

Michał Stachura^{*}, Dariusz Wieczorek^{}, Artur Zieliński^{*}**

^{*} Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach

^{**} Świętokrzyskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk Geologicznych

e-mails: mista@ujk.edu.pl; dariusz.a.wieczorek@gmail.com; aziel@ujk.kielce.pl

IDENTYFIKACJA NAJBARDZIEJ ZBLIŻONYCH OKRESÓW INTERGLACJALNYCH Z OSTATNICH 600 000 LAT NA PODSTAWIE ANALIZY KRZYWEJ IZOTOPOWEJ TLENU (LR04 $\Delta^{18}\text{O}$)

IDENTIFICATION OF THE MOST ALIKE INTERGLACIAL PERIODS FROM THE LAST 600 000 YEARS ON THE BASIS OF THE OXYGEN ISOTOPE CURVE (LR04 $\Delta^{18}\text{O}$)

DOI: 10.15611/pn.2017.469.18

JEL Classification: C22, C38, C61

Streszczenie: W opracowaniu dokonano identyfikacji najbardziej zbliżonych okresów interglacjalnych w okresie ostatnich 600 000 lat na podstawie analizy krzywej izotopowej tlenu (LR04 $\delta^{18}\text{O}$) z użyciem pseudoodległości DTW (*dynamic time warping*). Analizowane okresy (MIS: 1, 5e, 7e, 9e, 11c, 13a, 15a) wykazują podobieństwa, a równocześnie zaznacza się ich zróżnicowanie na dwa typy. Pierwszy o mniejszych wartościach krzywej $\delta^{18}\text{O}$ i wyraźnym pojedynczym wierzchołku, a drugi o większych wartościach krzywej $\delta^{18}\text{O}$ oraz współwystępujących, niekiedy równorzędnych wierzchołkach. Stwierdzone podobieństwo tych okresów może potwierdzać, że w każdym z nich mogły w pełni istnieć warunki interglacjalne, a więc mogło też dochodzić do rozwoju charakterystycznych dla danej strefy klimatycznej formacji roślinnych. Dodatkowo przedstawiono próbę modelowania przebiegu krzywej $\delta^{18}\text{O}$ z uwzględnieniem wybranych parametrów orbitalnych Ziemi, które są zasadniczymi czynnikami zewnętrznymi cykli glacialno-interglacjalnych.

Słowa kluczowe: interglacjały, krzywa izotopowa tlenu, metoda DTW, analiza skupień.

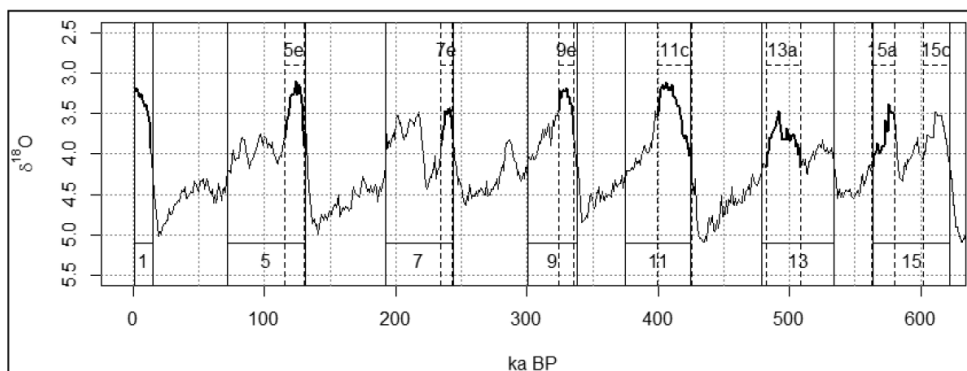
Summary: The paper presents an identification of the most similar interglacial periods during the last 600 000 years, which has been made on the basis of the $\delta^{18}\text{O}$ oxygen isotope curve (LR04 $\delta^{18}\text{O}$) analysis with the use of DTW (*dynamic time warping*) algorithm. The periods considered (MIS: 1, 5e, 7e, 9e, 11c, 13a, 15a) demonstrate both similarities, and differences as well, which provides their division into two types. One of them, is characterised by subtly smaller values of curve $\delta^{18}\text{O}$ and a distinct single peak of the oxygen curve, while the other type, discloses higher values of curve $\delta^{18}\text{O}$ and co-occurring, sometimes comparable, peaks. The similarities of these periods seem to confirm that each of them could foster interglacial

conditions, which could impact further on the development of vegetation formations that were characteristic of specific climate zones. In addition, the paper contains an attempt to model the course of the oxygen isotope curve on a basis of selected Earth's orbital parameters that are essential external factors of glacial-interglacial cycles.

Keywords: interglacial periods, oxygen isotope curve, DWT algorithm, cluster analysis.

1. Wstęp

W opracowaniu dokonano analizy wartości krzywej izotopowej tlenu (LR04 $\delta^{18}\text{O}$)¹, uzyskanych z badań otwornic bentosowych (*benthic foraminifera*, BENT) pochodzących z osadów morskich [Lisiecki, Raymo 2005]. Dane te pośrednio mogą być interpretowane jako odzwierciedlenie zmian warunków klimatycznych na Ziemi w ujęciu globalnym [Lisiecki, Raymo 2007]. Małe wartości krzywej $\delta^{18}\text{O}$ wskazują na okresy ciepłe (interglacjały) lub względnie ciepłe, a wartości duże – na okresy chłodne (glacjały) lub względnie chłodne (por. rys. 1). Zapis krzywej $\delta^{18}\text{O}$ dzieli się na stadia izotopowe, w tym przypadku są to morskie stadia izotopowe (MIS – *Marine Isotope Stages*). MIS oznaczone liczbami nieparzystymi przypisuje się do okresów ciepłych lub względnie ciepłych. Wybrano ostatnie 600 000 lat, ponieważ wartości w tej przestrzeni czasowej podane są w równych odstępach, co 1 ka (*kilo annum* = tysiąc lat). W analizowanym przedziale znajdują się MIS od 1 do 15, przy czym stadium 15 wchodzi w niepełnym wymiarze (rys. 1). MIS1 odpowiada holoceniowi, pozostałe MIS wchodzą już do plejstocenu.



Rys. 1. Przebieg krzywej izotopowej tlenu (LR04 $\delta^{18}\text{O}$) dla ostatnich 600 ka

Źródło: opracowanie własne w pakiecie R na podstawie danych z [Lisiecki, Raymo 2005].

¹ Dalej opisywana też jako „krzywa $\delta^{18}\text{O}$ ”.

2. Cele, materiały i metody

Celem głównym opracowania jest wskazanie, przy użyciu adekwatnych metod analizy szeregów czasowych, tych par interglacjalów, które charakteryzuje najbardziej zbliżony przebieg krzywej $\delta^{18}\text{O}$. Celem pobocznym jest utworzenie swego rodzaju wzorca tej krzywej odpowiadającej interglacjalom.

Przy określeniu granic MIS porównywanych ze sobą zrobiono odstępstwo od granic tych stadiów, wyznaczonych przez Lisiecki i Raymo [2005], gdyż przedziały okresów interglacjalnych są tam dosyć szerokie (por. tab. 1; rys. 1). Obejmują one też okresy względnego ciepła, znacznego zaniku lądolodów, w których jednak nie panowały warunki zbliżone do holoceniskich. Nie dochodziło w nich zapewne do rozwoju np. termofilnych zbiorowisk leśnych (klimaksowych) charakterystycznych dla strefy umiarkowanej. Posłużono się więc przedziałami wyznaczonymi przez Tzedakis i in. [2012], które – jak należy sądzić – są bliższe zmianom holoceniskim (por. rys. 1 i rys. 3). Porównanie zakresów MIS przedstawia tab. 1. Granice holocenu określono jako 0-11,7 ka BP (por. [Marks 2016]).

Przemiany roślinności holoceniskiej i interglacjalnej – w umiarkowanej strefie klimatycznej – z punktu widzenia florystycznego obejmują kolejno stadia: kryokratyczne (roślinność arktyczna), protokratyczne (inicjalne lasy, bory mieszane), mezokratyczne (las klimaksowy), telokratyczne (mezo- i oligotroficzne lasy, bory), by na końcu powrócić do stadium kryokratycznego [Dzięciołowski, Tobolski 1982]. Część badaczy uważa, że dopiero zarejestrowanie takich zmian roślinności w profilach geologicznych uprawnia niejako do definiowania danego okresu ciepłego jako w pełni interglacjalnego (por. [Mojski 2005]). Dla innych stref klimatycznych charakterystyczne są oczywiście inne formacje roślinne.

Tabela 1. Holocen i okresy interglacjalne w ostatnich 600 ka według zmian krzywej izotopowej tlenu (LR04 $\delta^{18}\text{O}$) i skorygowanych przez inne parametry

Przedział i czas trwania (ka) [Lisiecki, Raymo 2005]		Przedział i czas trwania (ka) [Tzedakis i in. 2012]	
MIS1	0-14 (14)	MIS1	–
MIS5	71-130 (59)	MIS5e	114-129 (15)
MIS7	191-243 (52)	MIS7e	233,6-242,6 (9)
MIS9	300-337 (37)	MIS9e	323,4-335 (11,6)
MIS11	374-424 (50)	MIS11c	398-425 (27)
MIS13	478-533 (55)	MIS13a	481-508 (27)
MIS15	563-621 (58)	MIS15a	562-579 (17)
		MIS15c	601-621 (20)

Źródło: opracowanie własne według danych z [Lisiecki, Raymo 2005; Tzedakis i in. 2012].

Niedogodnością wyboru okresów interglacjalnych wyznaczonych w [Tzedakis i in. 2012] w stosunku do okresów interglacjalnych wyznaczonych w [Lisiecki, Raymo 2005] jest ich przesunięcie, szczególnie widoczne przy MIS15a (por. rys. 1). W przypadku MIS1 porównywanie go z innymi okresami też nie jest w pełni zasadne, gdyż okres ten nie jest jeszcze zamknięty. Niemniej jednak jest to okres, w którym żyjemy, ważny dla człowieka, a przez to często analizowany (por. [Marks 2016]).

Aby zrealizować cele opracowania, posłużono się pseudoodległością DTW (*dynamic time warping*) jako właściwą miarą podobieństwa pomiędzy parami szeregów czasowych² (por. m.in. [Keogh, Ratanamahatana 2005; Schreiber, Schmitz 1997; Teisseyre 2010; Górecki 2012]). Przyznać należy, że jest to wybór arbitralny.

Dodatkowo podjęto w opracowaniu próbę opisu przebiegu krzywej izotopowej tlenu z uwzględnieniem parametrów orbitalnych Ziemi, tj. ekscentryczności kształtu orbity (*eccentricity* – ECC), nachylenia osi (*obliquity* – OBL), precesji kierunku osi (*precession* – PREC) [Berger, Loutre 1991], które są głównymi czynnikami zewnętrznymi cykli glacialno-interglacjalnych (por. [Hrynowiecka 2016]).

Ze względu na dyskretne ujęcie w wyznaczaniu wartości na krzywej $\delta^{18}\text{O}$ konieczne jest również takie ujęcie w determinacji okresów MIS na potrzeby przeprowadzenia analiz. Odpowiednio zdeterminowane okresy zamieszczone są w tab. 2. Okresy te zaznaczone są na rys. 1 przez pogrubienie krzywej $\delta^{18}\text{O}$.

Tabela 2. Holocen i okresy interglacjalne w ostatnich 600 ka w ujęciu dyskretnym

Przedział i czas trwania (ka)	Liczebność próby	
MIS1	0-12 (12)	13
MIS5e	114-129 (15)	16
MIS7e	234-243 (9)	10
MIS9e	323-335 (12)	13
MIS11c	398-425 (27)	28
MIS13a	481-508 (27)	28
MIS15a	562-579 (17)	18

Źródło: opracowanie własne.

3. Wyniki

Wstępne rozpoznanie „przestrzennego położenia” względem siebie okresów MIS polegało na wyznaczeniu pseudoodległości pomiędzy wszystkimi parami MIS. Pseudoodległości te prezentują tab. 3 (zob. pakiet `TSdist` w [Mori i in. 2015]).

² W przypadku rozważanych danych właściwą zarówno ze względu na specyfikę samej miary (m.in.: dopuszczalna jest transformacja czasu), jak i ze względu na specyfikę analizowanego szeregu czasowego (m.in.: okresy MIS są różnej długości; długość okresu wzorcowego nie musi zostać *a priori* zdeterminowana).

Tabela 3. Pseudoodległości pomiędzy badanymi okresami MIS

MIS 1	MIS 5e	MIS 7e	MIS 9e	MIS 11c	MIS 13a	MIS 15a	
0	3,03	3,79	0,97	2,3	9,46	10,39	MIS 1
	0	2,66	2,04	2,70	4,64	4,80	MIS 5e
		0	2,78	5,29	2,78	2,48	MIS 7e
			0	2,23	7,19	7,32	MIS 9e
				0	7,40	10,33	MIS 11c
					0	5,49	MIS 13a
						0	MIS 15a

Źródło: opracowanie własne na podstawie obliczeń w pakiecie R.

Tabela 4. Sumy pseudoodległości każdego okresu od wszystkich pozostałych

MIS 1	MIS 5e	MIS 7e	MIS 9e	MIS 11c	MIS 13a	MIS 15a
29,94	19,87	19,78	22,53	30,25	36,96	40,81

Źródło: opracowanie własne na podstawie obliczeń w pakiecie R.

Najbardziej „odległym” od wszystkich analizowanych okresów jest MIS15a, zaś „najbliższym” wszystkim pozostałym – MIS7e (zob. tab. 4). Mogłoby to sugerować, że MIS7e ma najbardziej typowy przebieg wśród rozpatrywanych okresów, zaś MIS15a – najmniej typowy. W rzeczywistości tak jednak nie jest.

Właściwym podejściem do badania struktury podobieństwa rozważanych okresów interglacjalnych jest zastosowanie analizy skupień (por. np. [Gatnar, Walesiak (red.) 2004; Walesiak, Gatnar (red.) 2009]). Spośród jej metod wybrano hierarchiczne grupowanie aglomeracyjne. W przypadku rozważanych danych grupowanie takie przeprowadzono na podstawie tzw. odległości średniej między kolejno tworzonymi skupieniami C_p , C_j , czyli wartości:

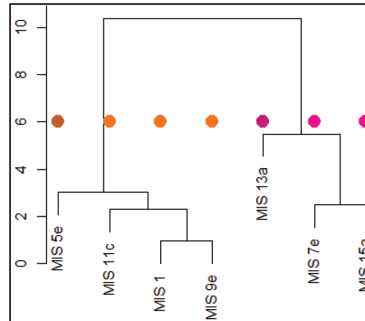
$$d(C_i, C_j) = n_i^{-1} n_j^{-1} \sum_{x \in C_i, y \in C_j} d(x, y),$$

gdzie: d jest pseudoodległością DTW, zaś n_i , n_j są liczebnościami odpowiednio skupień C_p , C_j .

Skorzystano w tym celu z funkcji `hclust` programu R. Wyznaczone wartości indeksu Calińskiego-Harabasz (funkcja `cluster.stats`) dla podziałów na k skupień, przy $k \in \{2, 3, 4, 5, 6\}$, wskazały, że optymalny jest podział na dwa skupienia (najwyższa wartość indeksu równa 15,25), (zob. np. [Caliński, Harabasz 1974; Korzeniewski 2014]). Sugeruje to także ocena wzrokowa dendrogramu klasyfikacyjnego (zob. rys. 2, na którym oś pionowa reprezentuje odległości pomiędzy tworzonymi skupieniami)³. Można więc wnosić, że występują dwa typy przebiegów krzywej

³ Do analogicznych dendrogramów i do identycznych podziałów na dwa skupienia prowadziło użycie wszystkich innych dostępnych w funkcji `hclust` wyborów odległości między skupieniami

$\delta^{18}\text{O}$ w analizowanych okresach MIS (rys. 2 i 3) – pierwszy obejmuje: MIS1, MIS9e, MIS11c i MIS5e, a drugi – MIS15a, MIS7e, MIS13a.



Rys. 2. Dendrogram klasyfikacyjny badanych okresów MIS

Źródło: opracowanie własne na podstawie obliczeń w pakiecie R.

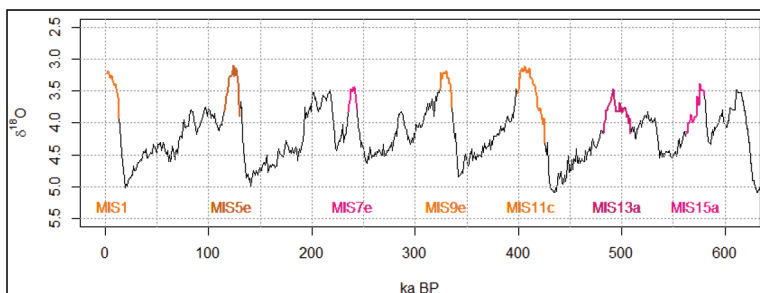
Następnie podjęto próbę wyznaczenia swego rodzaju wzorca krzywej $\delta^{18}\text{O}$ dla badanych okresów MIS. Wzorzec został określony jako taki szereg o nieznaney *a priori* liczebności, że suma pseudoodległości od niego do wszystkich pozostałych okresów MIS (z wyjątkiem niekompletnego MIS1) jest możliwie najmniejsza. Wyznaczenie wzorca przebiegało dwuetapowo: 1) dla każdej liczebności z zakresu od 10 do 28 (od najmniejszej do największej liczebności MIS) wyznaczono szereg spełniający wymóg minimalizacji łącznej pseudoodległości; 2) spośród wyznaczonych szeregów – kandydatów na wzorzec – na podstawie stosownego kryterium dokonano wyboru wzorca.

Etap 1. bazował na optymalizacji numerycznej, gdyż zarówno złożoność optymalizowanych funkcji celu (w postaci łącznej pseudoodległości), jak i nade wszystko sam algorytm DTW nie pozwalają na optymalizację na drodze analitycznej. Co więcej, procedurę numeryczną powtórzono 100 razy i ostatecznie wybierano tylko po jednym szeregu danej liczebności, w przypadku którego uzyskano najniższą wartość funkcji celu przy danej liczebności⁴. Uzyskane tak szeregi, pretendujące do miana wzorca, prezentuje według wspólnego momentu środkowego rys. 4.

Etap 2 oparty był na prostym chwycie, który dostatecznie zniwelowałby premiovanie przez metodę DTW szeregów krótszych względem dłuższych. Otóż w etapie pierwszym równolegle wyznaczono także kandydatów na wzorzec wśród szeregów stałych. Okazało się, że w ich przypadku średni przyrost pseudoodległości przypadający na dołączenie pojedynczej wartości do szeregu jest równy ok. 0,08 (współczynnik kierunkowy oceniającej ten przyrost regresji wynosi 0,08000992 przy

(z wyjątkiem odległości *single*) w połączeniu z doбором kryterium w postaci nie tylko indeksu Calińskiego-Harabasa, lecz także indeksów: sylwetkowego, Dunna, GAP oraz gamma Pearsona.

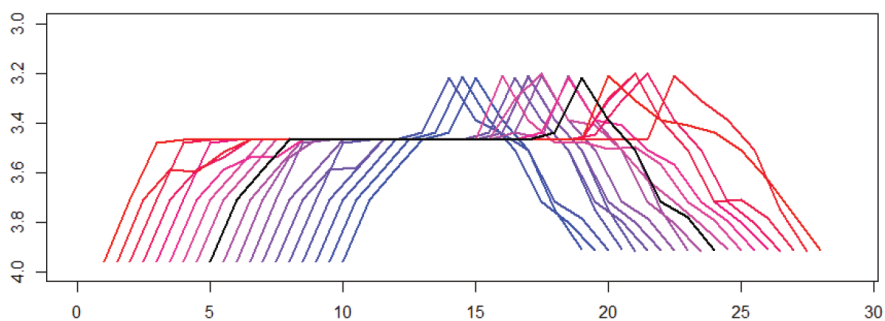
⁴ Funkcja `optim` z domyślnymi ustawieniami, prócz `method = „BFGS”` oraz `maxit = 1500`.



Rys. 3. Przebieg krzywej izotopowej tlenu (LR04 $\delta^{18}\text{O}$) z oznaczonymi kolorami badanymi okresami MIS odpowiednich typów

Źródło: opracowanie własne na podstawie obliczeń w pakiecie R.

wręcz idealnie liniowym ułożeniu punktów na wykresie rozrzutu i $R^2 = 0,9999999$ (*sic!*)⁵. Wobec tego do ostatecznego wyboru wzorca posłużono się kryterium w postaci wartości funkcji celu dla kandydatów na wzorce pomniejszonych o wynikające z regresji teoretyczne wartości funkcji celu dla kandydatów na wzorec stały. Dzięki temu ostatecznie wytypowano wzorec o liczebności 20.

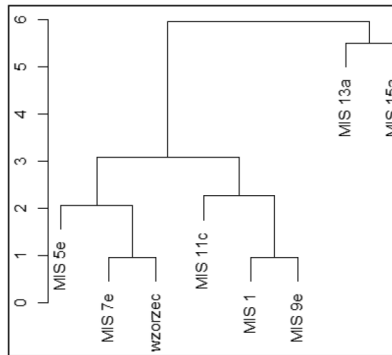


Rys. 4 Przebiegi kandydatów na wzorce krzywej $\delta^{18}\text{O}$ badanych okresów MIS (bez MIS1) o różnych liczebnościach (ostatecznie wybrany wzorec zaznaczono na czarno)

Źródło: opracowanie własne na podstawie obliczeń w pakiecie R.

Uprzednio wykonaną klasyfikację powtórzono z uwzględnieniem w niej uzyskanego wzorca. Wyniki zamieszczone są na rys. 5 (warto dodać, że do identycznie rozgałęziających się drzew prowadziło uwzględnienie każdego z pozostałych kandydatów na wzorec – niezależnie od jego liczebności).

⁵ *Nota bene* stałe wzorce różnych liczebności okazały się leżeć wręcz na tym samym poziomie (wartości od 3,539997 do 3,540000), mimo nienarzucania takiego warunku początkowego.



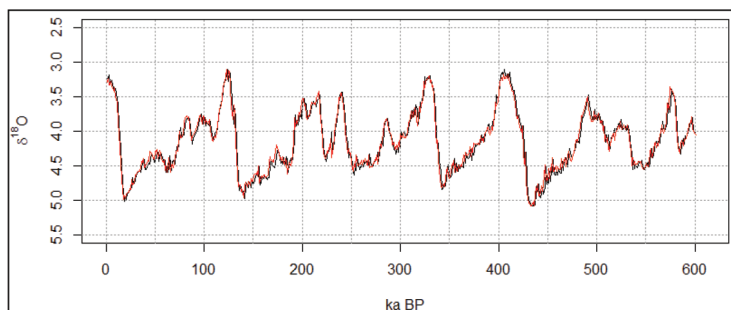
Rys. 5. Dendrogram klasyfikacyjny badanych okresów MIS z uwzględnieniem wzorca

Źródło: opracowanie własne na podstawie obliczeń w pakiecie R.

Ze względu na nadmieniany w literaturze wpływ parametrów astronomicznych Ziemi na warunki klimatyczne naszej planety (por. [Hrynowiecka 2016]), podjęto próbę opisu przebiegu krzywej izotopowej tlenu (oznaczonej dalej jako zmienna BENT), ponownie dla horyzontu czasowego 0-600 ka BP, za pomocą wybranych zmiennych objaśniających: ECC, OBL i PREC. Najprostsze modele liniowe postaci: $\widehat{BENT}_t = a_0 + a_1ECC_{t-i_1} + a_2OBL_{t-i_2} + a_3PREC_t$ (bez opóźnień i z opóźnieniami zmiennych objaśniających: $0 \leq i_1, i_2, i_3 \leq 10$) nie dawały zadowalającego stopnia dopasowania (współczynnik determinacji $R^2 < 0,3$), a ponadto własności rozkładu reszt były wyjątkowo niepokojące. Dopiero włączenie do grupy regresorów opóźnionej zmiennej objaśnianej spowodowało znaczącą poprawę własności uzyskiwanych modeli.

Ostateczny model wybrano w sposób następujący. Najpierw wyznaczone zostały wszystkie modele postaci: $\widehat{BENT}_t = a_0 + a_4BENT_{t-1} + a_1ECC_{t-i_1} + a_2OBL_{t-i_2} + a_3PREC_{t-i_3}$, w których dodatkowym regresorem jest opóźniona o jeden okres zmienna objaśniana. Spośród tak wyestymowanych 1331 modeli wybrano ten, który spełniał łącznie trzy kryteria: 1) współczynnik determinacji $R^2 > 0,92$; 2) wszystkie zmienne są istotne; 3) suma opóźnień ($i_1 + i_2 + i_3$) jest najmniejsza z możliwych.

Wybór padł zatem na model: $\widehat{BENT}_t = 1,3022 + 0,9419 \cdot BENT_{t-1} - 0,7797 \cdot ECC_t - 0,04459 \cdot OBL_{t-3} + 1,2255 \cdot PREC_{t-1}$ o bardzo dobrym dopasowaniu ($R^2 = 0,9486226$). Niemniej jednak własności składnika resztowego tego modelu nie są zadowalające, bowiem – chociaż składnik resztowy od błędy można by uznać za losowy (dwustronny test liczby serii z wartością $p = 0,02736$), co teoretycznie pociągałoby za sobą brak autokorelacji – to jednak test Ljunga-Boxa wskazuje na występowanie nieznaczących autokorelacji rzędów 2 i 4 (przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$). Ponadto rozkładu reszt nie można uznać za normalny (test Shapiro-Wilka, wartość $p = 0,00004637$). Wobec tego wątpliwa staje się zasadność wnioskowania statystycznego o jakości przyjętego modelu przy klasycznych założeniach.



Rys. 6. Dopasowanie regresji (linia czerwona) do krzywej izotopowej tlenu (linia czarna)

Źródło: opracowanie własne na podstawie obliczeń w pakiecie R.

Uzyskany model o świetnym dopasowaniu, mimo pewnych mankamentów, pozwala, po pierwsze, uznać za istotny wpływ rozważonych parametrów astronomicznych na warunki klimatyczne naszej planety (w tym średnią temperaturę), a więc i na kształtowanie przebiegu krzywej $\delta^{18}\text{O}$. Po drugie natomiast – daje możliwość predykcji.

4. Podsumowanie

Reasumując, należy zwrócić uwagę na następujące kwestie, wynikające wprost z przeprowadzonych analiz:

1. Badane okresy interglacjalne wykazują podobieństwo pomiędzy sobą. Zaznacza się wśród nich zróżnicowanie na dwa typy. Pierwszy obejmuje okresy o małych wartościach krzywej $\delta^{18}\text{O}$ i wyraźnym pojedynczym wierzchołku. Drugie okresy są o nieco większych wartościach krzywej $\delta^{18}\text{O}$ oraz współwystępujących wierzchołkach, niekiedy równie wielkich.

2. „Najbliższy” wszystkim badanym okresom jest MIS7e. Potwierdziły to i analiza danych wyjściowych, i porównanie badanych okresów z wzorcem utworzonym dla okresów interglacjalnych w analizowanym przedziale czasowym.

3. Podobieństwo badanych okresów MIS może potwierdzać, że w każdym z nich mogły panować w pełni warunki interglacjalne, a więc mogło też dochodzić do rozwoju charakterystycznych dla danej strefy klimatycznej formacji roślinnych, np. termofilnych zbiorowisk leśnych (klimaksowych) strefy umiarkowanej. Z drugiej strony widoczne są różnice pomiędzy nimi, wyrażające się chociażby pewnym ich „oddaleniem”, a nie nakładaniem się na siebie. To „oddalenie” powoduje, że każdy z tych okresów cechował się najpewniej nieco innym składem gatunkowym formacji roślinnych oraz nieco odmienną kolejnością pojawiania się poszczególnych taksónów, co stwierdzono np. na obszarze Polski (por. [Lindner i in. 2012]) i co miało zapewne też miejsce w szerszej skali (por. [Granoszewski, Winter 2016]).

4. Istnieje zasadniczy wpływ parametrów astronomicznych (ECC, OBL, PREC) na warunki klimatyczne panujące na Ziemi, a więc i na kształtowanie przebiegu krzywej izotopowej tlenu. Złożoność systemu klimatycznego Ziemi może, choć po części odzwierciedlać model matematyczny, jaki stworzono dla zobrazowania zmian w krzywej $\delta^{18}\text{O}$ na podstawie tych parametrów.

Należy podkreślić, że dane, których użyto do wnioskowania, odnoszą się ogólnie do całej planety. Mogą więc pojawiać się pewne trudności z analizą w skalach lokalnych, gdyż niektóre regiony reagowały odmiennie na impulsy zmian klimatycznych.

Oprócz wniosków płynących bezpośrednio z przedstawionych analiz dodać trzeba, że niniejsza praca może stanowić pewien krok w badaniach plejstocenijskich okresów glacialnych i interglacialnych oraz ich następstw. W tym kontekście autorzy w dalszej kolejności planują podjęcie analiz okresów glacialnych.

Literatura

- Berger A., Loutre M.F., 1991, *Insolation values for the climate of the last 10 million years*, Quaternary Sciences Review, vol. 10, no. 4, s. 297-317.
- Caliński R.B., Harabasz J., 1974, *A dendrite method for cluster analysis*, Communications in Statistics, vol. 3, s. 1-27.
- Dzięciołowski W., Tobolski K., 1982, *Czwartorzędowe cykle klimatyczno-ekologiczne a ewolucja gleb*, Roczniki Gleboznawcze, t. XXXIII, nr 1/2, s. 201-211.
- Gatnar E., Walesiak M. (red.), 2004, *Metody statystycznej analizy wielowymiarowej w badaniach marketingowych*, Wydawnictwo AE we Wrocławiu, Wrocław.
- Górecki T., 2012, *Transformaty w klasyfikacji szeregów czasowych*, XXXVIII Konferencja Statystyka Matematyczna, Wisła, <http://www.math.uni.wroc.pl/~wisla2012/prezentacje/gorecki.pdf> (4.08.2016).
- Granoszewski W., Winter H., 2016, *Zmiany klimatu w plejstocenie w świetle danych palinologicznych*, Przegląd Geologiczny, 64, 1, s. 43-48.
- Hrynowiecka A., 2016, *Przyczyny i mechanizmy zmian klimatu w plejstocenie – state of art (The causes and mechanisms of climate change during the Pleistocene – the state of art)*, Przegląd Geologiczny, 64, 1, s. 26-34.
- Keogh E., Ratanamahatana C.A., 2005, *Exact indexing of dynamic time warping*, Knowledge and Information Systems, 7 (3), s. 358-386.
- Korzeniewski J., 2014, *Indeks wyboru liczby skupień w zbiorze danych*, Przegląd Statystyczny, t. LXI, z. 2, s. 169-180.
- Lindner L., Marks L., Nita M., 2012, *Climatostratigraphy of interglacials in Poland: Middle and Upper Pleistocene lower boundaries from a Polish perspective*, Quaternary International, <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2012.11.018>.
- Lisiecki L.E., Raymo M.E., 2005, *A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records*, Paleoclimatology, vol. 20, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071.
- Lisiecki L.E., Raymo M.E., 2007, *Plio-Pleistocene climate evolution: trends and transitions in glacial cycle dynamics*, Quaternary Science Reviews, 26, s. 56-69.
- Marks L., 2016, *Zmiany klimatu w holocenie*, Przegląd Geologiczny, 64, 1, s. 59-65.
- Mojski E., 2005, *Ziemia polskie w czwartorzędzie. Zarys morfogenezy*, PIG & MŚ, Warszawa.
- Mori U., Mendiburu A., Lozano J.A., 2015, *TSdist: Distance Measures for Time Series Data*. R package version 2.2, <http://CRAN.R-project.org/package=TSdist>.

- R Core Team (2015). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/> (12.09.2016).
- Schreiber T., Schmitz A., 1997, *Classification of Time Series Data with Nonlinear Similarity Measures*, Physical Review Letters 79, s. 1475-1478.
- Teisseyre P., 2010, *Porównanie szeregów czasowych z wykorzystaniem algorytmu DTW*, Złot użytkowników R, http://www.ipipan.eu/~teisseyrep/PUBLICATIONS/Teisseyre_DTW.pdf (4.08.2016).
- Tzedakis P.C., Wolff E.W., Skinner L.C., Brovki, V., Hodell D.A., McManus J.F., Raynaud D., 2012, *Can we predict the duration of an interglacial?*, Clim. Past, 8, s. 1473-1485, doi:10.5194/cp-8-1473-2012.
- Walesiak M., Gatnar E. (red.), 2009, *Statystyczna analiza danych z wykorzystaniem programu R*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.