

Adam WALANUS

Instytut Archeologii — Uniwersytet Rzeszowski

Paweł PROKOP

IGPZ PAN – Kraków

ELEMENTARNE PODEJŚCIE DO PROBLEMU CYKLICZNOŚCI W ZJAWISKACH KLIMATYCZNYCH

AN ELEMENTARY APPROACH TO THE QUESTION OF PERIODICITY IN CLIMATIC DATA

Problem cykliczności w zjawiskach klimatycznych. W szeregach czasowych danych klimatycznych nieustannie poszukuje się cykli o różnych okresach. Używa się w tym celu zarówno prostych, jak i bardzo zaawansowanych technik statystycznych. Wydłużanie serii pomiarowych w meteorologii oraz rekonstrukcje paleoklimatyczne umożliwiają poszukiwanie odbicia cyklicznych zmian klimatu w zapisie dendrologicznym, rdzeniach lodowych, osadach jeziornych czy rafach koralowych. Jednocześnie stale rosnąca ilość analiz sprzężeń zwrotnych w klimacie globalnym pokazuje złożoność interakcji systemu klimatycznego. Oczywiście cykliczności dobowej i sezonowej jest niepodważalna. Poszukiwanie cykliczności dłuższej niż rok, z możliwością użycia jej w praktyce np. w prognozowaniu, nastrocza znacznie więcej problemów. Znajdowane cykle są zwykle quasi-periodyczne, przy czym przedrostek quasi- ma oczywiście nie dość jasno określone znaczenie. Ich faza i amplituda są znane, nie jest natomiast znany mechanizm transmisji i źródło, czyli odpowiedni oscylator.

Próby poszukiwań oscylatorów obejmują siły zewnętrzne — astronomiczne, oraz siły wewnętrzne — oscylacje w obrębie samego systemu klimatycznego. Kluczowym zagadnieniem jest regularność oscylacji. O ile ruchy orbitalne planet cechuje duża regularność, to już sam wpływ promieniowania słonecznego na cy-

kliczność procesów klimatycznych w skali dłuższej niż rok jest dyskusyjny (Roderer, 1995).

Fizyczne zmiany w samym Słońcu występują prawie we wszystkich skalach czasowych, np. obecnie do Ziemi dociera ok. 20–30% promieniowania więcej niż w czasie początków jej powstania (Newman, Rood, 1977).

Najbardziej znane i najczęściej analizowane 3 oscylacje plam słonecznych są również quasi-periodyczne. Związek klimatu z 11-letnim (w rzeczywistości waha się od 9 do 13 lat) cyklem plam słonecznych były przedmiotem wielu studiów, wkrótce po jego odkryciu przez niemieckiego astronoma S. H. S c h w a b e ' a (1843). Amplituda promieniowania w cyklu nie przekracza 0,1% ($0,24 \text{ Wm}^{-2}$). Dla porównania H o u g h t o n i in. (za Bertrand, Ypersele, 1999) szacują, że gęstość strumienia energii związanego ze wzrostem antropogenicznej emisji gazów cieplarnianych od czasów przedprzemysłowych (1880 r.) do czasów obecnych osiągnęła ok. $2,4 \text{ Wm}^{-2}$, a więc dziesięciokrotnie przekracza oscylacje wynikające z cyklu 11-letniego.

Przejawy odkrytego przez G. E. H a l e ' a (1908) 22-letniego cyklu magnetycznego, który jest podwojonym cyklem plamotwórczym Słońca, również były znajdowane w wielu elementach klimatu, a nawet korelowane z zasięgami powodzi (Bhalme, Mooley, 1981).

Dużo miejsca poświęcono 80-letniemu (waha się w zakresie 72–83 lata) cyklowi plam słonecznych G l e i s s b e r g a (1958), zwłaszcza w związku z małą epoką lodową. Minimum tego cyklu w roku 1670, tzw. minimum Maundera, zbiega się z ochłodzeniem klimatu na półkuli północnej w latach 1645–1715 (Maunder, 1890, 1894; Eddy, 1976). L e a n i in. (1992) szacują, że w czasie minimum Maundera całkowita redukcja promieniowania słonecznego wyniosła ok. $2,7 \text{ Wm}^{-2}$, co może być już wartością istotną z punktu widzenia wahań klimatu.

Na cykle solarne nakłada się oddziaływanie grawitacyjne innych ciał niebieskich, z których Księżyc ma największe znaczenie. Jego 18,6 letni cykl, zbliżony do 22-letniego cyklu Hale'a, uwidacznia się prawdopodobnie w periodyczności 20-letniej, wykrywanej m.in. w przebiegach temperatury (Newell i in., 1989).

Obok wymienionego cyklu 20-letniego, jedynym wyraźnym cyklem w atmosferze ziemskiej jest oscylacja quasi-dwuletnia (Quasi-Biennial Oscillation — QBO, Burroughs, 1992), która polega na zmienności kierunku i siły wiatru w stratosferze równikowej, o okresie ok. 27 miesięcy (Lindzen, Holton, 1968). Amplituda QBO zmienia się wraz z wysokością, zanikając w tropopauzie równikowej, na wysokości ok. 16 km (Naujokat, 1986). Przejawy tej cykliczności są rozpoznane w elementach meteorologicznych różnych regionów kuli ziemskiej (Labitzke, van Loon, 1990).

Najwięcej problemów stwarza jednak geneza cykli w obrębie samego systemu klimatycznego. Przejawy Oscylacji Południowej (Southern Oscillation — SO) czy Oscylacji Północnoatlantyckiej (North Atlantic Oscillation — NAO) były znane żeglarzom i rybakom od wieków. Dopiero zastosowanie metod numerycznych

pozwoili G. Walkerowi (1924), brytyjskiemu matematykowi i wieloletniemu dyrektorowi Indyjskiej Służby Meteorologicznej, sformułować ich teoretyczne podstawy. Kilkadziesiąt lat później norweski meteorolog Bjerknes (1969) zauważył, że El Niño i SO to objawy tego samego zjawiska i po raz pierwszy użył nazwy ENSO (El Niño-Southern Oscillation). Pozostałe dwie, słabsze oscylacje — NAO i Dekadowa Oscylacja Pacyficzna (Pacific Decadal Oscillation — PDO), zwróciły uwagę meteorologów znacznie później (Rogers, 1984; Mantua i in., 1997). Najsilniejsza z nich — ENSO pojawia z okresem 2–5 lat i trwa 6–18 miesięcy, podczas gdy PDO trwa 20–30 lat. Znalezienie wieloletniej, statystycznie istotnej, periodyczności w NAO jest jeszcze trudniejsze (Wunsch, 1999). Jedyną wyraźną jest periodyczność quasi-dwuletnia, wspomniana przez Walkera (1924), oraz omówiona przez Stephensona i in. (2000). Bardzo słaba jest periodyczność w przedziale 3–6 lat, a nieco silniejsza w przedziale 8–10 lat, zwłaszcza w drugiej połowie XX wieku (Hurrell i in., 2003). Jakkolwiek wieloletnia zmienność NAO wydaje się być jedynie szumem klimatycznym, to nie da się całkowicie wykluczyć wpływu sił zewnętrznych (Feldstein, 2000). Wszystkie trzy najważniejsze oscylacje mają więc jedną wspólną cechę — dużą nieregularność.

Nieregularność oscylacji jest odbiciem złożoności systemu klimatycznego, wielości stopni swobody i z natury niestąej cyrkulacji atmosfery, przyczyniającej się do wszechobecnej, losowej zmienności. Może ona wynikać z różnicy w szybkości reakcji atmosfery w porównaniu z wolniej reagującym oceanem, czy globalnych zmian — powierzchnia półkuli północnej jeszcze nigdy nie była tak ciepła w ostatnim tysiącleciu jak obecnie.

Potwierdzenie nieliniowych reakcji w procesach klimatycznych znajdujemy w ogólnych modelach cyrkulacji atmosfery (Atmospheric General Circulation Model — AGCM, Hannachi, 2001). Modele te, wciąż dalekie od doskonałości, osiągają quasi-periodyczność charakterystyczną dla ENSO czy NAO (Meehl, Arblaster, 1998; Hurrell i in., 2003), chociaż nadal w zasadzie niewiadome pozostaje źródło samego zjawiska. Przeprowadzone doświadczenia wskazują także, że zjawiska takie jak ENSO, generowane w obrębie systemu klimatycznego, są jego naturalnymi oscylatorami (Graham, White, 1988).

Dane. W pracy wykorzystano sumy roczne opadów ze stacji europejskich, ze zbioru Global Historical Climate Network (GHCN) (Baker i in., 1994), uzupełnione dodatkowymi danymi z bazy European Climate Assessment (Klein Tank i in., 2002). Wybranie danych opadowych było, w pewnym sensie, dziełem przypadku, gdyż podobną analizę można przeprowadzić na przykładzie dowolnego elementu klimatycznego, np. temperatury czy ciśnienia atmosferycznego. Nacisk położony jest na metodę weryfikacji cykliczności.

Wybór stacji w Europie był podyktowany możliwością wykorzystania długich serii pomiarowych, które pozwalają na wykrycie oscylacji wieloletnich o różnych okresach, od 2 do — powiedzmy — 128 lat. Długie, 160-letnie serie pomiarowe

z okresu 1832–1992 wykorzystano do zbadania cykliczności na przekroju równoleżnikowym w przybliżeniu wzdłuż $51^\circ\varphi$ N (7 stacji) oraz południkowym w przybliżeniu wzdłuż $12^\circ\lambda$ E (11 stacji). Do analizy przestrzennej w całej Europie użyto danych z 46 stacji i 128-letniego okresu 1864–1992.

Dane opadowe na przekrojach mogą wykazywać zależność sygnału od odległości od oscylatorów, jakimi są np. NAO czy ENSO. Opady analizowane na obszarze całej Europy mogą podlegać innym regułom i wykazywać zróżnicowanie regionalne, np. inne na obszarze Skandynawii niż w basenie Morza Śródziemnego.

Pojedyncze stacje mogłyby wprawdzie podlegać małoskalowym procesom periodycznym, które nie są związane z żadnym globalnym oscylatorem, jednak stacje sąsiednie powinny wykazywać obecność oscylacji o tym samym okresie.

Cykliczność w czasie i przestrzeni. Bez względu na to, czy źródeł cykliczności, czyli potencjalnych oscylatorów, spodziewamy się w kosmosie czy na obszarze Atlantyku Północnego, a może zupełnie lokalnie, w skali dorzecza, warto zobaczyć rozkład przestrzenny cykliczności na mapie. Mając do dyspozycji 46 stacji opadowych w Europie, można spróbować poszukać cykliczności w pewnych jej częściach.

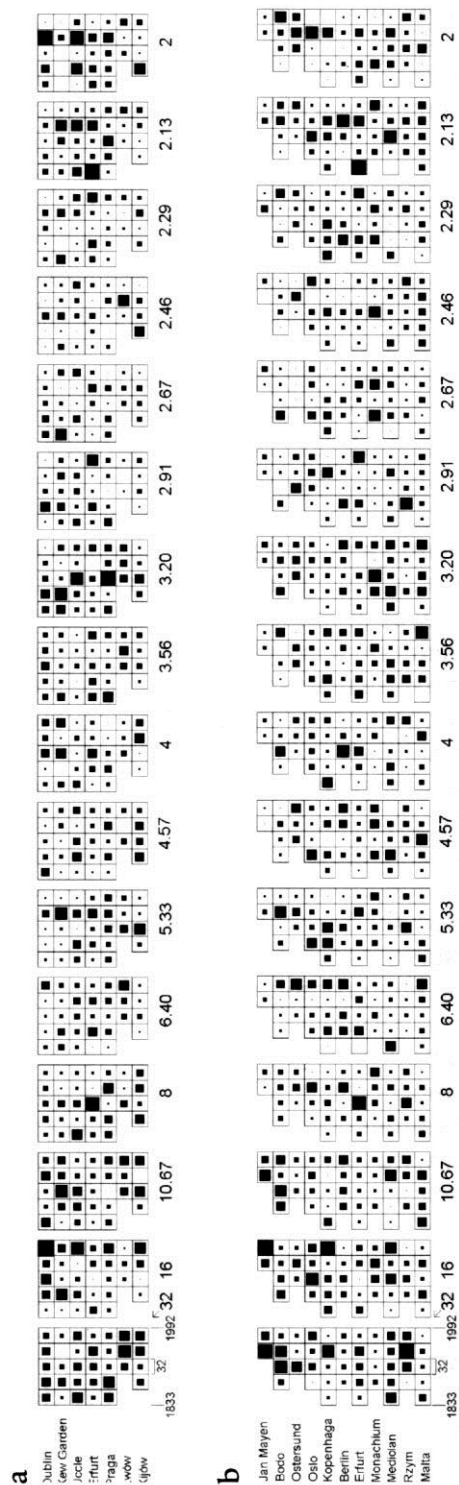
Podobnie, dysponując szeregami czasowymi o długości rzędu 100–200 lat, można się pokusić o przegląd cykliczności w różnych odcinkach tego czasu. Oczywiście konieczne będzie w tym przypadku ograniczenie długości fragmentów szeregów, a co za tym idzie ograniczenie długości badanych okresów i ograniczenie rozdzielczości w okresach krótkich. W tej pracy, na zasadzie przykładu, zdecydowano się na podział 160-letniego odcinka czasu (1832–1992) na 5 rozłącznych odcinków 32 letnich ($32 \times 5 = 160$). Znaczenie faktu, że analizowano rozłączne odcinki, omówione będzie dalej.

Mapa jest dwuwymiarowa, dodanie wymiaru czasu powoduje, że cykliczność miałaby być badana w punktach trójwymiarowej przestrzeni. Dlatego wymiary przestrzenne ograniczono do dwóch przekrojów.

Do przekroju W–E wybrano 7 stanowisk (rys. 1). Tak więc rozdzielczość przestrzenna analizy jest taka, że na rozciągłości Europy mamy 7 niezależnych punktów (oczywiście rozłożonych nierównomiernie). Rozdzielczość czasowa określona jest długością odcinka 32-letniego.

Wynikiem standardowej analizy fourierowskiej (FFT) szeregu czasowego o długości 32 lata ($32 = 2^5$) jest 16 amplitud składowych periodycznych o okresach jak na rysunku.

Do przedstawienia na wykresie jest więc $13 \times 5 \times 16$ punktów, których wielkość jest proporcjonalna do amplitudy. Wykres mógłby być trójwymiarowy, co jednak jest niepraktyczne, dlatego zdecydowano się na serię wykresów dwuwymiarowych. Dwie z trzech wielkości przedstawić można na osiach X i Y, a trzecią jako opis kolejnych wykresów z serii. Ponieważ stanowiska na przekroju są w oczywisty sposób powiązane ze sobą i ich kolejność nie jest przypadkowa, zdecydo-



Rys. 1. Amplituda składowych periodycznych (przedstawiona za pomocą wielkości kwadratów): a) na przekroju W-E, b) na przekroju N-S. Podane są amplitudy dla rozłącznych, 32-letnich odcinków czasu i dla wszystkich okresów, dostępnych w analizie FFT dla szeregu 32 pomiarów. Każdy z 16 osobnych wykresów dotyczy innej cykliczności (od $T = 32$ lata do $T = 2$ lata). Istotne występowanie składowej periodycznej powinno uwidocznić się występowaniem grup sąsiadnych (w czasie i przestrzeni), większych amplitud

Fig. 1. Amplitude of periodic components (illustrated by black square size): a) in W-E transect, b) in N-S transect. Amplitudes are given for non-overlapping 32 years long periods, and for each period given by FFT analysis for 32 point time series. Each of 16 charts represents different periodicity (from $T = 32$ years to $T = 2$ years). If some periodicity is expected to be statistically significant it should manifest as group of neighbouring large squares, on the plot for given period T

wano, że kolejność stanowiska na przekroju musi być przedstawiana na osi. Wybrano do tego oś Y (pionową). Równie, a nawet bardziej oczywista jest kolejność analizowanych 32-letnich odcinków. Dlatego czas odłożono również na osi (X-poziomej). Z konieczności otrzymano 16 wykresów X-Y z kolejnych okresów. Oczywiście okresy również mają naturalną kolejność, od najkrótszego (2 lata) do najdłuższego (32 lata).

Jeżeli oczekuje się nieprecyzyjnych cykliczności, to można spodziewać się, że ujawnią się one w kilku sąsiednich okresach (oknach widmowych). W takim przypadku zaproponowane przedstawienie wyniku jest niekorzystne, gdyż większych amplitud trzeba byłoby szukać na tej samej pozycji (X, Y) na sąsiednich wykresach, co nie będzie łatwe. Jeżeli jednak spodziewamy się bardziej ścisłych cykli (a pamiętać trzeba, że przy zaledwie 32-letnim szeregu rozdzielczość okresów nie jest duża), nie powinno to być przeszkodą.

Zagadnienie istotności amplitud składowych periodycznych. Analiza Fouriera polega na rozłożeniu szeregu czasowego na pewną liczbę składowych absolutnie periodycznych (sinusoid). W przypadku szeregu 32-letniego takich składowych jest 32. Jeżeli nie interesujemy się fazą cyklu, to liczba ta redukuje się do 16. Tak więc niejako z definicji każdy analizowany szereg składa się po prostu z 16 składowych periodycznych, nawet gdyby był czystym szumem losowym. Oczywiście w przypadku szumu amplitudy składowych periodycznych są mniej więcej równe, żadna nie jest istotnie większa od innej. Jeżeli któraś z amplitud jest wyraźnie większa, to możemy przypuszczać „realne” istnienie składowej periodycznej w analizowanym szeregu.

Mając ponad tysiąc ($13 \times 5 \times 16$) amplitud trzeba się spodziewać, że niektóre z nich będą wyraźnie większe od średniej. Elementarne rozumowanie statystyczne wskazuje, że prawdopodobne jest przekroczenie poziomu istotności $\alpha = 0,001$, a więc bardzo „ostrego”. W naukach przyrodniczych zwykle stosuje się poziom istotności $\alpha = 0,05$. Przy takim standardowym poziomie nawet przy losowym szumie powinno się otrzymać 50 amplitud „istotnych statystycznie”.

Rysunek 1 stanowi propozycję innego podejścia do weryfikacji istotności statystycznej amplitud. Otóż ze względu na oczywistą, przyrodniczą zależność sąsiednich punktów (kwadratów) na wykresach, można się spodziewać wystąpienia większych amplitud składowych periodycznych nie w pojedynczych punktach, ale w seriach (może tylko 2-3 elementowych) sąsiednich punktów. Należy podkreślić, że punkty są statystycznie niezależne, gdyż otrzymane zostały z różnych szeregów czasowych (oś Y) i z różnych fragmentów danego szeregu (oś X). (Statystyczna niezależność ma tu sens niezależności pomiarowej, tzn. do różnych analiz FFT wchodziły różne pomiary.)

Fakt, że na rys. 1 umieszczone są odrębne punkty, a nie jest to ciągły obraz, na przykład izoliniowy, ma zasadnicze znaczenie dla weryfikacji istotności amplitud.

Na ciągłym obrazie zawsze wystąpią maksima, co do których można będzie przypuszczać, iż istotnie odpowiadają rzeczywistym cyklom, lecz tezę taką trudno będzie zweryfikować.

Tak więc poszukiwanie na rys. 1 klimatycznie istotnych cykli może polegać na szukaniu klastrow większych amplitud, gdyż trudno spodziewać się wystąpienia cykliczności tylko na jednym stanowisku i tylko w ciągu krótkiego czasu rzędu 30 lat. Można tu stosować następującą regułę: istotna może być cykliczność ujawniająca się w niewielu punktach (zasadniczo nawet w jednym), ale z dużą amplitudą, podobnie jak istotna może być cykliczność o niezbyt dużej amplitudzie, ale konsekwentnie, w większej liczbie sąsiednich punktów.

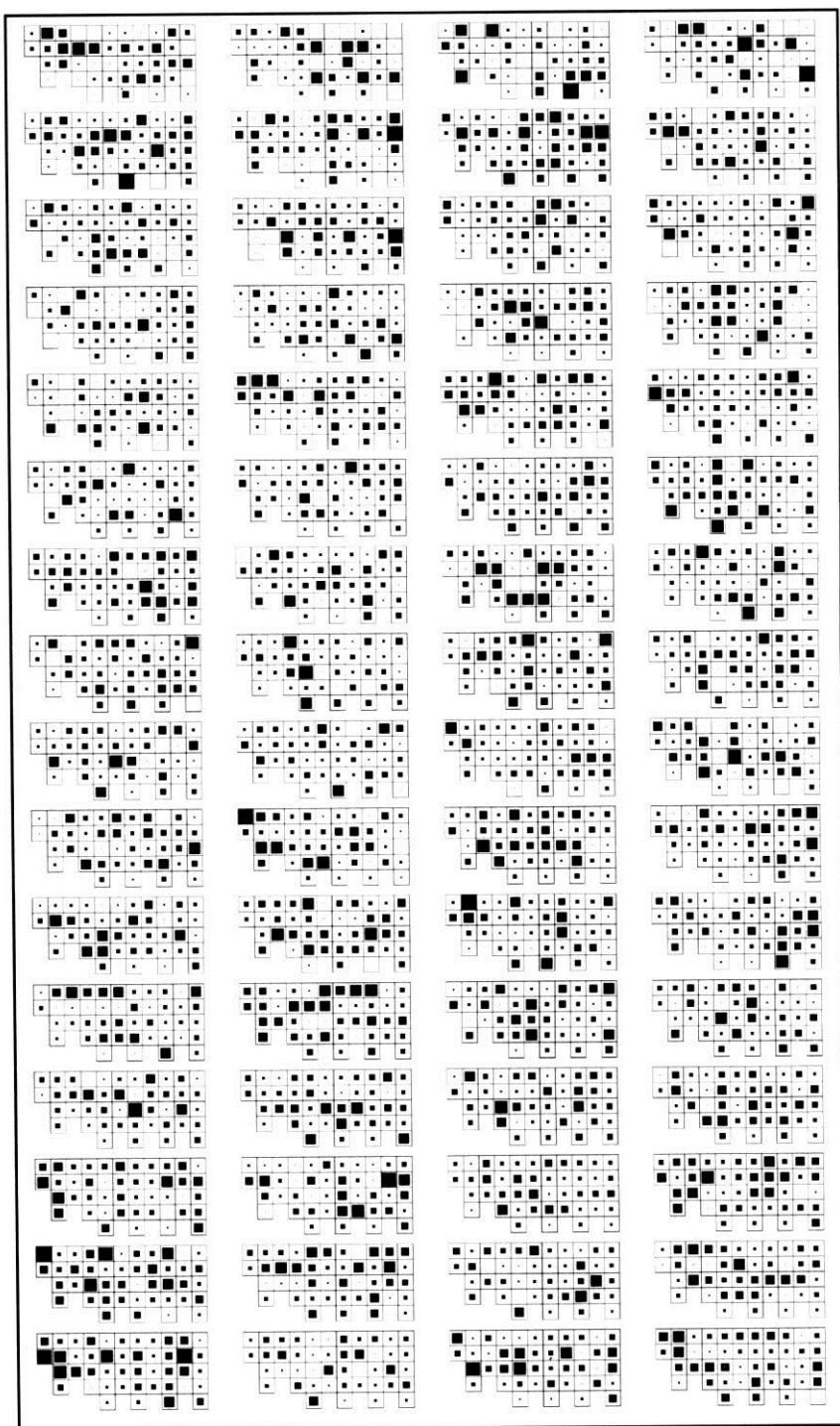
Hipoteza zerowa o braku cykliczności. W typowej procedurze testowania hipotez statystycznych używa się hipotezy zerowej, która w tym przypadku brzmiałaby: w badanych szeregach czasowych nie ma periodyczności, szeregi te są zapisem szumu. W zaproponowanej, heurystycznej, oglądowej procedurze szukania istotnych cykli, wykresy z rys. 1 można porównać z analogicznymi wykresami otrzymanymi przy założeniu takiej właśnie „hipotezy zerowej”. Na rysunku 2 dla porównania powtórzone jest wykres z rys. 1b, a pod nim znajdują się trzy podobne wykresy, jednak otrzymane po wcześniejszym wymieszaniu liczb w ramach każdego szeregu (i każdego stanowiska). Jeżeli w rzeczywistych szeregach są jakieś cykle, to górny wykres na rys. 2 powinien różnić się od trzech dolnych nierównomiernością rozkładu większych kwadratów. Takiego efektu, czarnych plam, jednak nie widać.

Zaproponowana metoda nie charakteryzuje się bardzo wysoką czułością; pojedyncza, konsekwentna cykliczność o kilkuprocentowej amplitudzie, występująca w jednym szeregu, może zostać niezauważona.

Celem przedstawienia rys. 1 i 2 jest zwrócenie uwagi na fakt, że cykliczności jeżeli są, to nie są ewidentne i, co najwyżej bardzo słabo zaznaczają się na tle szumu.

Elementarne podejście, polegające na zastosowaniu fourierowskiego rozkładu szeregu czasowego na składowe periodyczne, ma tę zaletę w dziedzinie metodycznej, iż nie podlega zarzutowi dobierania metod do hipotezy. FFT jest metodą najprostszą. Również analizowanie osobnych szeregów, a nie np. składowych głównych, obliczonych z wielu szeregów (Qian i in., 2000) odpowiada pewnej „elementarności”, a także analizowanie krótkich, „elementarnych” odcinków czasu.

Podobnie jeśli rozbić szereg roczny na 12 szeregów danych miesięcznych (lub kilka szeregów danych sezonowych), rośnie prawdopodobieństwo znalezienia cykliczności na zasadzie przypadku. Element losowości w danych uśrednionych (rocznych) jest mniejszy. Teoretycznie jest nieskończenie wiele kombinacji liniowych danych miesięcznych, które to kombinacje można by uzasadniać faktem, że niektóre miesiące mogą mieć związek dodatni, a inne ujemny z plamami na Słońcu.



Rys. 2. Porównanie amplitud składowych periodycznych (dane jak na rys. 1b) w szeregach rzeczywistych (górny wykres) i szeregach losowych, otrzymanych przez mieszanie kolejności lat (wygenerowano 3 przypadki)

Fig. 2. Comparison of periodicity in real data (from Fig. 1b) — upper plot, with the same data randomized (shuffled) — three lower plots. It is difficult to find significant difference between the first plot and the next plots, obtained for data which contain essentially no periodicity

Weryfikacja hipotezy o cykliczności za pomocą mapy. Bardziej naturalne od rysowania przekrojów jest przedstawianie wyników po prostu na mapach. O ile jednak redukcja powierzchni Europy do jednego wymiaru pozwoliła umieścić na rysunku wszystkie okresy, a nawet było możliwe rozpatrzenie zmian w czasie, to na mapie w zasadzie można umieścić jedną wielkość. Niech na zasadzie przykładu, wielkością tą będzie amplituda składowej periodycznej $T = 3,5$ roku, w całym badanym okresie 1864–1992.

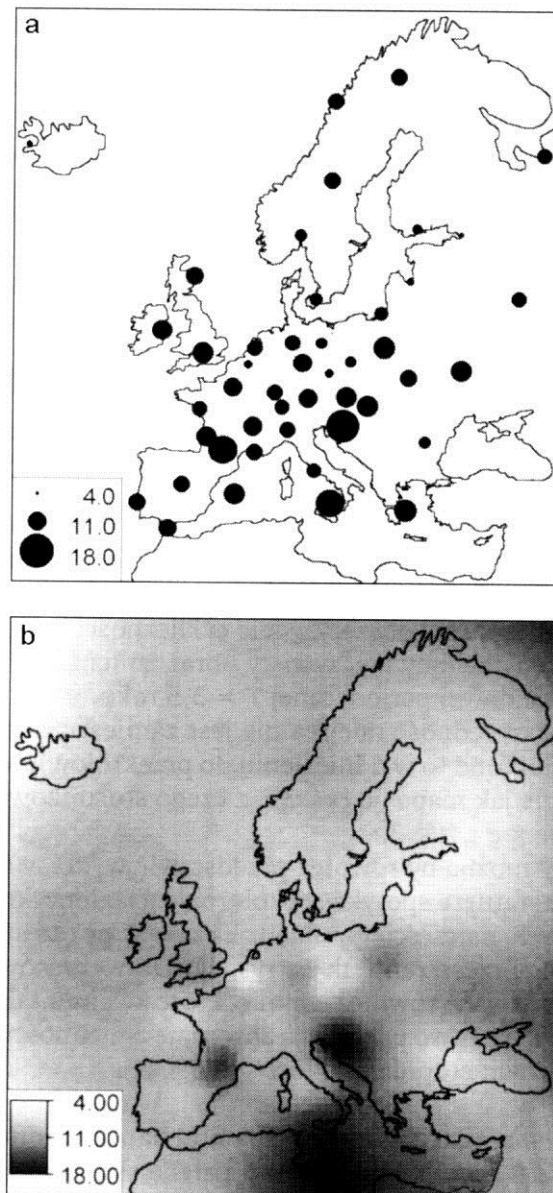
Na podobnej zasadzie jak na poszczególnych elementach (dotyczących jednego okresu T) rysunków z przekrojami, na mapie można poszukiwać regularności, która powinna wystąpić, jeżeli cykliczność nie jest tylko losową fluktuacją, inną na każdej stacji. Na mapie dyskretnej (rys. 3a), która tylko tym się różni od wykresów z przekrojami, że zamiast kwadratów są kółka, poszukiwanie periodyczności można realizować dość obiektywnie. Jak widać, jeżeli jakkolwiek prawidłowość tu występuje, to jedynie ta, że większe amplitudy występują na południu Europy.

Mapa ciągła (rys. 3b), która mogłaby też zawierać izoamplitudy, jest tu przedstawiona w celu wykazania, jak ważny w subiektywnej ocenie zjawiska jest sposób prezentacji danych. Otóż patrząc na mapę (rys. 3b) łatwo znajduje się „oczywiste” siedliska cykliczności i obszary, gdzie cykliczności brak. Nie ma tu wątpliwości, że został przedstawiony rzeczywisty obraz zmienności na obszarze Europy występowania składowej periodycznej $T = 3,5$ roku.

Ze względu na oszczędność miejsca nie jest zamieszczona mapa ciągła liczb losowych (tak jak zrobiono to w odniesieniu do przekrojów). Mapa taka wyglądałaby bardzo podobnie jak mapa na rys. 3b, z czego stosunkowo łatwo zdać sobie sprawę patrząc na mapę z rys. 3a.

W sposób ciągły można by również przedstawić wykresy składowe dla przekrojów. Często w literaturze spotyka się kolorowe, ciągłe wykresy amplitud składowych periodycznych, najczęściej w układzie czas-okres (częstotliwość), ale również w układzie czas-przestrzeń (jak na rys. 1). Do wykresów takich, podobnie jak na mapach, są dodawane również izolinie, które kwantyfikując amplitudę składowej periodycznej dodatkowo przypisują znaczenie zmienności cykliczności, która przynajmniej w pewnym stopniu jest losowa.

Cykliczność w szeregach czasowych a mechanizm generujący oscylacje. Jeżeli zgodzić się, że w zapisie opadu istnieją słabe składowe periodyczne (w zasadzie mogą one być dowolnie słabe i niewidoczne), to pozostaje otwarte pytanie o ich przyczynę. Cykle generuje oscylator. Znalezienie mechanizmu oscylatora skojarzonego z zaobserwowanymi oscylacjami rozwiązuje problem. Znalezienie przyczyny zjawiska jest zwykle celem badań. Jednak ewidentny, 11-letni oscylator na Słońcu (o niezbyt jasnym mechanizmie) niekoniecznie objawia się w ziemskich szeregach czasowych. Warto tu przypomnieć uwagę techniczną, że każdy szereg można rozłożyć na składowe sinusoidalne, w związku z czym każdy szereg



Rys. 3. Mapy Europy z naniesionymi względnymi wartościami amplitudy składowej periodycznej $T = 3,5$ roku: a — mapa punktowa, dyskretna, b — mapa ciągła. Na mapie dyskretniej (a) widoczny jest brak regularności, mapa ciągła (b) stwarza pozory pewnej regularności, a więc i istotności maksimów

Fig. 3. Maps of Europe with presented relative amplitude of periodic component $T = 3.5$ yr: a — point map, b — continuous map. Maps give quite different ideas about the pattern of periodicity. On map (a) almost no regular pattern is visible, while map (b) suggests precise, smooth variability of periodic component over Europe

będzie miał składową 11-letnią, co nie może automatycznie oznaczać relacji ze Słońcem. O wpływie plam słonecznych można by wnioskować w przypadku, gdyby amplituda składowej 11-letniej była duża, jednak jak duża musiała by być, to zawsze we wnioskowaniu statystycznym jest sprawą otwartą. Tymczasem wiadomo, że jakiegokolwiek składowe periodyczne, poza sezonową, dużych amplitud nie mają. Ważna przy korelowaniu oscylatora z szeregiem czasowym jest synchroniczność, szczególnie przy stosunkowo szerokim widmie oscylatora. W przypadku plam słonecznych, w szeregu czasowym musiałoby się odzwierciedlić np. minimum Maundera.

Inaczej wygląda sprawa cyklu $T = 3,5$ lat, którego oscylatora dotąd nie znaleziono. W takiej sytuacji nie można wykluczyć, iż oscylatora nie ma, a cykliczność jest fluktuacją (Walanus, Soja, 1996).

Wnioski. Analizując dużą liczbę szeregów czasowych średnich rocznych danych klimatycznych możemy znaleźć stosunkowo duże amplitudy o dowolnym okresie, co może prowadzić do wyciągnięcia błędnych wniosków o istnieniu cykliczności.

Załączony przykład pokazuje z jednej strony, jak łatwo „uzyskać” quasi-cykliczność, z drugiej — jak trudno oddzielić szum od ewentualnej statystycznie istotnej periodyczności. Istnienie oscylatorów quasi-periodycznych, nawet o małym wpływie na atmosferę ziemską, wywołuje pokusę arbitralnego uznania każdej oscylacji w szeregu danych klimatycznych, np. o okresie między 10–12 lat, za wynik wpływu plam słonecznych, a o okresie między 3–5 lat za wynik wpływu ENSO, nawet bez sprawdzania statystycznej istotności.

Najlepsze, co możemy na razie powiedzieć, to to, że zakłócenia w systemie klimatycznym mogą dać quasi-cykliczną odpowiedź, która zachowuje się w sposób bardziej przewidywalny w jednej lub dwu oscylacjach, aby potem ponownie zamienić się w szum lub pojawić się w innym czasie, w dowolnym miejscu.

Materiały wpłynęły do redakcji 4 III 2004 r.

Literatura

- Baker C. B., Eischeid J. K., Karl T. R., Diaz H. F., 1994, *The quality control of long-term climatological data using objective data analysis*. Preprints of AMS Ninth Conference on Applied Climatology, Dallas, TX., January 15–20, 1995.
- Bertrand C., Van Ypersele J. P., 1999, *Potential role of solar variability as an agent for climatic change*. Climatic Change, t. 43, s. 387–411.
- Bhalme H. N., Mooley D. A., 1981, *Cyclic fluctuations in the flood area and relationship with the double (Hale) sunspot cycle*. J. of Appl. Met., t. 20, s. 1041–1048.
- Bjerknes J., 1969, *Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific*. Mon. Wea. Rev., t. 97, s. 163–172.

- Burroughs W. J., 1992, *Weather cycles: real or imaginary?* Cambridge Univ. Press.
- Eddy J. A., 1976, *The Maunder Minimum*. Science, 192, s. 1189–1202.
- Feldstein S. B., 2000, *Teleconnections and ENSO: The timescale, power spectra and climate noise properties*. J. Climate, t. 13, s. 4430–4440.
- Gleissberg W., 1958, *The eighty-year sunspot cycle*. J. Brit. Astr. Assoc., t. 68, ss. 148.
- Graham N. E., White W. B., 1988, *The El Niño cycle: A natural oscillator of the Pacific Ocean-Atmosphere system*. Science, 240, s. 1239–1302.
- Hale G. E., 1908, *On the probable existence of a magnetic field in sunspots*. The Astrophysical Journal, 28, s. 315–343.
- Hannachi A., 2001, *Toward a nonlinear identification of the atmospheric response to ENSO*. J. Climate, t. 14, s. 2138–2149.
- Hurrell J. W., Kushnir Y., Ottersen G., Visbeck M., 2003, *An overview of the North Atlantic Oscillation*, [W:] *The North Atlantic Oscillation: climatic significance and environmental impact*. Geophysical Monograph 134, AGU.
- Klein Tank A. M. G., Coauthors, 2002, *Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment*. Int. J. Climatol., t. 22, s. 1441–1453.
- Labitzke K., van Loon H., 1990, *Associations between the 11-year solar cycle, the quasi-biennial oscillation and the atmosphere: a summary of recent work*. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 330, s. 577–589.
- Lean J., Skumanich A., White O., 1992, *Estimating the Sun's radiative output during the Maunder Minimum*. Geophys. Res. Lett., t. 19, s. 1591–1594.
- Lindzen R. S., Holton J. R., 1968, *A theory of the Quasi-Biennial Oscillation*. J. Atm. Sc. 25, s. 1095–1107.
- Mantua N. J., Hare S. R., Zhang Y., Wallace J. M., Francis R. C., 1997, *A Pacific Decadal Climate Oscillation with impacts on salmon*. Bull. Amer. Meteor. Soc., t. 78, s. 1069–1079.
- Maunder E. W., 1890, *M. Thollon's Atlas of the Solar Spectrum*. Mon. Not. R. Astron. Soc., 51, ss. 251.
- Maunder E. W., 1894, *The Tenuity of the Sun's Surroundings*. Knowledge, 17, 173, s. 49–50.
- Meehl G. A., Arblaster J. M., 1998, *The Asian-Australian monsoon and El Niño-Southern Oscillation in the NCAR Climate System Model*. J. Climate, t. 11, s. 1356–1385.
- Naujokat B., 1986, *An update of the observed Quasi-Biennial Oscillation of the stratospheric winds over the tropics*. J. Atmos. Sci., t. 43, s. 1873–1877.
- Newell N. E., Newell R. E., Hsuing J., Wu Z., 1989, *Global marine temperature variation and the solar magnetic cycle*, Geophys. Res. Lett., t. 16, s. 311–314.
- Newman M. J., Rood R. T., 1977, *Implications of solar evolution for Earth's early atmosphere*. Science, 198, s. 1035–1037.
- Qian B., Xu H., Corte-Real J., 2000, *Spatial-temporal structures of quasi periodic oscillations in precipitation over Europe*. Int. J. Climatol., t. 20, s. 1583–1598.
- Rogers J. C., 1984, *The association between North Atlantic Oscillation and the Southern Oscillation in the northern hemisphere*. Mon. Wea. Rev., t. 112, s. 1999–2015.
- Roederer J. G., 1995, *Solar variability effects on climate*. [W:] Frenzel B. (red.), *Solar output and climate during the Holocene*. Palaeoclimate Research, t. 16, s. 1–21.
- Schwabe S. H. 1843, *Astronomische Nachrichten*, 20, nr 495, s. 234–235.
- Stephenson D. B., Pavan V., Bojariu R., 2000, *Is the North Atlantic Oscillation a random walk?* Int. J. Climatol., t. 20, s. 1–18.
- Walanus A., Soja R., 1996, *Statistical significance level in the method of fitting of many sine curves to the data series*. [W:] Obrębska-Starkel B., Niedźwiedź T. (red.) *Proceedings of the International Conference on Climate Dynamics and the Global Perspective, Cracov, October 17–20 1995*, s. 269–274.
- Walker G. T., 1924, *Correlation in seasonal variations of weather*. Mem. Indian Meteor. Dept., 24, IX, s. 275–332.
- Wunsch C., 1999, *The interpretation of short climate records, with comments on the North Atlantic Oscillation and Southern Oscillation*. Bull. Amer. Meteor. Soc., 80, s. 245–255.

Summary

The paper presents an elementary approach to the problem of periodicity in climatic data. The basic method applied in this study is the Fourier analysis (FFT). The periodicity was searched on the basis of long term instrumental precipitation data for 46 European stations for the period of 1832–1992, and for W–E and N–E transects for the period 1864–1992. The evidence of cycles in the range 2 to 128 years was examined in terms of their being of natural variability of climate system, or the result of external forcing. The complexity of the climate system with large number of degrees of freedom, and the unstable nature of atmospheric circulation causing difficulties in distinguish real periodicity from noise. The result show that it is relatively easy to obtain quasi-periodicity in climatic data however it is very difficult to find them statistically significant. We can said that disturbances in climate system can produce a quasi-periodic response which behaves sometimes as an oscillation before disappearing back into the noise or appearing in other place and other time.