

PRZYDATNOŚĆ ZBIORU DAT RADIOWĘGLOWYCH DO REKONSTRUKCJI ZMIAN W ŚRODOWISKU SCHYŁKU VISTULIANU POLSKI ŚRODKOWEJ

Usefulness of a set of radiocarbon dates for the reconstruction of changes in the environment of the Vistulian decline in Central Poland

DANUTA DZIEDUSZYŃSKA*

Zarys treści. W artykule zaprezentowano wykorzystanie zbioru dat radiowęglowych w celu identyfikowania tempa zmian w paleośrodowisku przyrodniczym regionu łódzkiego (Polska Środkowa). Na podstawie 175 datowań z przedziału czasu około 18–11,5 ka cal BP skonstruowana została krzywa rozkładu gęstości prawdopodobieństwa, której fluktuacje odpowiadają chronologii procesów morfogenetycznych. Wydzielono trzy zasadnicze etapy rozwoju w późnovistuliańskiej historii regionu łódzkiego i ustalono wiek ich granic. Potwierdzono początek ocieplenia postglacjalnego na około 18 ka cal BP. Zaproponowany podział chronostratygraficzny został porównany z niezależnymi danymi środowiskowymi – stratygrafią opartą na grenlandzkich rdzeniach lodowych oraz na interdyscyplinarnych badaniach osadów jeziornych. Korelacja zapisów wskazuje na przydatność zastosowanej metody jako pomocniczego narzędzia w rekonstrukcjach paleogeograficznych.

Słowa kluczowe: geochronometria, paleośrodowisko, późny glacjał, chronostratygrafia, region łódzki

Abstract. The article presents the use of a set of radiocarbon dates for the identification of the pace of changes in the natural palaeoenvironment of the Łódź region (Central Poland). Based on 175 dates covering a time interval between 18–11.5 ka cal BP, the probability density function was constructed, the fluctuations of which correspond to the chronology of morphogenetic processes. Three stages in the Late Vistulian history of the Łódź region were distinguished and the age of their boundaries was established. The onset of postglacial warming at ca. 18 ka cal BP has been confirmed. The proposed chronostratigraphic division was compared with independent environmental data – stratigraphy based on Greenland ice cores and interdisciplinary studies of lake sediments. The correlation of records indicates the usefulness of the method as a supplementary tool in palaeogeographical reconstructions.

Key words: geochronometry, palaeoenvironment, Late Glacial, chronostratigraphy, Łódź region

Wprowadzenie

Warunki klimatyczne po ustąpieniu ostatniego lądolodu skandynawskiego cechowały się występowaniem naprzemiennych fal ciepła i chłodu, przy zachowaniu ogólnej tendencji w kierunku ocieplenia. Rekonstrukcje paleośrodowiskowe tego okresu opierają się na analizach typu *multiproxy* sekwencji osadowych z różnych środowisk sedymentacyjnych. Dla celów paleogeograficznych i stratygraficznych najcenniejsze dane uzyskuje się ze stanowisk, w których zachowane są osady o dużej rozdzielczości, a szczególnie długie, rocznie laminowane sekwencje jeziorne (np. Jezioro Gościąg – Ralska-Jasiewiczowa i in. 1998; Jezioro Czechowskie – Słowiński i in. 2017; Meerfelder Maar – Litt i in. 2001; Rehwise – Neugebauer i in.

2012). Odtwarzanie krótkotrwałych zdarzeń, którymi odznacza się schyłek vistulianu, jest bardziej złożone dla obszarów ekstraplacjalnych ostatniego zlodowacenia. Archiwa, na podstawie których dokonuje się tutaj rekonstrukcji przemian biotycznych i abiotycznych elementów środowiska dostosowującego się do globalnych tendencji klimatycznych, pochodzą ze środowisk akumulacji mineralnej oraz akumulacji biogenicznej, które z reguły nie pozwalają na zastosowanie metod chronologii warwowej.

Narzędziem, które w ostatnim czasie stosuje się w rekonstrukcjach jakościowych i czasowych zmienności warunków środowiskowych, są zbiory dat radiowęglowych. Komputerowe systemy do kalibrowania i kompleksowego opracowywania dat (CalPal, OxCal, Calib) wyposażone są

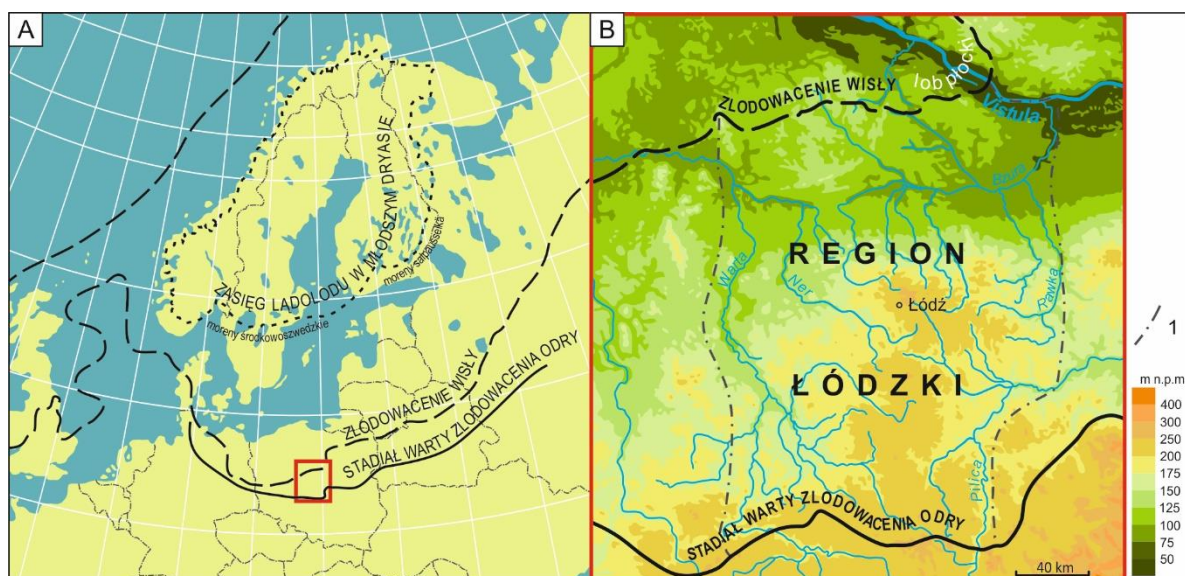
* Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Katedra Geomorfologii i Paleogeografii, ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź; e-mail: danuta.dzieduszynska@geo.uni.lodz.pl

w dodatkowe opcje ułatwiające interpretację wyników, np. dają możliwość sumowania gęstości rozkładów prawdopodobieństwa pojedynczych dat radiowęglowych. W efekcie powstaje funkcja rozkładu prawdopodobieństwa dla całego zespołu dat, w literaturze oznaczana skrótem PDF (*probability density function*) lub CPDF (*cumulative probability density function*). Coraz częściej pojawiają się publikacje, w których podejmowane są próby powiązania kształtu uzyskanej krzywej ze zmiennością zjawisk badanych przez paleogeografów i archeologów. W badaniach paleogeograficznych ideą interpretacji jest przekonanie, że dla dostatecznie dużego zbioru dat radiowęglowych częstości ich występowania, odzwierciedlone jej wysokimi lub niskimi wartościami, są skutkiem występowania lub braku tych zjawisk, czyli zależą od warunków środowiskowych (np. Geyh 1980; Goździk, Pazdur 1987; Stolk i in. 1994). Wynika to z oczywistego faktu, że w okresach ciepłych powstaje więcej biomasy, w chłodnych mniej, a na obszarach objętych zlodowaceniem lub w warunkach pustyni arktycznej w ogóle brak materiału nadającego się do datowania. Zgodność pików i obniżen na krzywej PDF ze zmianami klimatycznymi (maksima – ciepło, minima – zimno) i z intensywnością zjawisk przyrodniczych została wykorzystana w opracowaniach paleośrodowiskowych m.in. przez: Pazdur, Paz-

dura (1986), Goździka, Pazdura (1987), Michczyńską, Pazdur (2004), Michczyńską i in. (2004, 2008a, b), Michczyńskiego, Michczyńską (2006), Starkla i in. (2013), Gębicę i in. (2015), Dzieduszyńską (w druku).

Obszar badań

Prezentowany artykuł odnosi się do staroglaacialnego wycinka Polski Środkowej określanego i zdefiniowanego przez Turkowską (2006) jako region łódzki. Obszar ograniczony jest doliną środkowej Warty na zachodzie, dolinami Pilicy i Rawki na wschodzie, maksymalnym zasięgiem lądolodu stadiału warty zlodowacenia odry na południu i maksymalnym zasięgiem zlodowacenia wisły na północy (rys. 1). W obszarze regionu, charakteryzującego się złożoną rzeźbą, wyróżnia się mniejsze jednostki morfograficzne, takie jak: Wyżyna Łódzka, Kotlina Szczercowska, Kotlina Sieradzka, Kotlina Kolska, Pradolina Warszawsko-Berlińska, Równina Kutnowska. Największa – Wyżyna Łódzka – zajmuje centralną, a jednocześnie wysoczyznową powierzchnię leżącą pomiędzy 150 a 250 m n.p.m. Jej najbardziej hipsometrycznie urozmaicona część, obejmująca prawostronne dorzecze Bzury, jest znana w literaturze geomorfologicznej jako strefa krawędziowa Wyżyny Łódzkiej.



Rys. 1. Położenie regionu łódzkiego na tle zasięgów wybranych lądolodów (A) oraz hipsometria i granice obszaru (B)

1 – W i E granica regionu

Location of the Łódź region in relation to selected glacial limits (A) and hypsometric features (B)

1 – west and east boundaries of the Łódź region

Rys paleogeograficzny

Obszar regionu łódzkiego był kształtowany podczas stadiału warty kompleksu zlodowaceń środkowopolskich i następnie przemodelowany pod wpływem warunków peryglacjalnych w vistulianie (rys. 1). Schyłek vistulianu, będący okresem przejścia od warunków pustyni arktycznej do holocenu, był czasem dynamicznych przekształceń środowiska dostosowującego się do globalnych zmian klimatycznych oraz uwarunkowań regionalnych związanych z oddziaływaniem zanikającej czasy lodowej. W tym czasie czoło lądolodu zmieniło swoje położenie od maksymalnego zasięgu w łobie płockim do linii moren południowoszwedzkich i moren salpausselkä (rys. 1).

Za początek poprawy warunków środowiska w trakcie ostatnich kilku tysięcy lat vistulianu przyjmuje się tzw. fazę kamion – ocieplenie udokumentowane przez Manikowską (1985), w osadach terasy wysokiej Wisły koło Wyszogrodu. Wahania klimatyczne tego okresu wyrażone są w postaci trzech ochłodzeń: najstarszy dryas, starszy dryas i młodszy dryas, oraz dwu faz ciepłych: bølling i allerød. W licznych stanowiskach udokumentowano intensyfikację procesów fluwialnych, eolicznych i stokowych (Klatkova 1984; Manikowska 1985, 1995; Turkowska 1988; 2006; Dzieduszyńska 2011; Dzieduszyńska i in. 2014; Roman i in. 2014; Petera-Zganiacz i in. 2015). Wiedzę o reakcji paleośrodowiska na niestabilność klimatyczną uzupełniają torfowiska, stanowiące bogate archiwa akumulacji biogenicznej (Forysiak 2012).

Cel, materiały i metody

Celem artykułu jest wskazanie, na przykładzie regionu łódzkiego, możliwości wykorzystania metody analizy dużych zbiorów dat radiowęglowych w rekonstrukcjach późnovistuliańskiej zmienności środowiskowej. Do zastosowania statystycznego podejścia w badaniach paleogeograficznych skłonił autorkę fakt nieprecyzyjnego określania w literaturze regionalnej granic chronostratygraficznych poszczególnych ciepłych i zimnych faz ostatnich kilku tysięcy lat vistulianu, a co za tym idzie czasu ich trwania, dla obszaru, który posiada dobrze udokumentowane zdarzenia środowiskowe. Postanowiono sprawdzić, w jakim stopniu metodycznie przydatne jest użycie do takiej analizy zbioru składającego się z dat radiowęglowych, pozyskanych

z próbek pochodzących ze wszystkich środowisk sedimentacyjnych badanego obszaru.

Zbiór, który posłużył do konstrukcji funkcji rozkładu prawdopodobieństwa, jest zbiorem danych losowych. Składa się ze 175 datowań próbek geologicznych z 55 stanowisk regionu łódzkiego, odznaczających się zgodnością z pozycją stratygraficzną (por. Dzieduszyńska w druku, tamże rys. 1 i tab. 1). Baza danych obejmuje daty zawierające się w przedziale pomiędzy $14,85 \pm 0,25$ ka ^{14}C BP (18,64–17,5 ka cal BP; prob. 95%; Lod 309) a $9,78 \pm 0,11$ ka ^{14}C BP (11,6–10,76 ka cal BP; prob. 95%; MKL 1077). Liczebność próbek w poszczególnych rodzajach osadów prezentuje tab. 1. W tab. 2 przedstawiono rozkład zebranych dat radiowęglowych (przed kalibracją) w poszczególnych interwałach czasowych, z pominięciem wartości niepewności. Ponieważ daty uzyskiwano w ciągu kilkudziesięciu lat i w różnych laboratoriach (Łódź, Skąta, Poznań, Gliwice, Groningen), niektóre z nich są obciążone niepewnością pomiarową rzędu kilkudziesięciu (min. 50 lat) a inne kilkuset lat (maks. 585 lat), przy czym wielkość przedziału niepewności nie zależy od wieku próbek.

Tabela 1

Rozkład datowań ^{14}C w poszczególnych rodzajach osadów organicznych

Distribution of ^{14}C dates in organic material

Datowany materiał <i>Dated material</i>	Liczba próbek <i>Number of samples</i>	%
Muł organiczny	42	25
Torf	40	24
Gytia	39	20
Drewno	19	11
Gleba kopalna	18	10
Makroszczątki roślinne	11	6,5
Węgłe drzewne	6	3,5

Tabela 2

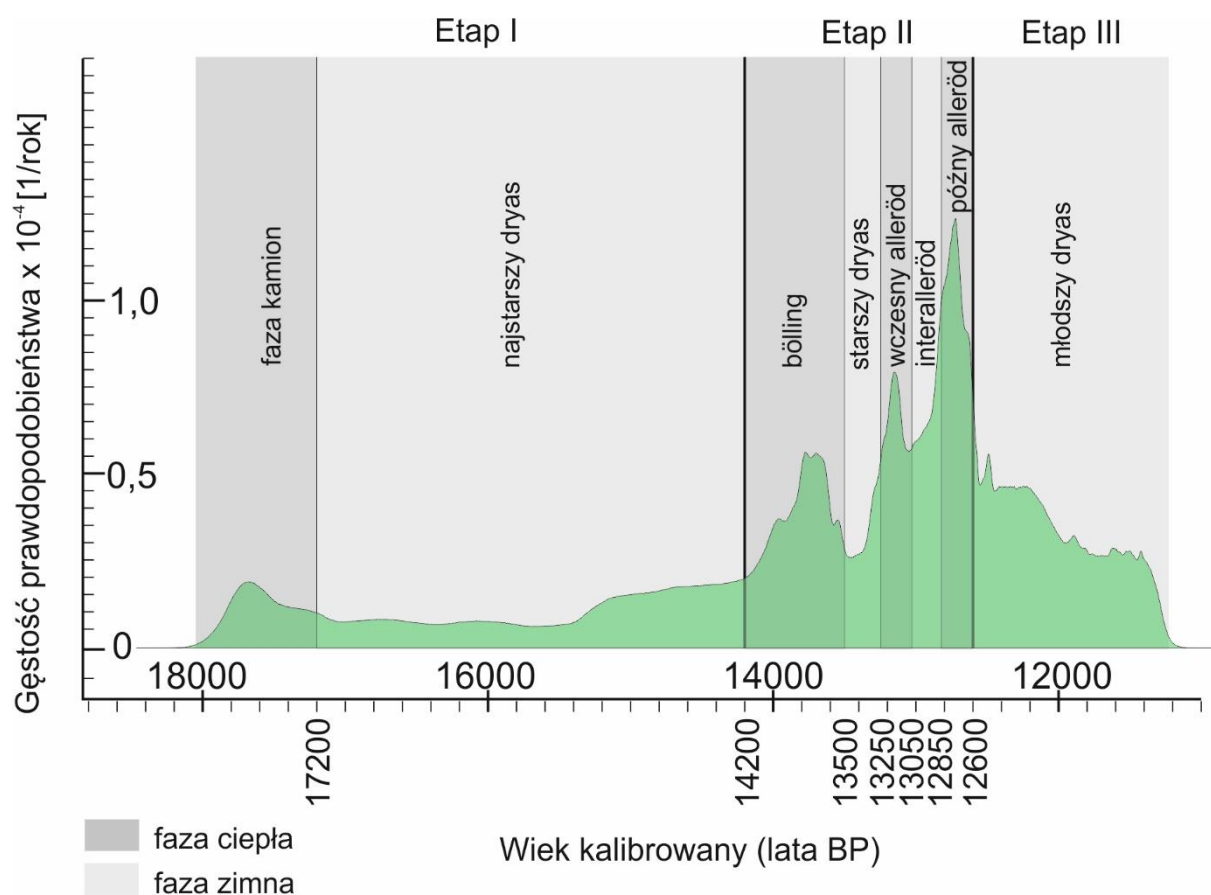
Rozkład datowań ^{14}C w przedziałach czasowych

Distribution of ^{14}C dates in time intervals

Interwał czasowy [lata konw. BP] <i>Time interval</i> [conv. years BP]	Liczba dat radiowęglowych <i>Number of radiocarbon dates</i>	%
> 10 000	7	4,0
10 000 – 11 000	72	41
11 000 – 12 000	48	28
12 000 – 13 000	27	15
13 000 – 14 000	10	5,7
< 14 000	11	6,3

Przeanalizowana została krzywa rozkładu gęstości prawdopodobieństwa (PDF) skonstruowana na podstawie zebranych danych (rys. 2). Daty ^{14}C poddano kalibracji przy użyciu programu OxCal v. 4.2.4 (Bronk Ramsey 2009), dostępnego poprzez stronę internetową <https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal/Oxcal.html>, oraz krzywej kalibracyjnej IntCal 13 (Reimer i in. 2013). Procedura badawcza polegała na rozmieszczeniu rozkładów gęstości pojedynczych dat na osi czasu i ich zsumowaniu. Kształt krzywej rozkładu gęstości prawdopodobieństwa zależy od (1) kształtu krzywej kalibracyjnej, przy pomocy której przeprowadza się zamianę dat konwencjonalnych na lata kalendarzowe; w krzywej konstruowanej na podstawie pomiarów ^{14}C obiektów posiadających własną skalę wieku kalendarzowego pośrednio zarejestrowane są globalne zmiany klimatu oraz (2) metodologii opróbowywania preferującej pobieranie materiału do analiz chronometrycznych w miejscach

zmian sedymentacyjnych, co pozwala na interpretowanie związków maksimów i minimów rozkładu gęstości z intensywnością zmian w środowisku (Michczyński, Michczyńska 2006; Michczyńska i in. 2008a, b). Fluktuacje funkcji rozkładu gęstości prawdopodobieństwa korelują się tym samym z chronologią procesów morfogenetycznych, znaną z rekonstrukcji paleogeograficznych regionu (Dzieduszyńska w druku). Interpretację oparto na danych o procesach morfogenetycznych schyłku wistulianu, charakterystycznych przede wszystkim dla zimnych interwałów (m.in: Dylkowa 1967; Manikowska 1985, 1995; Turkowska 1988, 1995; Klatkowa 1984, 1989; Goździk 1995; Turkowska i in. 2004; Dzieduszyńska 2011; Forsyś 2012; Petera-Zganiacz, Dzieduszyńska 2017), oraz dotyczących jakościowych i ilościowych wniosków z badań *multiproxy* osadów biogenicznych (Wasylkowa 1964; Forsyś 2012; Dzieduszyńska, Forsyś 2013, 2015).



Rys. 2. Krzywa rozkładu gęstości prawdopodobieństwa (PDF) dla datowań z regionu łódzkiego z zaznaczonymi granicami stratygraficznymi (za Dzieduszyńską w druku, zmienione)

Probability density function (PDF) for the datings from the Łódź region with the proposed stratigraphic boundaries (after Dzieduszyńska in press, changed)

Cechy rozkładu gęstości prawdopodobieństwa

Przedział czasowy objęty analizą charakteryzował się występowaniem okresów chłodu, niesprzyjających zachowaniu szczątków organicznych nadających się do datowania radiowęglowego, naprzemiennie z ociepleniami, korzystnymi dla gromadzenia materii organicznej. Niemniej jednak skonstruowana krzywa PDF dla 175 dat ^{14}C dla okresu 18–11,5 ka cal BP z regionu łódzkiego jest ciągła (rys. 2), co wynika z ogólnego trendu w kierunku ocieplenia i obecności w osadach chłodnych interwałów materiału, który dał możliwość datowania oraz z ząbienia się wartości niepewności pomiarowych dat.

Pierwsze zgrupowanie dat, wskazujące na poprawę warunków klimatycznych po fazie panowania środowiska pustyni arktycznej na przedpolu ostatniego lądolodu i pojawienie się osadów organicznych na obszarze badań, przypada na okres od 18 ka cal BP do 17,2 ka cal BP. W okresie pomiędzy 17,2 ka cal BP a 15,3 ka cal BP wartości PDF są niższe, bez lokalnych ekstremów, oparte na niewielkiej liczbie datowań (daty starsze od 13 ka BP w tab. 2). Po 15,3 ka cal BP krzywa rośnie, najpierw jednostajnie do około 14,2 ka cal BP, następnie jej przebieg jest bardziej zróżnicowany, z gwałtownymi wzrostami i spadkami. Przedział pomiędzy 14,2 ka cal BP a 12,6 ka cal BP charakteryzują trzy wyraźne wąskie piki, z maksimum około 13,7 ka cal BP, 13,1 ka cal BP i 12,7 ka cal BP. W powtarzających się wzrostach i spadkach PDF odnotowane są nagłe zmiany warunków klimatycznych. Ugięcia (ochłodzenia) w obrębie tego przedziału nie są fragmentami drastycznego obniżenia się krzywej rozkładu gęstości prawdopodobieństwa i każde kolejne wykazują coraz to większe wartości. Po 12,6 ka cal BP zanotowany jest nagły spadek i następnie powolne jednostajne obniżanie przebiegu funkcji, z minimalnymi lokalnymi załamaniem, przy stosunkowo wysokich wartościach funkcji PDF, pochodzących od dużej liczby datowań (daty młodsze od 11 ka BP w tab. 2).

Biorąc pod uwagę przebieg krzywej rozkładu gęstości prawdopodobieństwa, zaproponowano wydzielenie 3 zasadniczych etapów w późnowistuliańskiej historii regionu łódzkiego (Dzieduszyńska w druku). Podjęto próbę ustalenia wieku granic chronostratigraficznych (rys. 2), mając na uwadze fakt, że niezależnie od stoso-

wanych metod badawczych brak jest jednoznacznych kryteriów określających granice jednostek stratygraficznych, które pozostają umowne. Etap I – od 18 ka cal BP do 14,2 ka cal BP, jest dwudzielny. Część starszą skorelowano z poprawą warunków środowiskowych tzw. fazy kamion (za Manikowską 1985), określaną także ogólnie jako ocieplenie poprzedzające najstarszy dryas (*pre-Oldest Dryas* za Dzieduszyńską, Forysiakiem 2015), mieszczącą się pomiędzy 18 ka cal BP a 17,2 ka cal BP. Część młodsza obejmuje najstarszy dryas z granicami wyznaczonymi na 17,2 ka cal BP i 14,2 ka cal BP. Etap II, od 14,2 ka cal BP do 12,6 ka cal BP, połączono z późnoglacialnym kompleksem bølling-allerød. Urozmaicony przebieg PDF ma wyraz w dopasowaniu poszczególnych odcinków z: bøllingiem (14,2–13,5 ka cal BP), starszym dryasem (13,5–13,25 ka cal BP), wczesnym allerødem (13,25–13,05 ka cal BP), oscylacją interallerødzką (13,05–12,85 ka cal BP), późnym allerødem (12,85–12,6 ka cal BP). Etap III rozpoczyna się najczytelniej wyrażonym spadkiem PDF na 12,6 ka cal BP i przypada na młodszy dryas.

Zapis tempa zmian środowiska przyrodniczego w przebiegu krzywej rozkładu gęstości prawdopodobieństwa dat ^{14}C

Naprzemiennie okresy zimne i ciepłe schyłku wistulianu charakteryzujące przejście pomiędzy dziedziną peryglacialną a umiarkowanymi warunkami klimatycznymi holocenu, z właściwymi dla siebie procesami morfogenetycznymi i biogenicznymi, zostały dla analizowanego terenu opisywane w wielu pracach (por. Dzieduszyńska 2013). Urozmaicenie krzywej gęstości prawdopodobieństwa dat radiowęglowych można uznać za potwierdzenie zróżnicowania warunków środowiska regionu (Dzieduszyńska w druku). Dotychczasowa chronostratygrafia regionu (Manikowska 1995) oparta była na badaniach aktywności w środowisku eolicznym i wynikach datowania radiowęglowego obecnych w tym środowisku gleb kopalnych. W kontekście wzrastającej liczby danych z grenlandzkich archiwów lodowych (*event stratigraphy*) oraz laminowanych osadów jeziornych coraz częściej pojawia się pytanie o faktyczny, wyrażony w skali lat kalendarzowych, czas trwania poszczególnych faz analizowanego okresu.

Zmiana warunków klimatycznych w kierunku ocieplenia zaznaczyła się na badanym

obszarze około 18 ka cal BP i trwała 400–1000 lat (rys. 2). Początek ocieplenia potwierdza również niewielki pik na krzywej rozkładu gęstości prawdopodobieństwa dla osadów okresu 50–10 ka cal BP z Bełchatowa, lokując początek tego etapu około tysiąc lat wcześniej, na około 19 ka cal BP (Wieczorek i in. 2017). Wówczas pojawiają się też ciepłolubne gatunki Cladocera i Chironomidae w archiwach torfowych (Płóciennik i in. 2011; por. Dzieduszyńska, Forsyśiak 2015). Obie daty są generalnie w zgodzie z początkiem wycofywania się czoła lądolodu vistuliańskiego z lobu płockiego datowanym na 18,7 ka (Roman i in. 2014). W paleogeografii regionu łódzkiego ocieplenie 18 ka cal BP wiąże się ze stabilizacją warunków w środowisku fluwialnym, a następnie zapoczątkowaniem fazy silnej erozji (Turkowska 1988, 2006; Petera-Zganiacz i in. 2015).

Pozycja stratygraficzna ochłodzenia najstarszego dryasu, jako poprzedzającego wyraźne późnoglacjalne ocieplenie bølling-allerød, jest w paleogeografii regionu łódzkiego ustalona. Wiązane są z nim procesy fluwialno-eoliczne rozpoznane w stanowisku Kamion koło Wyszogrodu na terasie Wisły (Cichosz-Kostecka i in. 1991), które miały miejsce przed formowaniem inicjalnych pokryw piasków eolicznych (Manikowska 1985, 1995). Przebieg PDF wskazuje, że najstarszy dryas trwał około 3000 lat (rys. 2). Taka sama długość najstarszego dryasu została ustalona w profilu Gerzensee w Szwajcarii na podstawie badań *multiproxy* osadów jeziornych (van Raden i in. 2013). Słabe rozpoznanie tego okresu powoduje, że bywa on niewyróżniany albo różnie lokowany w podziałach stratygraficznych (por. de Klerk 2004).

Wyraźne w przebiegu funkcji PDF ocieplenie charakteryzujące etap II koreluje się z chronozoną bølling-allerød i jednostką GI-1 (Greenland Interstadial 1), którego początek zaznaczył się gwałtowną wyżką zawartości izotopu tlenu ^{18}O (van Raden i in. 2013; Rasmussen i in. 2014). Nagła zmiana warunków widoczna jest również w przebiegu rozkładu prawdopodobieństwa (rys. 2). Styl dużej niestabilności środowiska cechuje cały etap, w którym dominowały okresy cieplejsze. Pierwszy z nich, bølling, trwał około 700 lat, wtedy na teren regionu wkroczyły formacje leśne z luźnym lasem brzoźowym i uaktywniło się środowisko pedogenetyczne (Manikowska 1985, 1995; Dzieduszyńska, Forsyśiak 2015). Następnym 250-letnim okresem, zsynchronizowanym ze starszym dryasem, jest z punktu widzenia procesów morfogenetycznych najbardziej spektakularny, ze względu na główną fazę

rozwoju wydm śródlądowych (Dylikowa 1967; Manikowska 1985, 1995). Ocieplenie allerødu występujące przez około 650 lat, czyli podobnie jak bøllingu, przyczyniło się do rozwoju zwartej szaty roślinnej i procesów glebowych (Manikowska 1985, 1995; Dzieduszyńska, Forsyśiak 2015). Na podstawie analizy rozkładu gęstości prawdopodobieństwa widoczna jest niejednorodność tego ocieplenia, która pozwoliła na wydzielenie chłodnego wahnięcia o długości ok. 200 lat, będącego odpowiednikiem oscylacji Gerzensee rozpoznanej w szwajcarskich stanowiskach osadów jeziornych (Lotter i in. 2000) i zaburzenia krzywej tlenowej w rdzeniach grenlandzkich GI-1b (*event stratigraphy*; Rasmussen i in. 2014). Brak dowodów na reakcję abiotycznych komponentów środowiska na obszarze badań powoduje, że ochłodzenie to nie jest uwzględniane w regionalnych rekonstrukcjach paleogeograficznych. Przesłankę rozluźnienia szaty roślinnej i aktywacji procesów eolicznych może stanowić obecność cienkich przewarstwień piaszczystych w obrębie pedolitu allerødzkiego (Manikowska 1985). Spadek temperatury o 2°C pomiędzy 13,13 a 12,81 ka cal BP w regionie łódzkim, a więc czasowo podobnie jak w przebiegu analizowanej funkcji, był sygnalizowany ze stanowiska Żabieniec na podstawie analizy zmian frekwencji subfosalnych Chironomidae (Płóciennik i in. 2011; por. Dzieduszyńska, Forsyśiak 2015).

Przejsie od allerødu do młodszego dryasu około 12,6 ka cal BP (etap III) dokonało się w regionie łódzkim tak samo gwałtowne, jak wskazują zapisy o wysokiej rozdzielczości czasowej, dla których szacuje się spadek średnich temperatur powietrza o kilka stopni Celsjusza w ciągu kilkudziesięciu lat (np. Alley 2000; Litt i in. 2001). Przebieg krzywej PDF (rys. 2) nie odzwierciedla dostatecznie skali ochłodzenia ani zróżnicowania klimatycznego i nasilonej aktywności morfogenetycznej podczas trwania młodszego dryasu, wskazywanych w rekonstrukcjach paleogeograficznych (Wasylikowa 1999; Turkowska 2006; Dzieduszyńska 2011; Forsyśiak 2012; Dzieduszyńska i in. 2014; Dzieduszyńska, Forsyśiak 2015; Petera-Zganiacz i in. 2015). Za główną przyczynę uznano nadreprezentację w zbiorze datowań z jednego stanowiska (próbki drewna *in situ* ze stanowiska Koźmin Las – Dzieduszyńska i in. 2014) oraz cechy przebiegu krzywej kalibracyjnej (*plateau*) w przedziale 11–10 ka ^{14}C BP (por. Dzieduszyńska w druku).

Podsumowanie i wnioski

Zaproponowane granice chronostratygraficzne okresu schyłku vistulianu w regionie łódzkim zestawiono z danymi dla wybranych kluczowych stanowisk późnoglacialnych Europy, ze stratygrafią opartą na przebiegu izotopów tlenu z grenlandzkich rdzeni lodowych oraz na tempie deglacjacji ostatniego lądolodu skandynawskiego (tab. 3). Rozbieżności w długości poszczególnych okresów oraz datowaniu ich granic wydają się zjawiskiem oczywistym. Pro-

blemy z korelacją chronostratygraficzną jednostek w opisywanym czasie są często dyskutowane w literaturze. Zasadniczo wynikają ze zróżnicowanego tempa reakcji środowisk na zmiany klimatyczne, a ponadto z nieścisłości terminologicznych i interpretacyjnych (Walanus, Nalepka 2010; de Klerk 2004; Brauer i in. 2014; Rasmussen i in. 2014). Niemniej jednak czas trwania poszczególnych okresów, wykazany na podstawie analizy zbioru dat radiowęglowych i geochromów, w których można dokonać analizy *high resolution*, jest porównywalny (tab. 3).

Tabela 3

Chronostratygrafia regionu łódzkiego na tle wybranych podziałów
Chronostratigraphy of the Łódź region against some stratigraphic divisions

Deglacjacja lądolodu skandynawskiego (Rinterknecht i in. 2006)	Eifelmaar Region, N Niemcy (Litt i in. 2001)	Jezioro Gerzensee, Szwajcaria (van Raden i in. 2013)	Rdzenie grenlandzkie (Rasmussen i in. 2014)	Polska Środkowa
[lata cal BP]	laminowane osady jeziorne (<i>multiproxy</i>)	osady jeziorne (zapis $\delta^{18}\text{O}$)	<i>event stratigraphy</i>	rozkład gęstości prawdopodobieństwa dat radiowęglowych
<i>Deglaciation of Scandinavian ice-sheet (Rinterknecht et al. 2006)</i>	[lata cal BP]	[lata cal BP]	[lata cal BP]	[lata cal BP]
[cal years BP]	<i>Eifelmaar Region, N Germany (Litt et al. 2001)</i> <i>laminated lake sediments (multiproxy)</i> [cal years BP]	<i>Gerzensee Lake, Switzerland (van Raden et al. 2013)</i> <i>lake sediments ($\delta^{18}\text{O}$ record)</i> [cal years BP]	<i>Greenland record (Rasmussen et al. 2014)</i> <i>event stratigraphy</i> [cal years BP]	Central Poland distribution of probability density function [cal years BP]
Younger Dryas 12 500 →	Younger Dryas 12 680 – 11 590	Younger Dryas 12 872 →	GS – 1 12 850 – 11 650	młodszy dryas 12 600 →
Allerød – Bølling 14 600 – 12 500	Late Allerød	Late Allerød 12 989 – 12 872	GI – 1a 13 050 – 12 850	późny allerød 12 850 – 12 600
	Gerzensee Oscillation	Gerzensee Oscillation 13 274 – 12 989	GI – 1b 13 300 – 13 050	oscylacja interallerødzka 13 050 – 12 850
	Early Allerød	Allerød 13 908 – 13 274	GI – 1c 13 950 – 13 300	wczesny allerød 13 250 – 13 050
	Older Dryas 13 540 – 13 350			
	Bølling 13 670 – 13 540			
	Oldest Dryas 13 800 – 13 670	Aegelsee Oscillation 14 044 – 13 908	GI – 1d 14 050 – 13 950	starszy dryas 13 500 – 13 250
Meiendorf 14 450 – 13 800	Bølling 14 686 – 14 044	GI – 1e 14 550 – 14 050	bølling 14 200 – 13 500	
Oldest Dryas 17 500 – 16 500	Pleniglacial	Oldest Dryas <14 686	GS – 2.1a 17 500 – 14 550	najstarszy dryas 17 200 – 14 200
			GS – 2.1b <17 500	faza kamion <17 200

Możliwości interpretacyjne metody PDF sporządzonej dla zbioru dat ^{14}C ze wszystkich środowisk sedymentacyjnych łącznie (tab. 1) ograniczają natomiast jej przydatność do wnioskowania o aktywności poszczególnych środowisk, w szczególności geosystemu rzeczno-ego. Wynika to z faktu, że czas odpowiedzi systemów rzecznych na globalne zmiany klimatyczne jest opóźniony i kilkusetletnie okresy o przeciwnych tendencjach, którymi charakteryzował się schyłek wistulianu, nie są wystarczające do transformacji układu koryta oraz ustabilizowania bilansu erozja/akumulacja. W przypadku regionu łódzkiego, na przestrzeni analizowanego czasu zmiany w dolinach pozostawały pod wpływem pozaklimatycznych warunków lokalnych (Turkowska 1988, 2006; Turkowska, Dzieduszyńska 2011). Maksyma krzywej skonstruowanej na podstawie dat radiowęglowych z dolin rzecznych były jedną ze zmiennych wykorzystanych do rekonstrukcji warunków depozycji w dolinach rzecznych w wistulianie i holocenie przez m.in. Michczyńską i in. 2008a, Starkla i in. 2013, Gębicę i in. 2015, Wieczorka i in. 2017.

Analiza krzywej rozkładu prawdopodobieństwa i kontekst paleogeograficzny omawianego okresu skłaniają do sformułowania następujących wniosków:

- Kształt krzywej rozkładu gęstości prawdopodobieństwa dla regionu łódzkiego odzwierciedla specyfikę diskutowanego okresu, taką jak nieliniowy charakter ocieplenia u schyłku wistulianu oraz dużą dynamikę okresu późnoglacialnego. Zidentyfikowane zmiany regionalne są zgodne z globalnymi tendencjami paleoklimatycznymi i paleośrodowiskowymi.

- Zgrupowania dat radiowęglowych potwierdziły hipotezę o początku ocieplenia i akumulacji materii organicznej około 18 ka cal BP.

- W kontekście czasowej oceny efektywności procesów morfogenetycznych, do istotnych rezultatów przeprowadzonych badań należy określenie długości późnowistuliańskich jednostek zimnych, przede wszystkim najstarszego dryasu. Najstarszy dryas, który zajął niemalże połowę analizowanego przedziału czasu, jest na obecnym etapie rozpoznania geomorfologicznej historii regionu łódzkiego okresem słabo udokumentowanym i powinien stać się przedmiotem szczegółowych studiów.

- Potwierdzony został krótki okres głównej fazy rozwoju wydmy w starszym dryasie. Przebieg krzywej PDF dostarczył regionalnego świadectwa istnienia ochłodzenia śródalpejskiego, co także musi zostać zweryfikowane

w toku potencjalnych interdyscyplinarnych badań paleośrodowiskowych.

– Przedstawiony w artykule sposób interpretacji wyników datowań radiowęglowych wskazuje na przydatność narzędzi statystycznych w chronostratygrafii. Odpowiednio liczny i zweryfikowany zbiór dat radiowęglowych określa czas trwania etapów i zdarzeń paleośrodowiskowych w skali całego analizowanego obszaru. W rekonstrukcjach paleogeograficznych kształt krzywej rozkładu gęstości prawdopodobieństwa może być narzędziem pomocniczym, szczególnie dla obszarów staroglacjalnych, gdzie brak osadów o zachowanej rocznej laminacji ogranicza możliwości precyzyjnych podziałów stratygraficznych.

Podziękowania

Autorka dziękuje Recenzentom, profesorowi Adamowi Walanusowi i doktorowi Tomaszowi Karasiewiczowi, za wszelkie uwagi i sugestie, które przyczyniły się do powstania ostatecznej wersji artykułu.

Literatura

- Alley R.B. 2000. The Younger Dryas cold interval as viewed from central Greenland. *Quaternary Science Reviews* 19: 213-226.
- Brauer A., Hajdas I., Blockley S.P.E., Bronk Ramsey Ch., Christl M., Ivy-Ochs S., Moseley G.E., Nowaczyk N.N., Rasmussen S.O., Roberts H.M., Spötl Ch., Staff R.A., Svensson A. 2014. The importance of independent chronology in integrating records of past climate change for the 60-8 ka INTIMATE time interval. *Quaternary Science Reviews* 106: 47-66.
- Bronk Ramsey C. 2009. Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon* 51,1: 337-360.
- Cichosz-Kostecka A., Mycielska-Dowgiałło E., Manikowska B. 1991. Late Glacial aeolian processes in the light of sediment analysis from Kamion profile near Wyszogród. *Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl.-Bd.* 90: 45-50.
- de Klerk P. 2004. Confusing concepts in Lateglacial stratigraphy and geochronology: origin, consequences, conclusions (with special emphasis on the type locality Bøllingø). *Review of Palaeobotany and Palynology* 129(4): 265-298.
- Dylikowa A. 1967. Wydmy śródlądowe i ich znaczenie dla stratygrafii schyłkowego plejstocenu. W: R. Galon, J. Dylik (red.) *Czwartorzęd Polski*. PWN, Warszawa: 353-371.
- Dzieduszyńska D. 2011. Ochłodzenie młodszego dryasu i jego efekty morfogenetyczne w regionie łódzkim. *Acta Geographica Lodziensia* 98: 1-104.

- Dzieduszyńska D. 2013. Stan wiedzy o późnym vistulianie w regionie łódzkim. *Acta Geographica Lodziensia* 101: 25-36.
- Dzieduszyńska D.A. w druku. Timing of environmental changes of the Weichselian decline (18.0-11.5 ka cal BP) using frequency distribution of ^{14}C dates for the Łódź region, Central Poland. *Quaternary International* (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2017.08.012>.
- Dzieduszyńska D., Forsyś J. 2013. Sygnały zmian klimatycznych późnego vistulianu w archiwach biogenicznych region łódzkiego. *Acta Geographica Lodziensia* 101: 37-48.
- Dzieduszyńska D., Forsyś J. 2015. Late Glacial organic sediments in palaeogeographical reconstructions (cases from the Łódź region). *Bulletin of Geography. Physical Geography Series* 8: 47-57.
- Dzieduszyńska D.A., Kittel P., Petera-Zganiacz J., Brooks S.J., Korzeń K., Krąpiec M., Pawłowski D., Płaza D.K., Płóciennik M., Stachowicz-Rybka R., Twardy J. 2014. Environmental influence on forest development and decline in the Warta River valley (Central Poland) during the Late Weichselian. *Quaternary International* 324: 99-114.
- Forsyś J. 2012. Zapis zmian środowiska przyrodniczego późnego vistulianu i holocenu w osadach torfowisk regionu łódzkiego. *Acta Geographica Lodziensia* 99: 1-164.
- Geyh M.A. 1980. Holocene sea-level history: case study of the statistical evaluation of ^{14}C dates. *Radiocarbon* 22,3: 695-704.
- Gębica P., Michczyńska D.J., Starkel L. 2015. Fluvial history of the Sub-Carpatian Basins (Poland) during the last cold stage (60-8 ka cal BP). *Quaternary International* 388: 119-141.
- Goździk J. 1995. A permafrost evolution and its impact on some depositional conditions between 20 and 10 ka in Poland. *Biuletyn Peryglacjalny* 34: 53-72.
- Goździk J., Pazdur M.F. 1987. Frequency distribution of ^{14}C dates from Poland in the time interval 12-15 kyr BP and its paleogeographical implications. *Geochronometria* 1: 27-42.
- Klatkowska H. 1984. Osady depozycji naśnieżonej późnego vistulianu. *Acta Geographica Lodziensia* 50: 51-72.
- Klatkowska H. 1989. Postwarciańskie kształtowanie górnych odcinków dolin. Przykłady z Wyżyny Łódzkiej. *Acta Geographica Lodziensia* 59: 61-74.
- Litt T., Brauer A., Goslar T., Merkt J., Bałaga K., Müller H., Ralska-Jasiewiczowa M., Stebich M., Nagendank J.F.W. 2001. Correlation and synchronisation of Lateglacial continental sequences in northern central Europe based on annually laminated lacustrine sediments. *Quaternary Science Review* 20: 1233-1249.
- Lotter A.F., Birks H.J.B., Eicher U., Hofmann W., Schwander J., Wick L. 2000. Younger Dryas and Allerød summer temperatures at Gerzensee (Switzerland) inferred from fossil pollen and cladoceran assemblages. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 159: 349-361.
- Manikowska B. 1985. O glebach kopalnych, stratygrafii i litologii wydm Polski środkowej. *Acta Geographica Lodziensia* 52: 1-137.
- Manikowska B. 1995. Aeolian differentiation in the area of Poland during the period 20-8 BP. *Biuletyn Peryglacjalny* 34: 125-164.
- Michczyńska D.J., Pazdur A. 2004. A shape analysis of cumulative probability density function of radiocarbon dates set in the study of climate change in Late Glacial and Holocene. *Radiocarbon* 46,2: 733-744.
- Michczyńska D.J., Michczyński A., Pazdur A., Rotnicki K. 2004. Statistical analysis of radiocarbon dates as a tool for reconstruction of the environmental changes. *Polish Geological Institute Special Papers* 11: 109-112.
- Michczyńska D.J., Michczyński A., Pazdur A., Starkel L. 2008a. Możliwości rekonstrukcji zdarzeń ekstremalnych na podstawie dużych zbiorów dat ^{14}C . *Landform Analysis* 8: 53-55.
- Michczyńska D.J., Michczyński A., Pazdur A., Starkel L. 2008b. Kalendarzowe wartości granic chronostratygraficznych dla terenu Polski oszacowane na podstawie dużych zbiorów dat ^{14}C . *Prace Komisji Paleogeografii Czwartorzędu PAU*, VI: 163-171.
- Michczyński A., Michczyńska D.J. 2006. The effect of pds peaks' height increase during calibration of radiocarbon date sets. *Geochronometria* 25: 1-4.
- Neugebauer I., Brauer A., Dräger N., Dulski P., Wulf S., Plessen B., Míngram J., Herzschuh U., Brande A. 2012. A Younger Dryas varve chronology from the Rehwiess palaeolake record in NE-Germany. *Quaternary Science Reviews* 39: 91-102.
- Pazdur A., Pazdur M.F. 1986. Radiocarbon chronology of the Late Glacial period in Poland. *Acta Interdisciplinaria Archaeologica* IV: 61-71.
- Petera-Zganiacz J., Dzieduszyńska D.A. 2017. Palaeoenvironmental Proxies for Permafrost Presence During the Younger Dryas, Central Poland. *Permafrost and Periglacial Processes*, 28: 726-740.
- Petera-Zganiacz J., Dzieduszyńska D.A., Twardy J., Pawłowski D., Płóciennik M., Lutyńska M., Kittel P. 2015. Younger Dryas flood events. A case study from the middle Warta River Valley (Central Poland). *Quaternary International* 386: 55-69.
- Płóciennik M., Self A., Birks H.J.B., Brooks S.J. 2011. Chironomidae (Insecta: Diptera) succession in Żabieniec bog and its palaeo-lake (cen-

- tral Poland) through the Late Weichselian and Holocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 307: 150-167.
- Ralska-Jasiewiczowa M., Goslar T., Madeyska T., Starkel L. (red.) 1998. Lake Gościąg, Central Poland. A Monographic Study. Part 1. W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Science, Kraków: 1-340.
- Rasmussen S.O., Bigler M., Blockey S.P., Blunier T., Buchardt S.L., Clausen H.B., Cvijanovic I., Dahl-Jensen D., Johnsen S.J., Fischer H., Gkinis V., Guillevic M., Hoek W., Lowe J.J., Pedro J.B., Popp T., Seierstad I.K., Steffensen J.P., Svensson A.M., Vallelonga P., Vinther B., Walker M.J., Wheatley J.J., Winstrup M. 2014. A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records: refining and extending the INTIMATE event stratigraphy. *Quaternary Science Reviews* 106: 14-28.
- Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck W.J., Blackwell P.G., Bronk Ramsey Ch., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hafliðason H., Hajdas I., Hatté Ch., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Staff R.A., Turney Ch.S.M., van der Plicht J. 2013. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0–50,000 Years cal BP. *Radiocarbon* 55,4: 1869-1887.
- Rinterknecht V.R., Clark P.U., Raisbeck G.M., Yiou F., Bitinas A., Brook E.J., Marks L., Zelcs V., Lunka J.P., Pavlowskaya I.E., Piotrowski J.A., Raukas A. 2006. The last deglaciation of the southern sector of the Scandinavian ice sheet. *Science* 311: 1449-1452.
- Roman M., Dzieduszyńska D., Petera-Zganiacz J. 2014. Łódź Region and its northern vicinity under Vistulian Glaciation conditions. *Quaestiones Geographicae* 54: 55-68.
- Słowiński M., Zawiska I., Ott F., Noryskiewicz A.M., Plessen B., Apolinarska K., Rzodkiewicz M., Michczyńska D.J., Wulf S., Skubała P., Kordowski J., Błaszkiweicz M., Brauer A. 2017. Differential proxy responses to late Allerød and early Younger Dryas climatic change recorded in varved sediments of the Trzechowskie palaeolake in Northern Poland. *Quaternary Science Reviews* 158: 94-106.
- Starkel L., Michczyńska D.J., Krąpiec M., Margielewski W., Nalepka D., Pazdur A. 2013. Progress in the Holocene chrono-climatostratigraphy of Polish territory. *Geochronometria* 40(1): 1-21.
- Stolk A., Törnqvist T.E., Hekhuis K.P.V., Berendsen H.J.A., van der Plicht J. 1994. Calibration of ^{14}C histograms: a comparison of methods. *Radiocarbon* 36,1: 1-10.
- Turkowska K. 1988. Rozwój dolin rzecznych na Wyżynie Łódzkiej w późnym czwartorzędzie. *Acta Geographica Lodziensia* 57: 1-157.
- Turkowska K. 1995. Recognition of valley evolution during the Pleistocene-Holocene transition in non-glaciated regions of the Polish Lowland. *Biuletyn Peryglacjalny* 34: 209-227.
- Turkowska K. 2006. Geomorfologia regionu łódzkiego. Wydawnictwo UŁ, Łódź: 1-238.
- Turkowska K., Dzieduszyńska D. 2011. Local evidence of landform evolution vs. global changes – a case of Younger Dryas study in the upper Ner valley system, Central Poland. *Geographia Polonica* 88: 147-162.
- Turkowska K., Forsytek J., Petera J., Miotk-Szpiganowicz G. 2004. A Warta River system during the Younger Dryas in the Koło Basin (Middle Poland). *Quaestiones Geographicae* 23: 83-107.
- van Raden U.J., Colombaroli D., Gilli A., Schwander J., Bernasconi S.M., van Leeuwen J., Leuenberger M., Eicher U. 2013. High-resolution late-glacial chronology for the Gerzensee lake record (Switzerland): $\delta^{18}\text{O}$ correlation between a Gerzensee-stack and NGRIP. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 391: 13-24.
- Walanus A., Nalepka D. 2010. Calibration of Mangerud's boundaries. *Radiocarbon* 52: 1639-1644.
- Wasylikowa K. 1964. Roślinność i klimat późnego glacjału w środkowej Polsce na podstawie badań w Witowie koło Łęczycy. *Biuletyn Peryglacjalny* 13: 261-417.
- Wasylikowa K. 1999. Przemiany roślinności jako odbicie procesów wydymotwórczych i osadniczych w młodszym dryasie i holocenie na stanowisku archeologicznym w Witowie koło Łęczycy. *Prace i Materiały Muzeum Archeologicznego i Etnograficznego w Łodzi, Seria Archeologia* 41: 43-80.
- Wieczorek D., Michczyńska D.J., Michczyński A., Krzyszkowski D., Wachecka-Kotkowska L. 2017. Fazy akumulacji i erozji w okresie 10-50 ka cal BP zapisane w osadach formacji Piaski na podstawie analizy rozkładu gęstości prawdopodobieństwa dat radiowęglowych. XXVI Konferencja Naukowo-Szkoleniowa Stratygrafia plejstocenu Polski „Czwartorzęd pogranicza niżu i wyżyn w Polsce Środkowej”, 4-8 września 2017 r. Wawrzkowizna k/Belchatowa: 36-39.

Summary

In the present study, a set of radiocarbon dates of the Vistulian decline, from 14.85 ± 0.25 ka ^{14}C BP (18.64–17.5 ka cal BP) to 9.78 ± 0.11 ka ^{14}C BP (11.6–10.76 ka cal BP), for the old-morainic area of the Łódź region (Central Poland), was employed. On the basis of the collected dates, the probability density function (PDF) was constructed (Fig. 2). The aim of the article is to present the possibility of using the method of analysis of radiocarbon dates in the reconstruction of the Late Vistulian environmental variability of the study area. Attention was paid to the time scale of the distinguished warm and cold phases of the last few thousand years of Vistulian.

The main assumption of the analysis was that the shape of a probability density function results from a combination of the calibration curve properties and the location of sampling, thus it is the result of global climatic changes and local conditions of accumulation of organic material. Peaks and falls of the PDF are interpreted as changes in the environment, thus they reflect an alternation of warmer and cooler phases

and cast light on the duration and pace of the changes in the environment of the Vistulian decline. By comparing these fluctuations with the results of comprehensive palaeogeographical investigations of the area of the analysed time interval, a three-phase development of the Łódź region has been distinguished (Fig. 2) and compared with chronostratigraphic units. 1st stage, older than ca. 14.2 ka cal BP, encompasses warming at ca. 18 ka cal BP (Kamion phase) and 3000 years of the Older Dryas. 2nd stage, from ca. 14.2 to ca. 12.6 ka cal BP, includes the Bølling-Allerød chronozone. 3rd stage, from ca. 12.6 ka cal BP, refers to the Younger Dryas.

The obtained record was correlated with stratigraphy based on Greenland ice cores and interdisciplinary studies of lake sediments (Tab. 3). Divergences in the length of individual periods and their dating are obvious, nevertheless a quasisimultaneous occurrence of major changes makes the proposed division comparable with other independent environmental data. This correlation indicates the usefulness of the method as a supplementary tool in palaeogeographical reconstructions, especially in the old glacial areas where a high resolution record is unavailable.