

TRIFOUR
– PROGRAM DO ANALIZY CYKLICZNOŚCI
SEKWENCJI DENDROCHRONOLOGICZNYCH

**TRIFOUR – a computer program for cyclicity analysis
of dendrochronological sequences**

Andrzej J. KRAWCZYK

*Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska,
Zakład Geologii Podstawowej i Ochrony Środowiska;
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: akraw@geolog.geol.agh.edu.pl*

Treść: W artykule przedstawiono program *TRIFOUR*, przeznaczony do poszukiwania trendu oraz analizy cykliczności w sekwencjach dendrochronologicznych. Program akceptuje dane wejściowe zapisane w kilku formatach (m.in. *TUCSON* i *CRN*). Analiza może być prowadzona zarówno dla całej sekwencji, jak i dla pewnego jej fragmentu lub dla wielu fragmentów jednocześnie. Program oblicza współczynniki trendów wielomianowych, wykładniczych, potęgowych, hiperbolicznych i liniowych oraz trendy typu średnich ruchomych, a bieżące oszacowanie trendu może wykorzystać do przekształcenia analizowanej sekwencji w sekwencję indeksów dendrochronologicznych. W ramach analizy cykliczności obliczane są wartości empirycznej funkcji autokorelacji, periodogramu i gęstości spektralnej; dzięki opcji podziału sekwencji na odcinki o jednakowej lub dowolnej długości można śledzić ich zmienność w czasie. Zarówno same sekwencje, jak i wszystkie wyniki obliczeń są zapisywane na dysku w plikach graficznych lub/i tekstowych.

Słowa kluczowe: programowanie, dendrochronologia, cykliczność

Abstract: The paper presents the *TRIFOUR* software designed for trends and cyclicity analyses of dendrochronological sequences. The software accepts data written in several formats (e.g. *TUSCON* and *CRN*). Analysis can be run for the full sequence, for a selected fragment or simultaneously for several selected fragments of data sequence. The software calculates coefficients of polynomial, exponential, involute, hyperbolic, linear and moving-average trends. Current trend estimation can be applied to transformation of analyzed sequence into dendrochronological indexes sequence. Cyclicity analysis includes values of empirical correlation function, periodogram and spectral density. Sequence fragmentation into equal- or random-length parts enables recognition of their variability with the time. Both the sequences and all results are recorded into hard disc as graphic and/or text files.

Key words: programming, dendrochronology, cyclicity

WPROWADZENIE

Badania dendrochronologiczne, dla których danymi wejściowymi są najczęściej pomierzone sekwencje grubości przyrostów rocznych drzew, z natury rzeczy muszą posługiwać się różnymi metodami matematycznymi. Metody te są wykorzystywane już w trakcie wykonywania pomiarów, kiedy trzeba „uśrednić” zmierzone w kilku promieniach przyrosty, by otrzymać sekwencję osobniczą, charakteryzującą dane drzewo (por. np. Krapiec 1995). Nie odgrywają one tu jeszcze co prawda roli decydującej, ale w wielu przypadkach pomagają wyjaśnić wątpliwości pojawiające się przy wizualnej korelacji promieni.

W następnym etapie badań metody matematyczne wysuwają się na plan pierwszy. Sekwencje osobnicze zawierają bowiem z reguły mniej lub bardziej wyraźne trendy, związane z naturalnym wzrostem drzewa (Cook & Kairiukstis 1989, Schweingruber 1993 z literaturą tam cytowaną). Ponieważ trendy te są silnie uwarunkowane lokalnymi czynnikami środowiskowymi, jak również indywidualnymi cechami drzewa, należy je wyeliminować przed przystąpieniem do analiz porównawczych, opartych na wielu sekwencjach osobniczych (a więc np. przed konstrukcją standardów i skal dendrochronologicznych). Prowadzi to do zastąpienia oryginalnych danych pomiarowych (grubości przyrostów rocznych) tzw. indeksami, czyli wartościami wynikającymi z podzielenia wartości zmierzonych przez odpowiadającą im wartość trendu (rzadziej – różnicami między wartościami zmierzonymi a trendem).

Niestety, postać trendu nigdy nie jest *a priori* znana i musi być arbitralnie ustalona przez badacza. Dlatego często trend jest dobierany wizualnie, co w praktyce prowadzi do niemal całkowitej dowolności i może być przyczyną kolejnych błędnych interpretacji. Tymczasem odpowiednie, proste metody matematyczne mogą tę dowolność w znacznym stopniu ograniczyć. Nie da się co prawda uniknąć konieczności subiektywnego wyboru klasy funkcji mającej reprezentować trend, ale w obrębie wybranej klasy można już zastosować algorytmy, które precyzyjnie i jednoznacznie obliczą wszystkie współczynniki (np. za pomocą metody najmniejszych kwadratów). Biorąc pod uwagę fakt, że niektóre klasy funkcji – w szczególności klasa wielomianów – są bardzo ogólne i elastyczne w tym sensie, że dobrze odzwierciedlają trendy bardzo różnych ciągów danych, trudno przecenić znaczenie omawianej procedury.

Kluczowa jest także rola metod matematycznych przy sporządzaniu wszelkiego typu skal dendrochronologicznych, kiedy trzeba zestawiać bardzo wiele sekwencji osobniczych. Stosuje się tu przede wszystkim aparat teorii korelacji (Cook & Kairiukstis 1989, Krapiec 1995), pozwalający ściśle określić optymalne położenie każdej sekwencji składowej na wspólnej skali czasu, a nadto – ocenić statystyczną istotność związanego z tym położeniem współczynnika korelacji.

W ostatnich latach coraz większe zainteresowanie budzą możliwości wykorzystania danych dendrochronologicznych w paleoekologii i paleoklimatologii. Wychodząc z oczywistego założenia, że tempo wzrostu drzew (a więc i grubość przyrostów rocznych) jest bezpośrednio związane z panującymi w środowisku warunkami – zwłaszcza z temperaturą i wilgotnością – prowadzi się intensywne badania zmierzające do wypracowania zasad interpretacji sekwencji dendrochronologicznych jako jednego ze wskaźników paleoklimatycznych (np. Fritts 1976, LaMarche 1978, Briffa *et al.* 1996, Frenzel *et al.* 1996, Krawczyk & Krapiec 1999). Zaowocowało to nie tylko znacznym poszerzeniem arsenału stosowanych metod ilościowych, ale nawet opracowaniem nowych, specjalnie do tego celu przeznaczonych (Briffa & Cook 1989). Co prawda uzyskiwane wyniki nie są jeszcze w pełni zadowalające, ale metodyka jest stale rozwijana i dobrze rokuje na przyszłość.

Istotnym elementem tych badań jest poszukiwanie w sekwencjach dendrochronologicznych wszelkich przejawów cykliczności, w tym zwłaszcza – cykliczności wywołanej periodycznie zmienną aktywnością Słońca, której wpływ na ziemski klimat jest od dawna dostrzegany, choć zapewne nie do końca jeszcze wyjaśniony (por. np. LaMarche & Fritts 1972, Mori 1981, Kurths *et al.* 1993, Keqian Zhou & Butler 1998, Raspopov *et al.* 2001, Rigozo *et al.* 2002, Krawczyk & Krapiec 2003a, b, Nordemann *et al.* 2005). Prowadzi to w sposób naturalny do metod teorii szeregów czasowych, bowiem każdy dendrogram (sekwencję osobniczą lub chronologię) można traktować jako dyskretny szereg czasowy, czyli uporządkowany w czasie ciąg danych pomiarowych (szerokości przyrostów rocznych), przy czym odstęp pomiędzy kolejnymi elementami ciągu jest stały i wynosi rok.

Matematyczne metody analizy takich danych są dobrze znane (zob. np. podręczniki: Bendat & Piersol 1976, Box & Jenkins 1983, Zieliński 2002) i obejmują przede wszystkim tzw. analizę spektralną (fourierowską), zwykle sprzężoną z analizą autokorelacji, a ostatnio także – analizę falkową. Niestety, wysoki stopień zaawansowania leżącej u ich podstaw teorii i komplikacje obliczeniowe powodują, że nie są one jeszcze w dendrochronologii rozpowszechnione (podobnie zresztą, jak w wielu innych naukach przyrodniczych, w których mogłyby być z powodzeniem stosowane). Dlatego wydaje się, że bardzo ważne jest posiadanie narzędzia pozwalającego na usunięcie przynajmniej drugiego z wymienionych ograniczeń, czyli trudności rachunkowych.

Prezentowany program *TRIFOUR* jest propozycją takiego właśnie narzędzia. W swojej obecnej (pierwszej!) wersji nie implementuje on co prawda jeszcze wszystkich godnych uwagi metod i technik obliczeniowych, ale mimo to może stanowić istotną pomoc dla dendrochronologów zajmujących się analizami środowiskowymi.

Należy wyraźnie podkreślić, że wszystkie obliczenia wykonywane przez program *TRIFOUR* można zrealizować w istniejących i dostępnych na rynku (choć nieraz dość kosztownych) programach profesjonalnych, w szczególności w popularnym pakiecie *STATISTICA*, jest to jednak połączone z koniecznością przezwyciężenia całego szeregu trudności.

Pierwsze polega na tym, że wyniki pomiarów grubości przyrostów rocznych i inne dane dendrochronologiczne zapisywane są w kilku standardowych formatach. Są to albo formaty binarne, których odczytanie wymaga odpowiedniego oprogramowania, albo (częściej) specjalne formaty tekstowe, zawierające zarówno informacje o próbie, jak i dane pomiarowe, zapisywane dekadami. Odczytanie takich plików jest co prawda łatwe, ale przetworzenie danych do postaci akceptowanej przez programy obliczeniowe lub graficzne jest bardzo pracochłonne.

Dalsze kłopoty związane są już z samymi obliczeniami. Użytkownik musi najpierw dobrze zaznajomić się ze specjalistyczną terminologią metod analizy szeregów czasowych oraz opanować obsługę programów profesjonalnych, co nie dla wszystkich jest sprawą prostą. Co więcej, programy te – z natury rzeczy uniwersalne – nie uwzględniają specyfiki badań dendrochronologicznych, wskutek czego nie dysponują opcjami ułatwiającymi sekwencyjne wykonywanie rutynowych operacji. Trzeba więc często zapisywać wyniki pośrednie i ponownie je wczytywać, co powoduje oczywiście szybkie gromadzenie się plików na dysku, a to z kolei może łatwo stać się źródłem różnych pomyłek.

Wszystko to powoduje, że istnienie programu eliminującego przynajmniej część z wymienionych trudności wydaje się bardzo pożądane.

CHARAKTERYSTYKA PROGRAMU *TRIFOUR*

Program *TRIFOUR* jest napisany w języku *Visual Basic.NET* przy użyciu kompilatora *Microsoft® Visual Basic .Net Standard, Version 2003*. Nie posiada specjalnych wymagań sprzętowych, aczkolwiek przy analizie bardzo długich chronologii mogą wystąpić kłopoty związane ze zbyt małą pojemnością pamięci operacyjnej lub zbyt małą szybkością procesora. Optymalnym systemem operacyjnym jest *Microsoft® Windows XP*.

Dane wejściowe

W obecnej wersji program akceptuje dane wejściowe zapisane w sześciu formatach. Są to przede wszystkim rozpowszechnione na całym świecie formaty TUCSON i CRN, pierwszy przeznaczony do przechowywania danych o sekwencjach osobniczych, drugi – do przechowywania danych o chronologiach (*ITRDB Site Chronology File*). Ponieważ w plikach formatu TUCSON można zapisywać wiele sekwencji, program *TRIFOUR* automatycznie odczytuje ich nazwy (kody) i wyświetla je w postaci listy, z której użytkownik może wybrać interesującą go pozycję (Fig. 1).

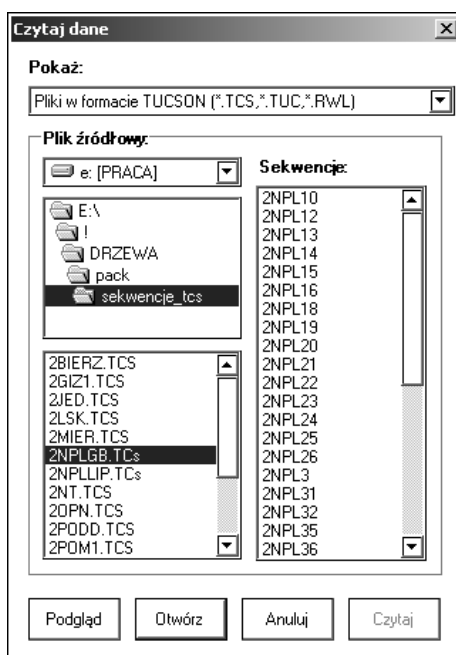


Fig. 1. Program *TRIFOUR*: Dialog wczytywania danych

Fig. 1. *TRIFOUR* program: Input data dialog

Kolejnymi obsługiwanymi formatami są binarne formaty AVR i AVS, stosowane głównie w Polsce; pliki zapisane w tych formatach zawierają jedynie wyniki pomiarów (bez opisu próby i bez specyfikacji lat).

Dwa pozostałe formaty reprezentują niestandardowe pliki tekstowe, z wierszami zawierającymi tylko wyniki pomiarów (jeden wynik – jeden wiersz) albo wyniki pomiarów wraz z odpowiadającymi im latami (w każdym wierszu: rok i wynik pomiaru).

Dużym udogodnieniem dla użytkownika jest opcja bezpośredniego podglądu plików z danymi (Fig. 2).

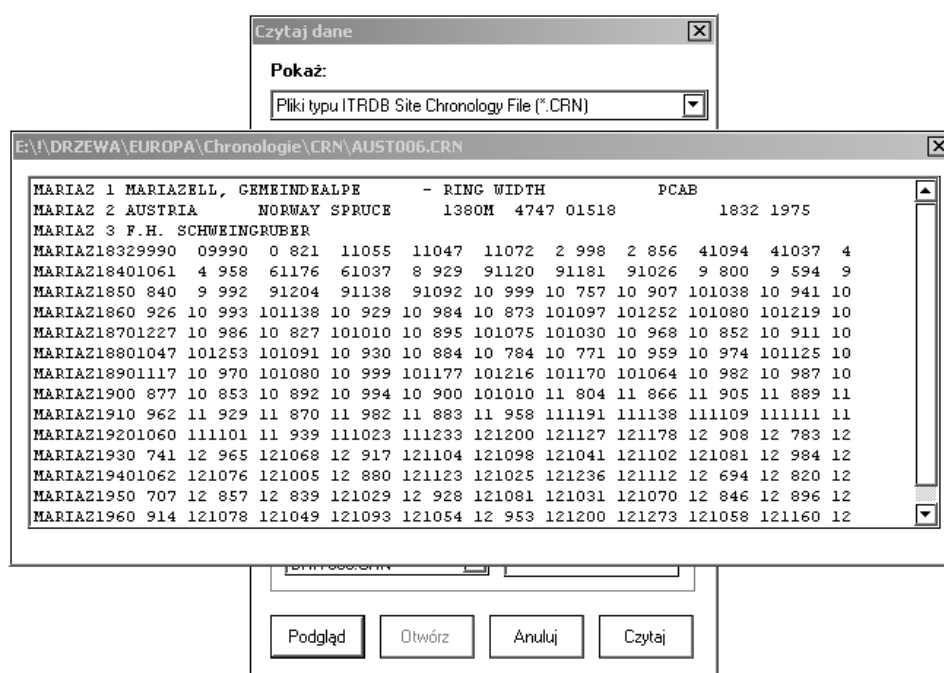


Fig. 2. Program TRIFOUR: Okienko podglądu plików danych

Fig. 2. TRIFOUR program: Window for data files preview

Operacje na sekwencjach

Ponieważ sekwencje dendrochronologiczne często bywają niestacjonarne (np. wyraźnie zmienia się charakter trendu albo wariancja sekwencji), niezwykle ważna jest możliwość przeprowadzenia analizy nie dla całej sekwencji, ale dla pewnego jej fragmentu lub dla wielu fragmentów jednocześnie. Dlatego program TRIFOUR udostępnia kilka opcji, pozwalających na takie obliczenia. W najprostszym przypadku użytkownik może wybrać do badań dowolny odcinek sekwencji, bezpośrednio ustawiając punkty początkowy i końcowy. Dla tak określonego odcinka można wykonać dowolne obliczenia, a w razie potrzeby – wybrać inny odcinek lub powrócić do analizy całej sekwencji.

Inną opcją jest podział sekwencji na kilka lub kilkanaście odcinków. Program TRIFOUR udostępnia dwa warianty takiego podziału: na odcinki o jednakowej długości (przy czym mogą one częściowo zachodzić na siebie) oraz na odcinki dowolnie ustalone (w tym przypadku muszą to być odcinki rozłączne). W pierwszym z wymienionych wariantów program

pozwała użytkownikowi regulować długość badanych odcinków i stopień ich zachodzenia na siebie oraz dowolnie ustawiać początek pierwszego odcinka podziału.

Każdy wyróżniony odcinek może być wyodrębniony i poddany niezależnej analizie.

Poszukiwanie trendów i obliczanie indeksów

Jakkolwiek zasadniczym przedmiotem programu *TRIFOUR* jest analiza cykliczności, to jednak nadaje się on znakomicie także do poszukiwania optymalnej postaci trendu obecnego zarówno w całych sekwencjach pomiarowych, jak i w poszczególnych ich fragmentach.

A) **Nowe przekształcenie**

Rodzaj trendu:

- ☐ Brak
- ☐ Średnia ruchoma
- ☐ Trend prostoliniowy
- ☒ Trend wielomianowy
- ☐ Trend wykładniczy
- ☐ Trend potęgowy
- ☐ Trend hiperboliczny
- ☐ Trend liniowy

Stopień wielomianu:

- ☐ 1
- ☐ 2
- ☒ 3
- ☐ 4
- ☐ 5
- ☐ 6
- ☐ 7
- ☐ 8
- ☐ 9
- ☐ 10
- ☐ 11
- ☐ 12
- ☐ 13
- ☐ 14
- ☐ 15

Analizuj:

- ☒ Trend
- ☐ Odchylenia
- ☐ Indeksy

Anuluj OK Zapamiętaj ustawienia ...

B) **Nowe przekształcenie**

Rodzaj trendu:

- ☐ Brak
- ☒ Średnia ruchoma
- ☐ Trend prostoliniowy
- ☐ Trend wielomianowy
- ☐ Trend wykładniczy
- ☐ Trend potęgowy
- ☐ Trend hiperboliczny
- ☐ Trend liniowy

Rodzaj średniej:

- ☒ Zwykła
- ☐ Spencer

Stopień średniej:

1

Długość okna średniej:

- ☐ 3
- ☐ 5
- ☐ 7
- ☐ 9
- ☐ 11
- ☐ 13
- ☐ 15
- ☐ 17
- ☐ 19
- ☒ 21
- ☐ 25
- ☐ 29
- ☐ 33

Analizuj:

- ☐ Trend
- ☒ Odchylenia
- ☐ Indeksy

Anuluj OK Zapamiętaj ustawienia ...

Fig. 3. Program *TRIFOUR*: Dialog wyboru parametrów trendu wielomianowego (A) i średniej ruchomej (B)

Fig. 3. *TRIFOUR* program: Dialog for choice of polynomial trend (A) and moving average parameters (B)

Program oblicza (metodą najmniejszych kwadratów) współczynniki trendów wielomianowych do 15. stopnia włącznie oraz wykładniczych, potęgowych i hiperbolicznych, a ponadto – dowolnych filtrów liniowych o długości do 29 wyrazów. Obsługiwane są też

trendy typu średnich ruchomych 1., 3. i 5. stopnia (w tym pierwszym przypadku – o nieograniczonej długości) oraz trendy zdefiniowane 15- i 21-wyrazowym wzorem Spencera.

Żądany sposób aproksymacji trendu użytkownik określa za pośrednictwem osobnego okienka dialogowego, którego opcje zmieniają się w zależności od wybranej klasy funkcji trendu (Fig. 3). Obliczony trend może być naniesiony na wykres danych źródłowych (Fig. 4), co pozwala na wizualną ocenę jego przydatności i ewentualną korektę.

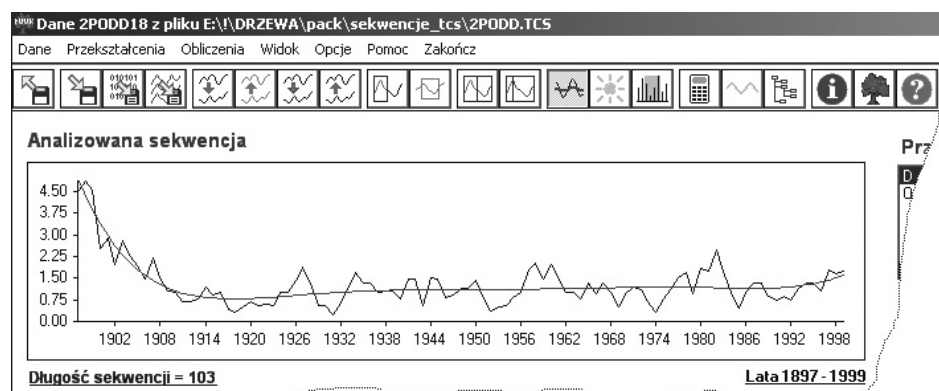


Fig. 4. Program *TRIFOUR*: Trend na wykresie analizowanej sekwencji

Fig 4. *TRIFOUR* program: Trend on analysed sequence graph

Jeżeli w dialogu pokazanym na figurze 3 zaznaczona zostanie opcja „Indeksy”, to program wykorzysta bieżące oszacowanie trendu do przekształcenia analizowanej sekwencji w sekwencję indeksów dendrochronologicznych i wyświetli jej wykres (Fig. 5); w razie potrzeby sekwencja ta może zostać poddana dalszym przekształceniom. Analogicznie działa opcja „Odchylenia” z tym tylko, że po jej wybraniu wyliczane są indeksy różnicowe.

Wykresy wszystkich sekwencji – wraz z trendami – można zapisywać w plikach graficznych (w jednym z pięciu dostępnych formatów: BMP, JPEG, GIF, TIFF bądź PNG), zaś same sekwencje, jak również współczynniki funkcji trendów i ich wartości – w plikach tekstowych, w formacie nadającym się do dalszego przetwarzania programami profesjonalnymi.

Analiza cykliczności

Program *TRIFOUR* pozwala analizować cykliczność każdej otrzymanej w opisany wyżej sposób sekwencji, a nawet – dowolnego jej fragmentu. W tym celu obliczane są wartości empirycznej funkcji autokorelacji, periodogramu i gęstości spektralnej. Użytkownik zaawansowany, zaznajomiony z techniką obliczeń spektralnych, ma do dyspozycji wiele opcji służących do modyfikowania ich przebiegu.

W szczególności program pozwala na formalne wydłużanie ciągów danych celem zmiany rozdzielczości periodogramu i stosowanie bramek spektralnych o różnej długości oraz okien spektralnych Hamminga, Hanny i Parzena, co jest niezwykle cenne przy opracowywaniu stosunkowo krótkich sekwencji, jakimi zwykle są sekwencje dendrochronologiczne (zwłaszcza osobnicze).

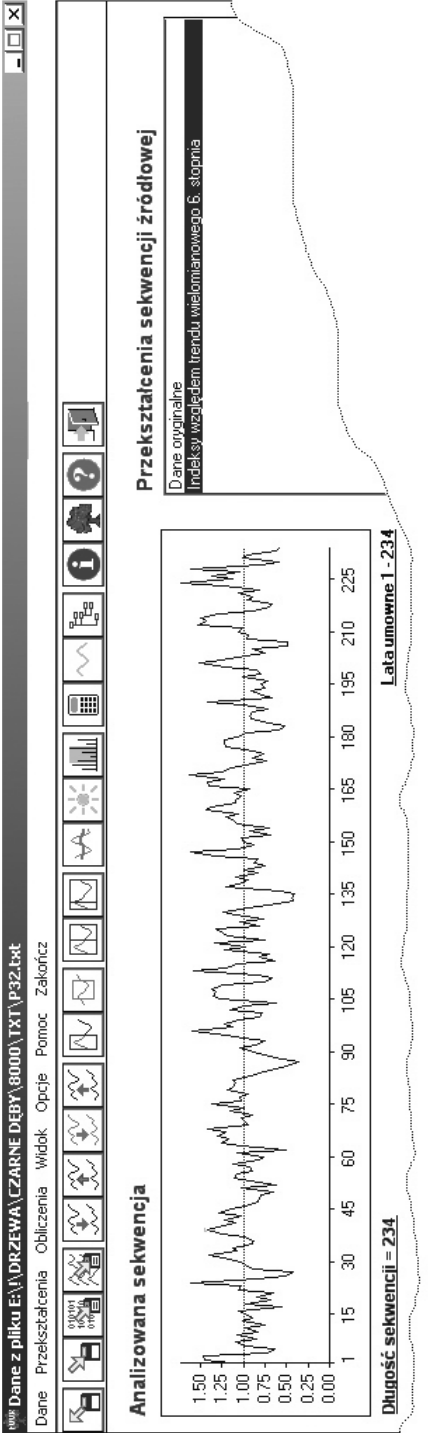


Fig. 5. Program *TRIFOUR*: Wykres sekwencji indeksów dendrochronologicznych

Fig. 5. *TRIFOUR* program: Graph of dendrochronological indexes sequence

Aby zapewnić maksymalny komfort pracy, program wyświetla wyniki obliczeń zarówno w formie graficznej, jak i tabelarycznej (Fig. 6 na wklejce), a użytkownik ma pewien wpływ na sposób ich prezentacji. Mianowicie dla funkcji autokorelacji może on zadać liczbę oszacowań, zaś dla wykresów periodogramu i funkcji gęstości spektralnej – wybrać rodzaj skali pionowej (dziesiętna lub logarytmiczna) i sposób jej opisu (wartości oryginalne lub unormowane). Na obu tych wykresach można też zaznaczyć zdefiniowane wcześniej pasmo częstotliwości (Fig. 7), co jest bardzo przydatne przy poszukiwaniach cykli o określonej długości. Dodatkowym udogodnieniem są tabelki z największymi wartościami periodogramu i funkcji gęstości spektralnej.

Podobnie jak same sekwencje, wszystkie charakterystyki spektralne mogą być zapisane na dysku albo w postaci wykresów, albo w postaci numerycznej. W jednym i drugim przypadku są one automatycznie opisywane (Fig. 8), dzięki czemu mają pełną i trwałą wartość dokumentacyjną.

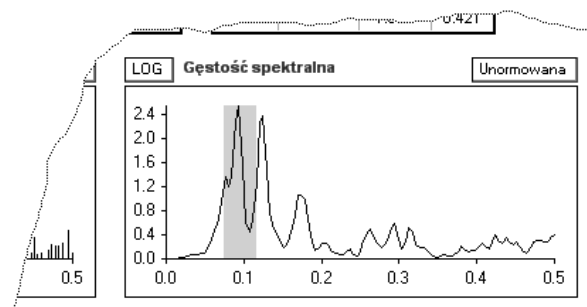


Fig. 7. Program *TRIFOUR*: Pasma częstotliwości zaznaczone na wykresie funkcji gęstości spektralnej

Fig. 7. *TRIFOUR* program: Frequency band marked on spectral density graph

Sekwencja 2NPLL8 z pliku 2N

Lata 1837 - 1995

Parametry spektralne

Trend prostoliniowy wyeliminowany

Srednia odjęta

Okno spektralne Hamminga o długości 5

Funkcja gęstości spektralnej

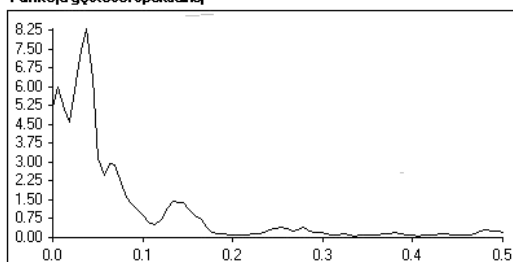


Fig. 8. Program *TRIFOUR*: Zapisany w pliku graficznym wykres funkcji gęstości spektralnej

Fig. 8. *TRIFOUR* program: Spectral density graph saved in graphic file

Zmienność charakterystyk spektralnych

Bardzo użytecznym i efektywnym sposobem badania długich sekwencji dendrochronologicznych (zwłaszcza chronologii) jest obserwacja zmienności charakterystyk spektralnych w czasie. Program *TRIFOUR* ułatwia taką analizę dzięki opisanej wyżej opcji podziału sekwencji na odcinki o jednakowej lub dowolnej długości.

Po jej wybraniu ekran zmienia wygląd (Fig. 9 na wklejce): jego główny element stanowi teraz zbiorczy wykres wartości wybranej funkcji (autokorelacji, periodogramu lub gęstości spektralnej) obliczonych dla poszczególnych odcinków (okien) sekwencji źródłowej; użytkownik może regulować poziomą skalę tego wykresu tak, by osiągnąć jak najlepszą wizualizację. Może też zmieniać długość badanych odcinków, a w przypadku odcinków o jednakowej długości – także stopień ich zachodzenia na siebie oraz położenie początku pierwszego odcinka.

Podświetlenie jednej lub wielu pozycji listy częstotliwości (lub okresów) powoduje ich zaznaczenie na wykresie (oczywiście tylko w przypadku periodogramu i funkcji gęstości spektralnej), zaś podświetlenie jednej lub kilku pozycji na liście odcinków zmienia kolor odpowiednich wykresów oraz uaktywnia opcję przeglądania okien, za pomocą której można korygować położenie granic lub całego wybranego odcinka analizowanej sekwencji. Jeżeli podświetlony jest tylko jeden odcinek, aktywna jest też opisana wyżej opcja szczegółowej analizy fragmentu sekwencji.

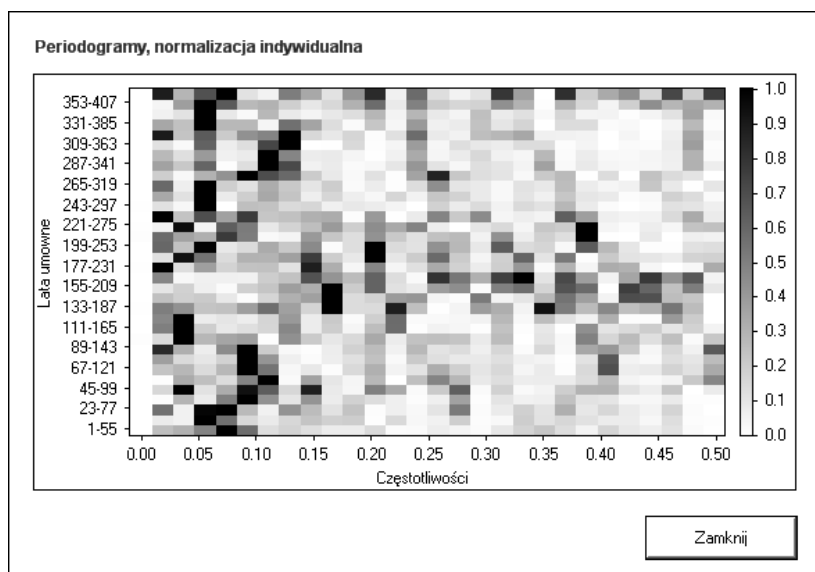


Fig. 10. Program *TRIFOUR*: Cieniowany diagram zmienności charakterystyk spektralnych

Fig. 10. *TRIFOUR* program: Shaded diagram of spectral characteristics changes

Na wykresie zbiorczym można ponadto zaznaczyć ustalone pasmo częstotliwości, zaś przy analizie odcinków o jednakowej długości – przedstawić go w formie diagramu cieniowanego (Fig. 10).

ZAKOŃCZENIE

Przedstawiona wersja programu jest wersją wstępną, implementującą tylko część znanych algorytmów analizy szeregów czasowych (brakuje w szczególności metod analizy falkowej). Moim zamiarem jest jego sukcesywna rozbudowa i udoskonalenie interfejsu, co jednak wymaga testowania w jak najszerszym kręgu użytkowników. Dlatego chętnie udostępnię program wszystkim zainteresowanym i postaram się uwzględnić ewentualne propozycje i uwagi.

Praca została wykonana w ramach działalności statutowej Zakładu Geologii Ogólnej i Matematycznej, finansowanej przez KBN (umowa nr 11.11.140.159).

Dane wykorzystane na figurach pochodzą z archiwum dr. hab. inż. Marka Krapca, prof. AGH, oraz z internetowej bazy International Tree Ring Data Bank.

LITERATURA

- Bendat J. & Piersol A., 1976. *Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych*. PWN, Warszawa, 1–488.
- Box G.E.P. & Jenkins G.M., 1983. *Analiza szeregów czasowych: prognozowanie i sterowanie*. PWN, Warszawa, 1–574.
- Briffa K. & Cook E., 1989. Methods of Response Function Analysis. W: Cook E.R. & Kairiukstis L.A. (red.), *Methods of Dendrochronology*, 240–247, Kluwer, Dordrecht – Boston – London.
- Briffa K.R., Jones P.D., Schweingruber F.H., Karlen W. & Shiyatov S.G., 1996. Tree-ring variables as proxy-climate indicators: problems with low-frequency signals. W: Jones P.D., Bradley R.S., Jouzel J. (red.), *Climatic variations and forcing mechanisms of the last 2000 years*, *NATO ASI Series*, I, 41, 9–41.
- Cook E.R. & Kairiukstis L.A. (red.), 1989. *Methods of Dendrochronology*. Kluwer, Dordrecht – Boston – London, 1–438.
- Frenzel B., Birks H.H., Alm T. & Vorren K.-D. (red.), 1996. Holocene Treeline Oscillation, Dendrochronology and Palaeoclimate. *Palaeoclimate Research*, 20, Gustav Fischer Verlag, Berlin, 1–300.
- Fritts H.C., 1976. *Tree-rings and climate*. Academic Press, London – New York – San Francisco, 1–567.
- Keqian Zhou & Butler C.J., 1998. A statistical study of the relationship between the solar cycle length and tree-ring index values. *J. Atmosph. & Solar-Terr. Phys.*, 60, 1711–1718.
- Krawczyk A.J. & Krapiec M., 1999. Rekonstrukcja klimatu Małopolski na podstawie sekwencji przyrostów rocznych dębów. *Kwart. AGH Geologia*, 25, 4, 305–319.
- Krawczyk A.J. & Krapiec M., 2003a. Annual Growth Sequences and Solar Activity Cycles (Examples from Subfossil Oaks from Southern Poland). *Bull. Pol. Acad. Sci., Earth Sci.*, 51, 1, 29–41.

- Krawczyk A.J. & Krapiec M., 2003b. Schwabe Solar Cycle in Tree-Ring Sequences from then Last 4000 Years (Southern Poland). *Bull. Pol. Acad. Sci., Earth Sci.*, 51, 2, 91–97.
- Krapiec M., 1995. Metodyka badań dendrochronologicznych. W: Rutkowski J. & Mycielska-Dowgiałło E. (red.), *Badania osadów czwartorzędowych*, 318–328, Wyd. WGiSRUW, Warszawa.
- Kurths J., Spiering Ch., Müller-Stoll W. & Striegler U., 1993. Search for solar periodicities in Miocene tree ring widths. *Terra Nova*, 5, 359–363.
- LaMarche V.C., 1978. Tree-ring evidence of past climatic variability. *Nature*, 276, 334–338.
- LaMarche V.C & Fritts H.C., 1972. Tree rings and sunspot number. *Tree-Ring Bulletin*, 32, 19–33.
- Mori Y., 1981. Evidence of an 11-yr periodicity in tree-ring series from Formosa related to the sunspot cycle. *J. Climatology*, 1, 345–353.
- Nordemann D.J.R., Rigozo N.R. & de Faria H.H., 2005. Solar activity and El-NiZo signals observed in Brazil and Chile tree ring records. *Adv. Space Res.*, 35, 891–896.
- Raspopov O.M., Dergachev V.A., Shumilov O.I., Kolström T., Lindholm M., Meriläinen J., Eggertsson O., Vasiliev S.S., Kuzmina A.V., Kirtsidely I.Yu. & Kasatkina E.A., 2001. Dendrochronological evidence of long-term variations in solar activity and climate. Abstracts. *International Conference Tree Rings and People*, Davos, 218–219.
- Rigozo N.R., Nordemann D.J.R., Echer E., Zanandrea A. & Gonzales W.D., 2002. Solar variability effects studied by tree-ring data wavelet analysis. *Adv. Space Res.*, 29, 12, 1985–1988.
- Schweingruber F.H., 1993. *Trees and Wood in Dendrochronology*. Springer, Berlin, 1–402.
- Zieliński T.P., 2002. *Od teorii do cyfrowego przetwarzania sygnałów*. Wydział EAIiE AGH, Kraków, 1–576.

Summary

Diversified numerical methods play still more important role in dendrochronological analyses. The *TRIFOUR* software aims to facilitate application of selected numerical methods.

The current version accepts input data recorded in both the *TUSCON* and *CRN* formats (Fig. 1) as well as in four untypical formats used mainly in Poland. The user can directly preview the data files (Fig. 2).

Data analysis can be run for the whole data sequence, for a selected sequence fragment and simultaneously for several selected fragments. The user can select any part of data sequence or can divide the sequence into equal-length fragments (which may partly overlap each other) or into random-length fragments (in such a case fragments must be disjoint). Each selected fragment can be subjected to an independent analysis.

Although the principal aim of the *TRIFOUR* software is the cyclicity analysis, it can also be applied to trend analysis as it calculates the coefficients of polynomial, exponential,

power, hyperbolic, linear and moving-average trends (Fig. 3). Calculated trend can be visualized in the source data graph (Fig. 4).

The software applies the current trend estimation for transformation of analyzed data sequence into the sequence of dendrochronological indexes (Fig. 5). Graphs of all sequences, together with trends, can be recorded as graphic files whereas sequences themselves can be written as text files along with coefficients of trend functions and their values.

The cyclicity analysis includes calculations of the values of empirical autocorrelation function, periodogram and spectral density function. The results are displayed as both the graphs and the tables (Fig. 6). Predefined frequency band can be marked in the graph (Fig. 7). Spectral characteristics can be written into a hard disc as graphs or as numerical data set (Fig. 8).

The *TRIFOUR* software enables also to follow the variability of spectral characteristics with the time due to mentioned above option of data sequence fragmentation into the equal- or random-length parts (Figs 9, 10).

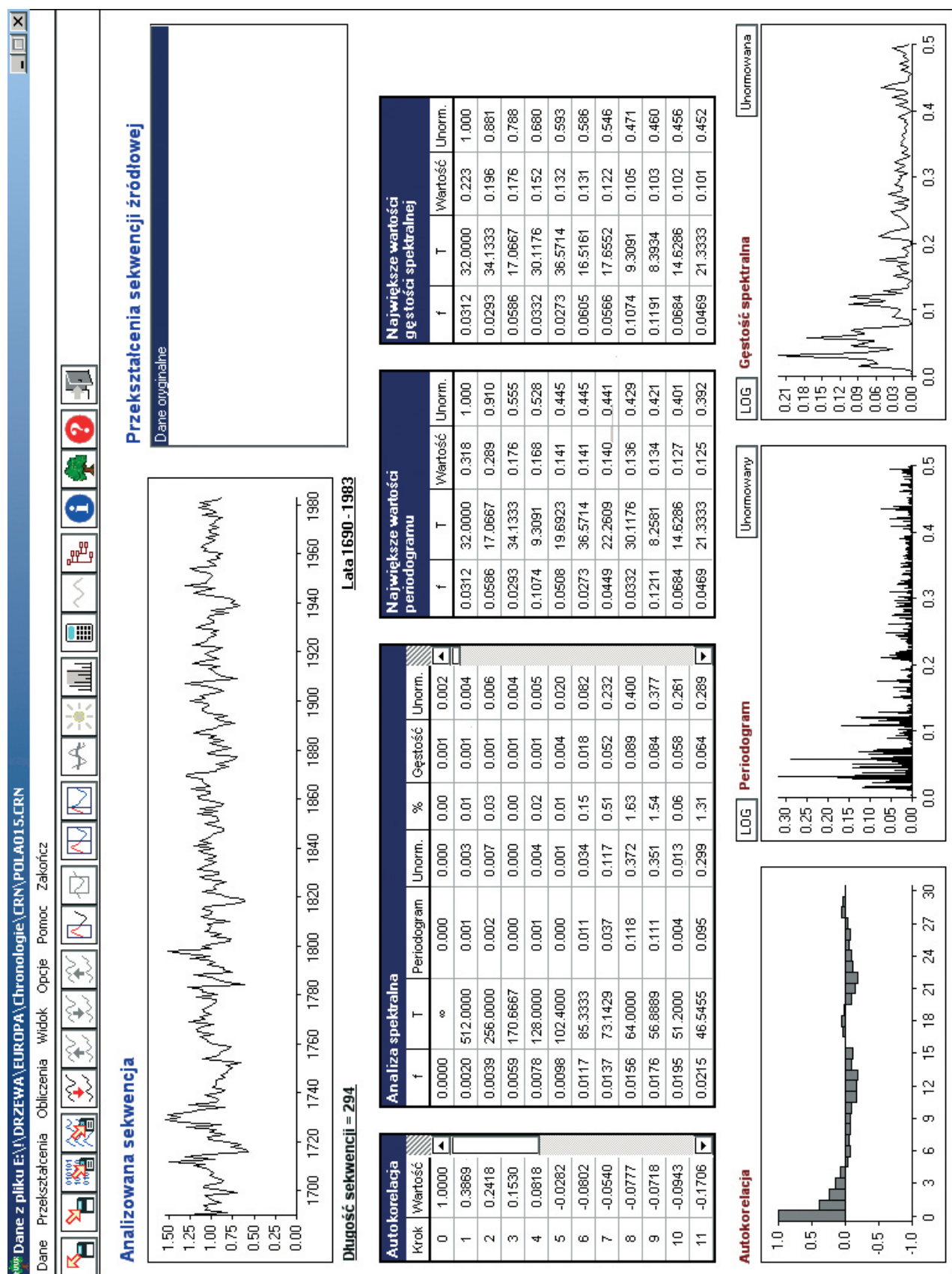


Fig. 6. Program *TRIFOUR*: Okno główne

Fig. 6. *TRIFOUR* program: Main window

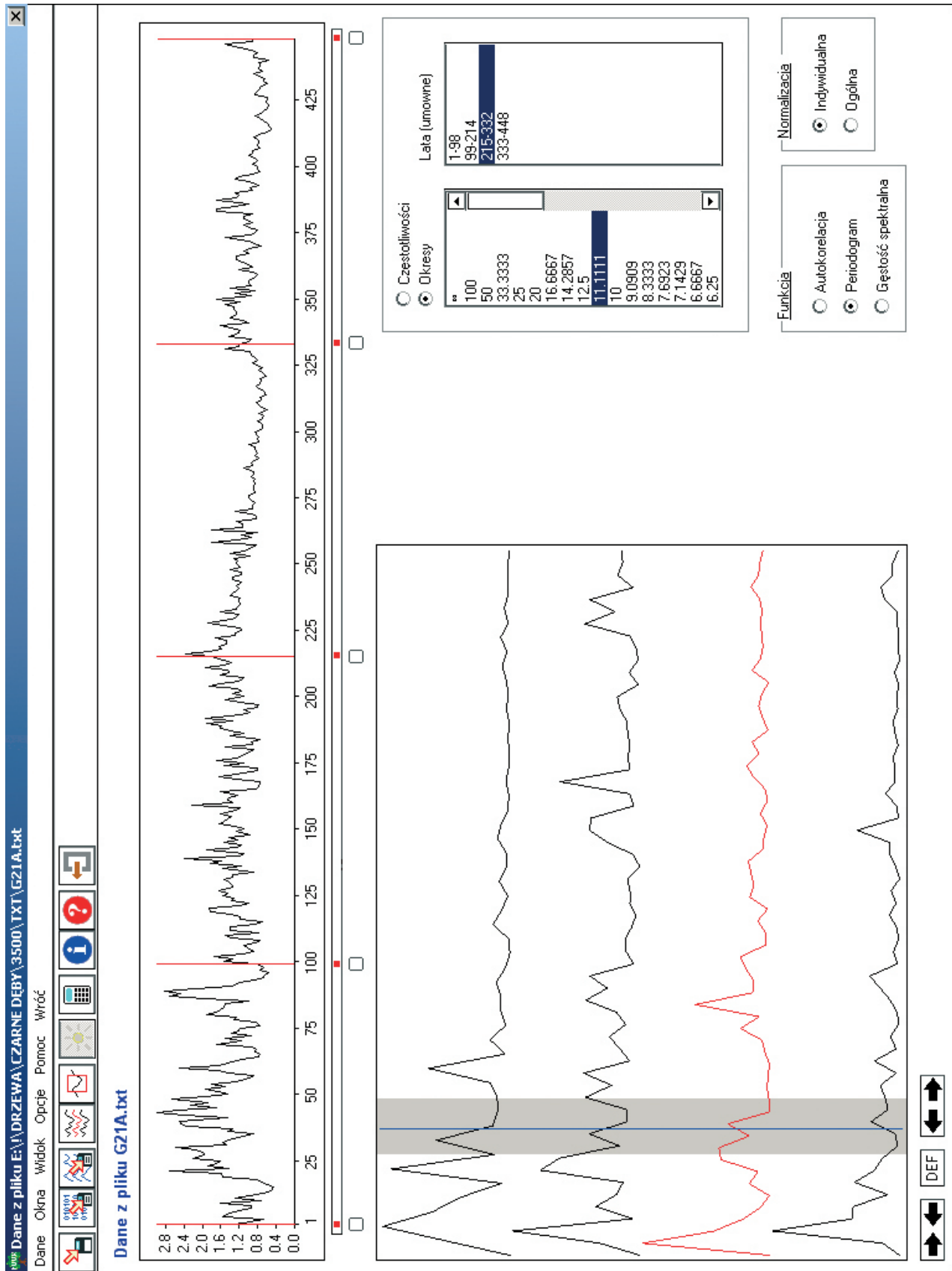


Fig. 9. Program TRIFOUR: Okno analizy zmienności charakterystyk spektralnych

Fig. 9. TRIFOUR program: Window for analysis of spectral characteristics changes