 0,69-0,76	1,8 1,77-1,85	0,63 0,60-0,66	0,1 0,08-0,12	4,41 3,69-9,02
	BK	83,8 83,4-84,4	9,03 8,53-9,61	2,34 2,24-2,52	0,06 0,05-0,08	0,89 0,84-0,94	0,67 0,59-0,77	0,8 0,71-0,87	1,66 1,54-1,81	0,62 0,52-0,68	0,13 0,09-0,18	3,79 3,4-4,42
L1LL1	TYSZ	78,7 68,3-89,0	7,74 3,61-10,76	2,15 1,07-3,15	0,05 0,03-0,10	6,43 3,59-12,46	0,88 0,53-1,04	1,83 0,90-2,31	0,62 0,40-0,72	0,07 0,04-0,12	7,14 3,93-13,16	
	BK	81,5 79,0-82,9	8,94 7,71-10,15	2,3 1,95-2,65	0,06 0,04-0,08	1,16 1,03-1,32	2,91 1,31-4,52	0,84 0,8-0,9	1,56 1,38-1,71	0,59 0,55-0,64	0,11 0,08-0,15	5,8 4,79-7,64
L1SS1	TYSZ	78,5 75,7-80,2	11,01 10,42-11,72	3,32 3,15-3,55	0,04 0,03-0,06	0,85 0,69-1,21	2,8 1,67-5,63	0,83 0,82-0,83	1,84 1,78-1,91	0,68 0,67-0,70	0,09 0,08-0,10	7,07 6,46-7,93
	BK	82,1 81,6-82,8	10,09 9,58-10,72	2,91 2,49-3,7	0,05 0,03-0,08	0,95 0,89-1,03	0,9 0,7-1,64	0,78 0,74-0,82	1,53 1,48-1,57	0,59 0,57-0,61	0,1 0,07-0,14	5,14 3,63-5,79
L1LL2	TYSZ	77,4 74,1-82,6	10,52 9,24-11,26	3,14 2,48-3,60	0,04 0,03-0,04	1,04 0,65-1,24	4,23 1,16-6,47	0,84 0,68-0,90	1,95 1,64-2,14	0,75 0,71-0,79	0,08 0,05-0,10	7,02 5,52-8,39
	BK	82,2 80,8-84,8	9,91 9,13-10,68	2,57 2,09-2,99	0,05 0,04-0,07	0,97 0,78-1,11	1,24 0,53-3,07	0,73 0,6-0,78	1,55 1,35-1,77	0,64 0,56-0,7	0,1 0,07-0,12	6,18 5,29-7,08
S1	TYSZ	88,4 85,4-92,4	6,12 3,72-8,01	2 1,57-2,37	0,03 0,01-0,05	0,46 0,41-0,55	0,56 0,34-1,52	0,49 0,27-0,62	1,32 0,66-1,63	0,57 0,26-0,76	0,04 0,02-0,08	3,28 1,91-4,74
	BK	84,8 80,0-87,4	9,3 7,51-12,22	2,37 1,53-4,01	0,08 0,03-0,15	0,67 0,59-0,76	0,4 0,3-0,49	0,4 0,33-0,54	1,29 1,17-1,42	0,66 0,56-0,75	0,06 0,03-0,1	5,08 3,44-7,22

Gleba S1 charakteryzuje się największym przeciętnym udziałem krzemionki, co jest rezultatem zubożenia w pozostałe składniki chemiczne. W Białym Kościele stwierdzono dosyć wysoki jak na tę jednostkę, udział m.in. glinu, żelaza i tytanu. W Tyszowcach przeciętne zawartości wszystkich pierwiastków, poza krzemionką, były najniższe w profilu.

Bardzo ciekawie przedstawia się zróżnicowanie przeciętnych wartości wyliczonych dla całych sekwencji, bez rozróżniania poszczególnych jednostek (tab. 2). W obu przypadkach dominuje krzemionka, której średni udział jest znacznie wyższy od powszechnie przyjętych wartości referencyjnych, takich jak przeciętny

skład górnej skorupy kontynentalnej (UCC – *Upper Continental Crust*; Taylor, McLennan 1985) lub globalny przeciętny skład lessów (GAL – *Global Average Loess*; Ujvari i in. 2008). Wartości pozostałych pierwiastków głównych są zatem relatywnie niskie (tab. 2). Należy zaznaczyć, że wartości GAL wyliczone zostały na podstawie wyłącznie próbek lessów, podczas gdy przeciętne wartości dla Białego Kościoła i Tyszowców podano dla całej sekwencji, łącznie z glebami kopalnymi. Oznacza to, że biorąc pod uwagę wyłącznie jednostki lessowe, dysproporcja pomiędzy GAL a omawianymi stanowiskami badawczymi byłaby znacznie większa.

Tabela 2

Porównanie przeciętnego składu chemicznego w Tyszowcach i Białym Kościele z wartościami GAL i UCC

The comparison of the average chemical composition in the Tyszowce and Biały Kościół profiles with the GAL and UCC values

	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	TiO ₂ %	P ₂ O ₅ %
BK	82,66	9,38	2,46	0,06	0,96	1,55	0,71	1,51	0,62	0,10
TYSZ	80,13	7,99	2,31	0,05	1,24	4,98	0,82	1,78	0,63	0,07
GAL	70,71	11,74	3,75	0,07	2,15	6,67	1,68	2,22	0,71	0,14
UCC	66,00	15,20	5,00	0,08	2,20	4,20	3,90	3,40	0,50	0,40

Tyszowce charakteryzują się wysokim udziałem wapnia, wyższym od wartości UCC, przy stosunkowo niskim udziale glinu. Wyższy niż w Białym Kościele jest również przeciętny udział magnezu, sodu i potasu, przy niższym średnim udziale fosforu i żelaza. Zawartość tytanu w obu sekwencjach jest bardzo zbliżona.

Interpretacja

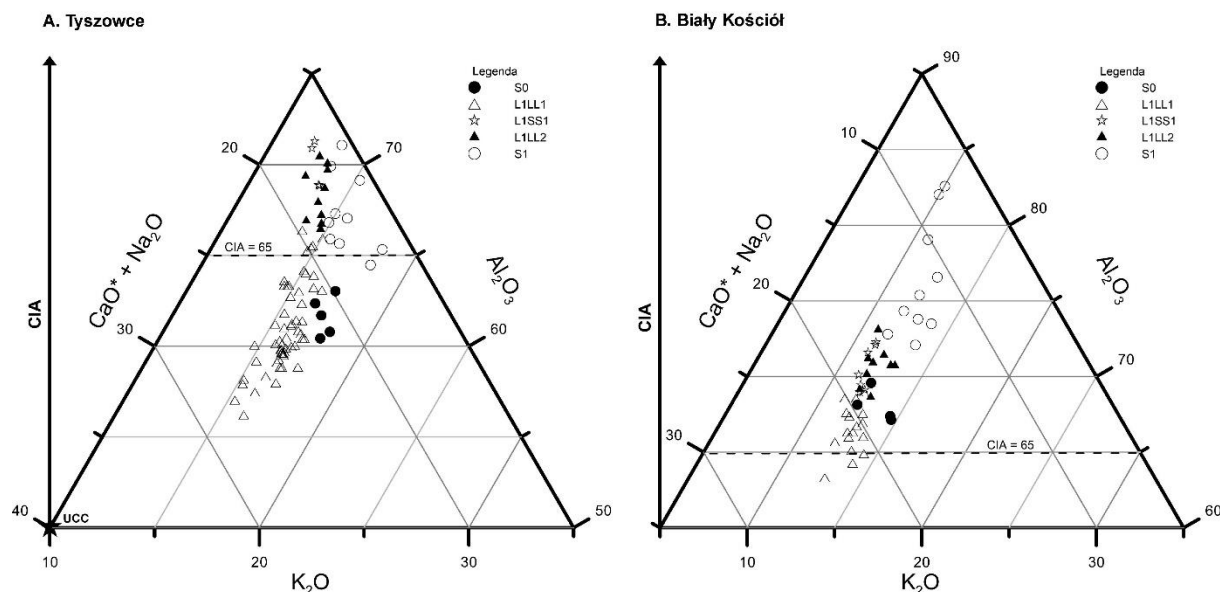
Sekwencje lessowo-glebowe w Białym Kościele i Tyszowcach pod względem geochemicznym wykazują wyraźne podobieństwo w jakościowym wykształceniu poszczególnych jednostek pedo- i litostratygaficznych. Mocno zaznaczają się jednak ilościowe różnice w zawartościach składników chemicznych. Biały Kościół zubożony jest w mobilne pierwiastki (np. wapń), przy wzbogaceniu w pierwiastki niemobilne (np. glin). Zdaniem Buggle i in. (2011) wskazuje to na typowy efekt działania postdepozycyjnych procesów wietrzeniowo-glebowych. Różnice w przeciętnym składzie chemicznym już na etapie wstępnej analizy mogą sugerować, że procesy glebotwórcze w Białym Kościele były inten-

sywniejsze niż w Tyszowcach. Wraz ze wzrostem intensywności procesów glebowych rośnie stopień zwietrzenia chemicznego (np. Kraus 1999), który najczęściej jest określany ilościowo za pomocą wskaźnika CIA. Zmienność stopnia zwietrzenia chemicznego, wyrażonego wskaźnikiem CIA, przedstawiono graficznie na trójkątnych diagramach A-CN-K (rys. 5; Nesbitt, Young 1984). Wartości CIA wzrastają zgodnie z opisem osi Al₂O₃. Zaznaczono dodatkowo wartość CIA=65, stanowiącą przyjętą granicę pomiędzy utworami słabo i średnio zwietrzalymi chemicznie (np. Song i in. 2014).

W świetle przeprowadzonych badań sekwencja w Tyszowcach jest wyraźnie dwudzielna. Glebę S0 oraz większość lessów L1LL1 (do głębokości 13,5 m) można zaklasyfikować do utworów słabo zwietrzalnych chemicznie (CIA<65). Najniższą część lessów L1LL1, opisaną w terenie jako deluwia glebowe (13,5–14,6 m), oraz pozostałą część profilu zaliczyć należy do umiarkowanego stopnia zwietrzenia chemicznego. W poziomie humusowym gleby L1SS1 stwierdzono najwyższe wartości CIA – około 71. Stopień zwietrzenia gleby S1 prawdo-

podobnie jest zaniżony ze względu na duże domieszki lokalnego materiału piaszczystego, który może wpływać na wartości CIA (np. Nesbitt, Young 1982; Shao i in. 2012). W Białym Kościele praktycznie cała sekwencja cechuje się średnim stopniem zwietrzenia chemicznego ($CIA > 65$). Na wykresach A-CN-K dla obu sekwencji (rys. 5) widać wyraźnie zróżnicowanie na poszczególne jednostki. Punkty odpowiadające glebie S1 tworzą odrębną chmurę, co wskazuje na odmienny

materiał źródłowy. Lessy L1LL2 i gleba L1SS1 cechują się podobnym stopniem zwietrzenia chemicznego. Najslabiej zwietrzałe są lessy L1LL1. Jak pokazały badania Kemp'a (2001), Jeong'a i in. (2008) i Mrocza (2013) nawet „świeże” lessy ulegają bioturbacji i słabemu wietrzeniu po depozycji, mogą zawierać cząstki erodowane i przemieszczone ze starszych gleb. Jest to dobrze widoczne w poziomach deluwii.



Rys. 5. Stopień zwietrzenia chemicznego (CIA) sekwencji w Tyszowcach i Białym Kościele

The chemical weathering degree (CIA) of the sequences in Tyszowce and Biały Kościół

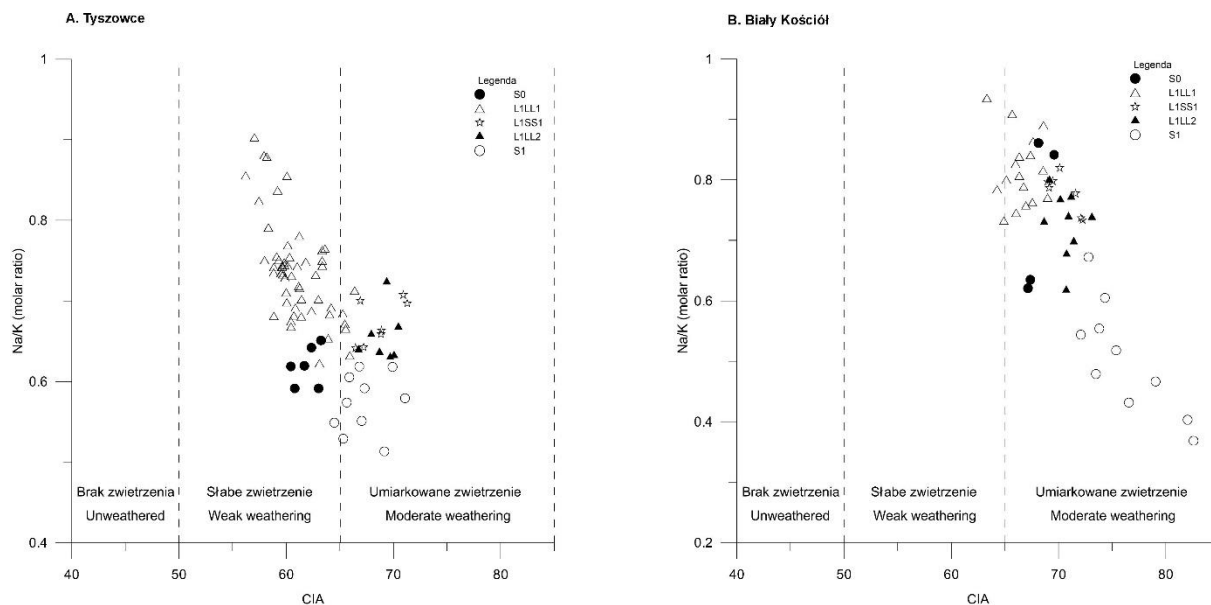
Stopień zwietrzenia chemicznego oparty na CIA dla potwierdzenia zestawiono z molowym stosunkiem Na/K (rys. 6), który również może być stosowany jako wskaźnik zwietrzenia osadów (Chen i in. 2008; Song i in. 2014). Bogate w sód plagioklasy są o wiele bardziej podatne na wietrzenie niż zasobne w potas skalenie potasowe, dlatego stosunek Na/K jest odwrotnie proporcjonalny do stopnia zwietrzenia chemicznego (Chen i in. 2008). W Tyszowcach korelacja pomiędzy Na/K a CIA wyniosła $-0,64$ a w Białym Kościele $-0,84$. Najważniejszą różnicą pomiędzy zastosowanymi wskaźnikami jest stopień zwietrzenia gleby współczesnej. Bazując na CIA, przyjętą należy, że gleba współczesna wykazuje znacznie mniejsze zwietrzenie od pozostałych jednostek glebowych, podczas gdy według Na/K jest prawie tak mocno zwietrzała, jak pedokompleks S1.

Na podstawie dwóch wskaźników zwietrzenia chemicznego wykazano, że sekwencja lessowo-glebova w Białym Kościele jest bardziej

zwietrzała chemicznie niż profil w Tyszowcach. Zależność tę spełniają nawet lessy L1LL1, najlepiej odzwierciedlające charakter materiału źródłowego. Przyjmuje się, że CIA w zakresie 50–65 odpowiada słabemu zwietrzeniu chemicznemu w chłodnym i suchym klimacie, a wartości 65–85 reprezentują ciepłe i wilgotne warunki paleoklimatyczne (np. Song i in. 2014). Nie jest oczywiście możliwe, aby jednostki lessowe kształtowały się w warunkach ciepłego i wilgotnego klimatu. Możliwe jednak, że większe zwietrzenie chemiczne stanowi wypadkową nieco łagodniejszego klimatu i tzw. recyklingu materiału lessowego (van Loon 2006). Nawet lessy L1LL1 mogą być częściowo zbudowane ze starszego, pochodzącego ze zniszczonych pokryw lessowych, materiału (Mroczek 2013), który mógł być transportowany w kierunku wschodnim razem ze świeżym materiałem, co skutkować mogłoby wyższymi wartościami CIA w lessach L1LL1 Białego Kościoła. Przy takim założeniu mniejsze przeciętne zwietrzenie less-

sów L1LL1 w Tyszowcach byłyby wynikiem lokalizacji bliżej obszaru źródłowego, co ograniczałoby modyfikację składu chemicznego wynikającą z domieszki starszego materiału. Założenie takie mogłoby znaleźć potwierdzenie w różnicach przeciętnych wartości molowego stosunku $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Wskaźnik ten maleje wraz ze wzrostem odległości od obszaru źródłowego

(Guan i in. 2016). Mają na to wpływ dwa czynniki: niewielka mobilność krzemionki i glinu w trakcie pedogenezy oraz efekt wysortowania granulometrycznego – w grubszych frakcjach dominuje krzemionka, a w drobnych glin (Hao i in. 2010; Guan i in. 2016). W Tyszowcach przeciętna wartość Si/Al w lessach L1LL1 wyniosła 18,4 a w Białym Kościele 15,8.



Rys. 6. Stopień zwietrzenia chemicznego (Na/K vs CIA) sekwencji w Tyszowcach i Białym Kościele
The chemical weathering degree (Na/K vs CIA) of the sequences in Tyszowce and Biały Kościół

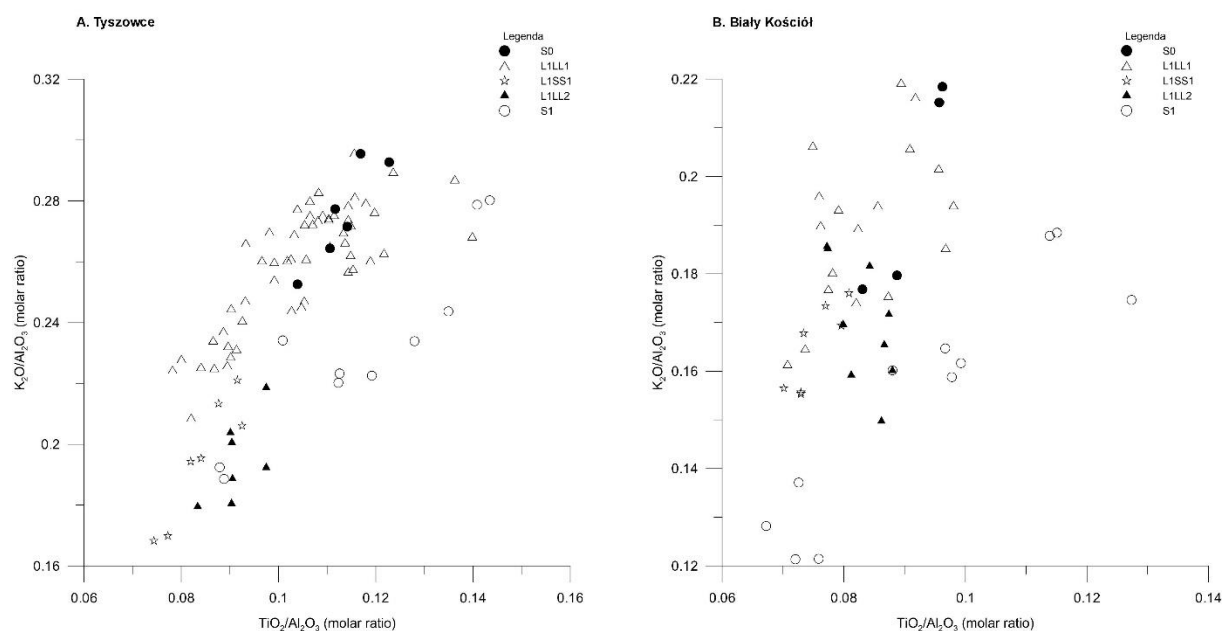
Interpretacja taka wymagałaby jednak założenia względnej homogeniczności materiału macierzystego. Dobrym wskaźnikiem hetero- lub homogeniczności obszarów źródłowych pyłu lessowego może być molowy stosunek Ti/Al, ponieważ powinien być nieczuły na postdepozycyjne procesy wietrzenia chemicznego (Hao i in. 2010) w pH zbliżonym do neutralnego (Sheldon 2006). Tytan i glin są najbardziej niemobilne spośród wszystkich pierwiastków głównych (Broecker, Peng 1982). Wskaźnik Ti/Al często zestawia się z molowym stosunkiem K/Al (Cox i in. 1995), który może być dobrym wskaźnikiem zwietrzenia chemicznego – w Tyszowcach korelacja z CIA wyniosła -0,91 a w Białym Kościele -0,86. Stosunek K/Al ponadto jest często używany jako wyznacznik chemicznej dojrzałości osadu, ponieważ jego wartości różnią się znacznie dla wybranych grup minerałów – powyżej wartości 0,3 dominują skalenie, a poniżej minerały ilaste (Cox i in. 1995; Peng i in. 2016). Wykres K/Al vs Ti/Al (rys. 7) uznaje się za przydatny przy próbach identyfikacji pochodzenia osadów (Peng i in. 2016). W tym przy-

padku zastosowano go w celu wykrycia ewentualnej współzależności pomiędzy stopniem zwietrzenia chemicznego a względnym udziałem niemobilnych pierwiastków – w określonych sytuacjach nawet niemobilne pierwiastki mogą być w pewnym stopniu włączane we wtórne produkty pedogenezy (Taboada i in. 2006).

Wykazano, że w Tyszowcach, i w nieco mniejszym stopniu w Białym Kościele, zaznacza się spadek wartości Ti/Al wraz ze spadkiem wartości K/Al (tj. wzrostem stopnia zwietrzenia chemicznego). Oznacza to, że nawet tytan i glin uległy mobilizacji w skali profilu, co uniemożliwia rozważania na temat homo- lub heterogeniczności obszarów źródłowych. Stwierdzić można jedynie, że w rozpatrywanych sekwencjach lessowo-glebowych zbliżony jest zakres wartości Ti/Al, co mogłoby ewentualnie sugerować wspólny obszar źródłowy (lub obszary źródłowe). Wartości K/Al również mieszczą się w wąskim zakresie – w Tyszowcach od 0,168 do 0,296 (średnia 0,247), a w Białym Kościele od 0,121 do 0,219 (średnia 0,176) i w obu badanych sekwencjach wyraźnie wskazują przewagę mine-

rałów ilastych nad minerałami potasowymi (np. skaleniami potasowymi lub łyśczykami). W żadnym wypadku na obecnym etapie badań nie można jednak w wiarygodny sposób wnioskować nie tylko o lokalizacji obszaru badań, ale nawet o jego homogeniczności. Nie można wy-

kluczyć istnienia całkowicie odmiennych obszarów źródłowych dla rozpatrywanych sekwencji. W przypadku przyjęcia takiej interpretacji różnice składu chemicznego i stopnia zwietrzenia chemicznego mogłyby wynikać z różnic tych parametrów na obszarach źródłowych.



Rys. 7. Wykres K/Al vs Ti/Al sekwencji w Tyszowcach i Białym Kościele

The scatter diagram K/Al vs Ti/Al of the sequences in Tyszowce and Biały Kościół

Kolejną możliwą przyczyną różnic w składzie chemicznym i stopniu zwietrzenia chemicznego jest zróżnicowane tempo depozycji lessów. Skoro obie sekwencje tworzyły się w tym samym czasie, w ciągu ostatniego cyklu interglacialno-glacialnego, to mniejsza miąższość wynikać powinna ze słabszej dostawy materiału. Sekwencja lessowo-glebowa jest bezpośrednio infiltrowana przez wody opadowe (Skurzyński i in. 2017) modyfikujące skład chemiczny wskutek interakcji woda-skała. Zasięg infiltracji w lessach, m.in. w zależności od cech litologicznych osadu i wielkości opadu atmosferycznego, według różnych autorów waha się od 2 do 5 m (np. Tu i in. 2009; Zeng i in. 2016). Ponadto woda, ze względu na powszechne w lessach spękania, może być dosyć szybko transportowana bezpośrednio w głębsze partie profilu (Derbyshire 2001). Możliwe jest zatem, że skład chemiczny 9-metrowej sekwencji w Białym Kościele został bardziej zmodyfikowany wskutek infiltracji niż 19-metrowa sekwencja w Tyszowcach. Pomijając nawet infiltrację, większe tempo depozycji materiału skutkujące większą miąższością lessów L1LL1 skracало zapewne czas eks-

pozycji deponowanego materiału na zmienne warunki atmosferyczne, co również może się przejawiać większym udziałem świeżego materiału zasobnego w mobilne pierwiastki.

Podsumowanie

Przedstawione rezultaty badań wykazały stratygraficzne i przestrzenne zróżnicowanie składu chemicznego i stopnia zwietrzenia sekwencji lessowo-glebowych reprezentujących dwa skrajnie położone obszary lessowe w Polsce. W obu sekwencjach metoda chemostratygraficzna potwierdziła i uzupełniła wcześniejszą interpretację lito-pedostratygraficzną, wskazującą na istnienie pięciu podstawowych jednostek lessowo-glebowych. Jednostki te pod względem składu chemicznego wykazują wiele charakterystycznych cech wspólnych, pozwalających na korelację między profilami. Oznacza to, że uzasadnione mogą być analizy porównawcze składu chemicznego dwóch oddalonych od siebie sekwencji lessowo-glebowych.

Istotnym wskaźnikiem różnicującym profile w Tyszowcach i Białym Kościele wydaje się ilościowy charakter zmian składu chemicznego. W Białym Kościele udział pierwiastków związanych z przekształceniami pedogenetycznymi jest znacznie wyższy niż w Tyszowcach, które charakteryzują się wysokim udziałem pierwiastków mobilnych. Przekłada się to na większe zwietrzenie chemiczne sekwencji w Białym Kościele – wskaźnik CIA osiąga wartości typowe dla umiarkowanego wietrzenia chemicznego w ciepłym i wilgotnym klimacie. Jednostki lessowe, w odróżnieniu od gleb, nie mogły jednak kształtować się w warunkach ciepłego i wilgotnego klimatu. Ich wyższy stopień zwietrzenia w Białym Kościele może być związany ze zjawiskiem recyklingu lessów, skutkującym wymieszaniem materiału o różnym stopniu zwietrzenia chemicznego. Interpretacja taka wymagałaby założenia wspólnego obszaru alimentacyjnego i transportu ze wschodu na zachód.

Analiza nie pozwoliła na wiarygodne i pewne wnioskowanie na temat obszarów źródłowych pyłu lessowego, ze względu na dość silną pozytywną korelację udziału niemobilnych pierwiastków ze stopniem zwietrzenia chemicznego. Nawet tytan i glin zostały włączone we wtórne produkty pedogenezy. Nie można również wykluczyć odmiennego źródła (lub źródeł) materiału budującego rozpatrywane sekwencje lub że wyższy stopień zwietrzenia chemicznego wynika po prostu z mniejszej miąższości lessów w Białym Kościele. Mniejsze tempo depozycji mogłoby skutkować istotniejszym przeobrażeniem deponowanego materiału ze względu na dłuższą ekspozycję na zmienne warunki atmosferyczne, infiltrację wód opadowych etc.

Badania zrealizowano w ramach projektu Narodowego Centrum Nauki nr 2011/01/D/ST10/06049 pt. „Ustalenie chronologii powstania późno-plejstoceńskiej pokrywy lessowej na obszarze Polski na podstawie datowania luminescencyjnego wysokiej rozdzielczości oraz badań lito-pedologicznych wybranych sekwencji lessowo-glebowych” oraz funduszy przeznaczonych na działalność statutową 1015/S/IGiRR/2017 Uniwersytetu Wrocławskiego.

Literatura

Ahmad I., Chandra R. 2013. Geochemistry of loess-paleosol sediments of Kashmir Valley, India: Provenance and weathering. *Journal of Asian Earth Sciences* 66: 73-89.

- Bokhorst M., Beets C., Marković S., Gerasimenko N., Matviishina Z., Frechen M. 2009. Pedochemical climate proxies in Late Pleistocene Serbian-Ukrainian loess sequences. *Quaternary International* 198: 113-123.
- Broecker W., Peng T. 1982. Tracers in the Sea. Eldigio Press, New York.
- Buggle B., Glaser B., Hambach U., Gerasimenko N., Marković S. 2011. An evaluation of geochemical weathering indices in loess-paleosol studies. *Quaternary International* 240: 12-21.
- Buggle B., Glaser B., Zoller L., Hambach U., Marković S., Glaser I., Gerasimenko N. 2008. Geochemical characterization and origin of Southeastern and Eastern European loesses (Serbia, Romania, Ukraine). *Quaternary Science Reviews* 27: 1058-1075.
- Buraczyński J., Wojtanowicz J. 1975. Nowe profile lessowe Grzędy Sokalskiej. *Annales UMCS, sec. B*, 28: 1-37.
- Cegła J. 1972. Sedymentacja lessów Polski. *Acta Universitatis Wratislaviensis* 168, *Studia Geograficzne* 17: 1-72.
- Chen Y., Li X., Han Z., Yang S., Wang Y., Yang D. 2008. Chemical weathering intensity and element migration features of the Xiashu loess profile in Zhenjiang, Jiangsu Province. *Journal of Geographical Sciences* 18: 341-352.
- Ciszek D., Jary Z., Kida J., Karamański P. 2001. Profil lessowy w Białym Kościele (Wzgórza Niemczańsko-Strzelińskie). W: Z. Jary, J. Kida (red.) *Osady plejstoceńskie przedpola Sudetów, XI Seminarium „Korelacja stratygraficzna lessów i utworów lodowcowych Polski i Ukrainy”*, Wrocław-Jarnołtówek 23-28.IX.2001. Instytut Geograficzny UW: 58-60.
- Cox R., Lowe D., Cullers R. 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59,14: 2919-2940.
- Derbyshire E. 2001. Geological hazards in loess terrain, with particular reference to the loess regions of China. *Earth-Science Reviews* 54: 231-260.
- Dodonov A.E. 2007. Loess records - Central Asia. W: S. Elias (red.) *The Encyclopedia of Quaternary Sciences*. Elsevier, Amsterdam:1418-1429.
- Dwucet K. 1999. Litogeneza górnego lessu vistuliańskiego na Wyżynach Polskich i na Nizinie Śląskiej. *Prace Naukowe Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach* 1792:1-163.
- Dwucet K., Śnieszko Z. 1996. Neopleistocene loess cover evolution: an example from the Odonów sedimentary succession (Southern Poland). *Biuletyn Peryglacjalny* 35: 7-43.
- Fedorowicz S. 2005. Korelacja dat TL i OSL próbek z czterech profili lessowych Polski SE i SW. *Przełąd Geologiczny* 53,11: 1047-1050.

- Fedorowicz S. 2006. Metodyczne aspekty luminescencyjnego oznaczania wieku osadów neoplejstocenijskich Europy Środkowej. Wyd. Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk: 1-156.
- Gallet S., Jahn B.M., Torii M. 1996. Geochemical characterization of the Luochuan loess-paleosol sequence, China, and paleoclimatic implications. *Chemical Geology* 133: 67-88.
- Gallet S., Jahn B.M., Van Vliet-Lanoë B., Dia A., Rossello E. 1998. Loess geochemistry and its implications for particle origin and composition of the upper continental crust. *Earth and Planetary Science Letters* 156: 157-172.
- Guan H., Zhu C., Zhu T., Wu L., Li Y. 2016. Grain size, magnetic susceptibility and geochemical characteristics of the loess in the Chaohu lake basin: Implications for the origin, paleoclimatic change and provenance. *Journal of Asian Earth Sciences* 117: 170-183.
- Hao Q., Guo Z., Qiao Y., Xu B., Oldfield F. 2010. Geochemical evidence for the provenance of middle Pleistocene loess deposits in southern China. *Quaternary Science Reviews* 29: 3317-3326.
- Jahn B.M., Gallet S., Han J. 2001. Geochemistry of the Xining, Xifeng and Jixian sections, Loess Plateau of China: eolian dust provenance and paleosol evolution during the last 140 ka. *Chemical Geology* 178: 71-94.
- Jary Z. 2007. Zapis zmian klimatu w górnoplejstocenijskich sekwencjach lessowo-glebowych w Polsce i w zachodniej części Ukrainy. *Rozprawy Naukowe Instytutu Geografii i Rozwoju Regionalnego Uniwersytetu Wrocławskiego* 1, Wrocław: 1-136.
- Jary Z. 2009. Periglacial markers within the Late Pleistocene loess-paleosol sequences in Poland and western part of Ukraine. *Quaternary International* 198: 124-135.
- Jary Z. 2010. Loess-soil sequences as a source of climatic proxies: an example from SW Poland. *Geologija* 52,1-4 (69-72): 40-45.
- Jary Z., Ciszek D. 2013. Late Pleistocene loess-paleosol sequences in Poland and western Ukraine. *Quaternary International* 296: 37-50.
- Jary Z., Mroczek P. (red.) 2014. Kukla LOESSFEST '14 - 7th Loess Seminar in Wrocław, International Conference on Loess Research in memoriam of George Kukla, September 8-15 2014. Abstracts and field guidebook. Institute of Geography and Regional Development, University of Wrocław: 1-84.
- Jary Z., Ciszek D., Kida J. 2004. Zmiany klimatu zapisane w uziarnieniu lessów Przedgórze Sudeckiego. W: A. Kostrzewski (red.) *Geneza, litologia i stratygrafia utworów czwartorzędowych*. t. IV, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań: 137-157.
- Jary Z., Ciszek D., Raczyk J., Moska P., Karamański P., Kida J., Korabiewski B. 2014. Biały Kościół: the key loess section of the Niemcza-Strzelin Hills. W: Z. Jary, P. Mroczek (red.) *Kukla LOESSFEST '14 - 7th Loess Seminar in Wrocław*. International Conference on Loess Research in memoriam of George Kukla, September 8-15 2014. Abstracts and field guide book. Institute of Geography and Regional Development, University of Wrocław: 43-46.
- Jary Z., Kida J., Śnihur M. 2002. Lessy i osady lessopochodne w południowo-zachodniej Polsce. *Czasopismo Geograficzne* 73,1-2: 63-100.
- Jary Z., Mroczek P., Moska P., Ciszek D., Raczyk J., Skurzyński J., Krawczyk M., Korabiewski B., Seul C. 2014. Tyszowce loess section: the huge L1L1 loess accumulation and three generations of ice wedge casts. W: Z. Jary, P. Mroczek (red.) *Kukla LOESSFEST '14 - 7th Loess Seminar in Wrocław*. International Conference on Loess Research in memoriam of George Kukla, September 8-15 2014. Abstracts and field guidebook. Institute of Geography and Regional Development, University of Wrocław: 68-69.
- Jeong G., Hillier S., Kemp R. 2008. Quantitative bulk and single-particle mineralogy of a thick Chinese loess-paleosol section: implications for loess provenance and weathering. *Quaternary Science Reviews* 27: 1271-1287.
- Jersak J. 1973. Litologia i stratygrafia lessu wyżyn południowej Polski. *Acta Geographica Lodziensia* 32: 1-142.
- Kemp R.A. 2001. Pedogenic modification of loess: significance for palaeoclimatic reconstructions. *Earth-Science Reviews* 54: 145-156.
- Komar M., Łanczont M., Madeyska T. 2009. Spatial vegetation patterns based on palynological records in the loess area between the Dnieper and Odra Rivers during the last interglacial-glacial cycle. *Quaternary International* 198: 152-172.
- Kondracki J. 2002. Geografia regionalna Polski. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa.
- Kraus M. 1999. Paleosols in clastic sedimentary rocks: their geologic applications. *Earth-Science Reviews* 47: 41-70.
- Kukla G. 1970. Correlation between loesses and deep-sea sediments. *Geologiske Foreningens Foerhandlingar* 92: 148-180.
- Kukla G. 1975. Loess Stratigraphy of Central Europe. W: K.W. Butzer G. Isaac (red.) *After the Australopithecines*. Mouton Publishers, The Hague: 99-188.
- Kukla G. 1977. Pleistocene Land-Sea Correlations I. Europe. *Earth-Science Reviews* 13: 307-374.
- Kukla G. 1987. Loess stratigraphy in central China. *Quaternary Science Reviews* 6: 191-219.
- Kukla G., An S. 1989. Loess stratigraphy in central China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 72: 203-225.

- Łącka B., Łanczont M., Madeyska T., Bogucki A. 2007. Geochemical composition of Vistulian loess and micromorphology of interstadial palaeosol at the Kolodiv site (East Carpathian Foreland, Ukraine). *Geological Quarterly* 51(2): 127-146.
- Łanczont M., Madeyska T., Bogucki A., Mroczek P., Hołub B., Łącka B., Fedorowicz S., Nawrocki J., Frankowski Z., Standzikowski K. 2015a. Środowisko abiotyczne paleolitycznej ekumeny strefy pery- i metakarpackiej. W: M. Łanczont, T. Madeyska (red.) *Paleolityczna ekumena strefy pery- i meta karpackiej*. Wydawnictwo UMCS, Lublin: 55-457.
- Łanczont M., Madeyska T., Mroczek P., Komar M., Łącka B., Bogucki A., Sobczyk K., Wilczyński J. 2015b. The loess-palaeosol sequence in the Upper Palaeolithic site at Kraków Spadzista – a palaeoenvironmental approach. *Quaternary International* 365: 98-113.
- Łukaszew W., Mojski J.E. 1968. Badania geochemiczne lessów Wyżyny Lubelskiej. *Kwartalnik Geologiczny* 12,4: 966-982.
- Marković S., Bokhorst M., Vanderberghe J., McCoy W., Oches E., Hambach U. 2008. Late Pleistocene loess-palaeosol sequences in the Vojvodina region, north Serbia. *Journal of Quaternary Science* 23: 73-84.
- Marković S., Stevens T., Kukla G.J., Hambach U., Fitzsimmons K.E., Gibbard P., Bugge B., Zech M., Guo Z., Hao Q., Wu H., Ken O'Hara D., Smalley J., Ujvari G., Sümegi P., Timar-Gabor A., Veres D., Sirocko F., Vasiljević A., Jary Z., Svensson A., Jović V., Lehmkuhl F., Kovacs J., Svircev Z. 2015. Danube loess stratigraphy – Towards a pan-European loess stratigraphic model. *Quaternary Science Reviews* 148: 228-258.
- Martinson D.G., Pisias N.G., Hays J.D., Imbrie J., Moore T.C.Jr., Shackleton N.J. 1987. Age Dating and the Orbital Theory of the Ice Ages: Development of a High-Resolution 0 to 300,000-Year Chronostratigraphy. *Quaternary Research* 27: 1-29.
- Maruszczak H. 1972. Wyżyny Lubelsko-Wołyńskie. W: M. Klimaszewski (red.) *Geomorfologia Polski*, t. 1, Warszawa.
- Maruszczak H. 1974. Gleby kopalne i stratygrafia lessów Grzędy Sokalskiej. *Annales UMCS*, sec. B 26: 27-66.
- Maruszczak H. 1976. Stratygrafia lessów Polski południowo-wschodniej. *Biuletyn Instytutu Geologicznego* 297: 135-175.
- Maruszczak H. 1991a. Ogólna charakterystyka lessów w Polsce. W: H. Maruszczak (red.) *Podstawowe profile lessów w Polsce*. Wyd. UMCS, Lublin, A: 1-12.
- Maruszczak H. 1991b. Zróżnicowanie stratygraficzne lessów polskich. W: H. Maruszczak (red.) *Podstawowe profile lessów w Polsce*. Wyd. UMCS, Lublin, A: 13-35.
- McLennan S. 1993. Weathering and global denudation. *Journal of Geology* 101: 295-303.
- Moska P., Adamiec G., Jary Z. 2011. OSL Dating and lithological characteristics of Loess deposits from Biały Kościół. *Geochronometria* 38 (2): 162-171.
- Moska P., Adamiec G., Jary Z. 2012. High resolution dating of loess profile from Biały Kościół, south-west Poland. *Quaternary Geochronology* 10: 87-93.
- Moska P., Adamiec G., Jary Z., Bluszcz A. 2017. OSL chronostratigraphy for loess deposits from Tyszowce – Poland. *Geochronometria* DOI: 10.1515/geochr-2015-0074, w druku.
- Moska P., Jary Z., Adamiec G., Bluszcz A. 2014. Preliminary OSL dating results for loess deposits from Tyszowce. W: Z. Jary, P. Mroczek (red.) *Kukla LOESSFEST '14 - 7th Loess Seminar in Wrocław*. International Conference on Loess Research in memoriam of George Kukla, September 8-15 2014. Abstracts and field guidebook. Institute of Geography and Regional Development, University of Wrocław: 38.
- Mroczek P. 2013. Recycled loesses – A micromorphological approach to the determination of local source areas of Weichselian loess. *Quaternary International* 296: 241-250.
- Muhs D.R. 2007. Loess deposits, origins, and properties. W: S. Elias (red.) *The Encyclopedia of Quaternary Sciences*. Elsevier, Amsterdam: 1405-1418.
- Muhs D.R. 2013. The geologic records of dust in the Quaternary. *Aeolian Research* 9: 3-48.
- Muhs D.R., Bettis III E.A. 2000. Geochemical variations in Peoria Loess of western Iowa indicate paleowinds of midcontinental North America during last glaciation. *Quaternary Research* 53: 49-61.
- Muhs D.R., Ager T.A., Beget J.E. 2001. Vegetation and paleoclimate of the last interglacial period, central Alaska. *Quaternary Science Reviews* 20: 41-61.
- Muhs D.R., Ager T.A., Bettis III E.A., McGeehin J., Been J.M., Beget J.E., Pavich M.J., Stafford Jr. T.W., Stevens D.S.P. 2003. Stratigraphy and palaeoclimatic significance of Late Quaternary loess-palaeosol sequences of the Last Interglacial-Glacial cycle in central Alaska. *Quaternary Science Reviews* 22: 1947-1986.
- Muhs D.R., Ager T.A., Skipp G., Beann J., Budahn J., McGeehin J.P. 2008. Paleoclimatic significance of chemical weathering in loess-derived paleosols of Subarctic Central Alaska. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 40: 396-411.
- Nesbitt H.W., Young G.M. 1982. Early proterozoic climate and plate motions inferred from major

- element chemistry of lutites. *Nature* 229: 715-717.
- Nesbitt H.W., Young G.M. 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica and Cosmochimica Acta* 48: 1523-1534.
- Peng S., Hao Q., Wang L., Ding M., Zhang W., Wang Y., Guo Z. 2016. Geochemical and grain-size evidence for the provenance of loess deposits in the Central Shandong Mountains region, northern China. *Quaternary Research* 85: 290-298.
- Pisias N.G., Martinson D.G., Moore T.C.Jr., Shackleton N.J., Prell W., Hays J., Boden G. 1984. High resolution stratigraphic correlation of benthic oxygen isotopic records spanning the last 300,000 years. *Marine Geology* 56: 119-136.
- Porter S.C. 2007. Loess records – China. In: S. Elias (red.) *The Encyclopedia of Quaternary Sciences*. Elsevier, Amsterdam: 1429-1440.
- Pye K. 1995. The nature, origin and accumulation of loess. *Quaternary Science Reviews* 14: 653-667.
- Pye K., Johnson R. 1988. Stratigraphy, geochemistry, and thermoluminescence ages of Lower Mississippi Valley loess. *Earth Surface Processes and Landforms* 13: 103-124.
- Raczyk J., Jary Z., Korabiewski B. 2015. Geochemical properties of the Late Pleistocene loess-soil sequence in Dankowice (Niemcza-Strzelin Hills). *Landform Analysis* 29: 49-61.
- Rousseau D.D., Derbyshire E., Antoine P., Hatte 2007. Loess records – Europe. W: S. Elias (red.) *The Encyclopedia of Quaternary Sciences*. Elsevier, Amsterdam: 1440-1456.
- Shao J., Yang S., Li C. 2012. Chemical indices (CIA and WIP) as proxies for integrated chemical weathering in China: inferences from analysis of fluvial sediments. *Sedimentary Geology* 265-266: 110-120.
- Sheldon N. D. 2006. Abrupt chemical weathering increase across the Permian–Triassic boundary. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 231: 315-321.
- Skurzyński J., Modelska M., Raczyk J., Staško S., Jary Z. 2017. Skład chemiczny wód porowych późnoplejstocenijskiej sekwencji lessowo-glebowej w Zaprzęzynie (SW Polska). *Przegląd Geologiczny* 65,11/2: 1383-1387.
- Song Y., Chen X., Qian L., Li C., Li Y., Li X. 2014. Distribution and composition of loess sediments in the Ili Basin, Central Asia. *Quaternary International* 334-335: 61-73.
- Taboada T., Cortizas A., Garcia C., Garcia-Rodeja E. 2006. Particle-size fractionation of titanium and zirconium during weathering and pedogenesis of granitic rock in NW Spain. *Geoderma* 131: 218-236.
- Taylor S.R., McLennan S.M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford: 1-312.
- Taylor S.R., McLennan S.M., McCulloch M.T. 1983. Geochemistry of loess, continental crustal composition and crustal model ages. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 47: 1897-1905.
- Tu X.B., Kwong A.K.L., Dai F.C., Tham L.G., Min H. 2009. Field monitoring of rainfall infiltration in a loess slope and analysis of failure mechanism of rainfall-induced landslides. *Engineering Geology* 105: 134-150.
- Tugulan L.C., Dulu O.G., Bojar A.-V., Dumitras D., Zinicovskaia I., Culicov O. A., Frontasyeva M.V. 2016. On the geochemistry of the Late Quaternary loess deposits of Dobrogea (Romania). *Quaternary International* 399: 100-110.
- Ujvari G., Varga A., Balogh-Brunstad Z. 2008. Origin, weathering and geochemical composition of loess in southwestern Hungary. *Quarterly Research* 69: 421-437.
- Van Loon A. J. 2006. Lost loesses. *Earth-Science Reviews* 74: 309-316.
- Wojtanowicz J., Buraczyński J. 1978. Materiały do chronologii bezwzględnej lessów Grzędy Sokalskiej. *Annales UMCS* sec. B 30/31: 37-54.
- Yang S., Ding F., Ding Z. 2006. Pleistocene chemical weathering history of Asian arid and semi-arid regions recorded in loess deposits of China and Tajikistan. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70: 1695-1709.
- Yang S., Li C., Yang D., Li X. 2004. Chemical weathering of the loess deposits in the lower Changjiang Valley, China, and paleoclimatic implications. *Quaternary International* 117: 27-34.
- Zeng R.Q., Meng X.M., Zhang F.Y., Wang S.Y., Cui Z.J., Zhang M.S., Zhang Y., Chen G. 2016. Characterizing hydrological processes on loess slopes using electrical resistivity tomography – A case study of the Heifangtai Terrace, Northwest China. *Journal of Hydrology* 541, part B: 742-753.

Summary

The results of the research show the stratigraphical and spatial differentiation of the chemical composition and the degree of the weathering of loess-paleosol sequences representing two distant loess areas in Poland. In both profiles, the chemostratigraphic method confirmed and verified the earlier litho-pedostratigraphic interpretation, indicating the existence of five basic loess-soil units. These units have a number of common characteristics in terms of chemical composition, allowing for a correlation between profiles. We

think that a comparative analysis of the chemical composition of the two distant loess-paleosol sequences is justified.

It is clearly visible that the quantitative nature of the changes in chemical composition is a significant indicator of the differentiation of the profiles in Tyszowce and Biały Kościół. In Biały Kościół, the amount of the elements related to pedogenetic transformations is much higher than in Tyszowce, which is characterized by a high contribution of mobile elements. For this reason, the degree of chemical weathering of the sequence in Biały Kościół is much higher – the CIA index (chemical index of alteration) reaches values typical for moderate chemical weathering in warm and humid climate. However, it is unlikely that loess units develop in warm and humid climate, as opposed to soils. The phenomenon of loess recycling appears to better explain the higher degree of chemical weathering in Biały Kościół as a result of a higher contribution

of stronger-weathered dust particles eroded and transported from older loess covers. Such an interpretation requires the assumption of a common source area and transport direction from east to west. The analysis did not allow for reliable and certain inference about the source areas of loess dust, due to the relatively strong positive correlation of the amount of non-mobile elements with the degree of chemical weathering. Even titanium and aluminum have been incorporated into secondary products of pedogenesis.

The results of the analysis enabled us to exclude the different sources of the loess material. Alternatively, the higher rate of chemical weathering may also be caused by a lower thickness of the loess in Biały Kościół. A lower thickness of the loess cover, suggesting a lower rate of deposition, may result in a more significant change of the deposited material due to longer exposure to variable atmospheric conditions, rainwater infiltration, etc.