

Bernard Kontny\*, Sławomir Szwed\*, Marcin Zająć\*

## Modelowanie ruchu stacji EPN/IGS „Wrocław” na podstawie analizy ciągów czasowych obserwacji GPS

### 1. Stacja GPS/GLONASS „Wrocław” (WROC)

Permanentna stacja GPS/GLONASS „Wrocław” została założona w 1996 roku z inicjatywy profesora Stefana Caconia w Katedrze Geodezji i Fotogrametrii (obecnie Instytut Geodezji i Geoinformatyki) Akademii Rolniczej we Wrocławiu [2]. Antenę satelitarną umieszczona jest na szczycie ściany konstrukcyjnej budynku Wydziału Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji (rys. 1), a odbiornik oraz urządzenia towarzyszące umiejscowiono w pomieszczeniach Instytutu. Stacja została włączona do sieci EPN (EUREF *Permanent Network*) od 28 listopada 1996 roku – 881 tydzień GPS (z przerwą w okresie od 1020 do 1062 tygodnia GPS, spowodowaną uderzeniem pioruna). Początkowo był odbierany tylko sygnał systemu GPS, od 2000 roku jest również rejestrowany sygnał systemu GLONASS. Do obserwacji satelitarnych obecnie wykorzystywany jest dwusystemowy odbiornik Ashtech Z18 z anteną Choke Ring ASH701941.1. W 1997 roku stację wyposażono w zewnętrzny, atomowy wzorzec czasu oraz automatyczną stację meteo. W 2002 roku stacja WROC została włączona również do serwisu IGS (*International GPS Service*).

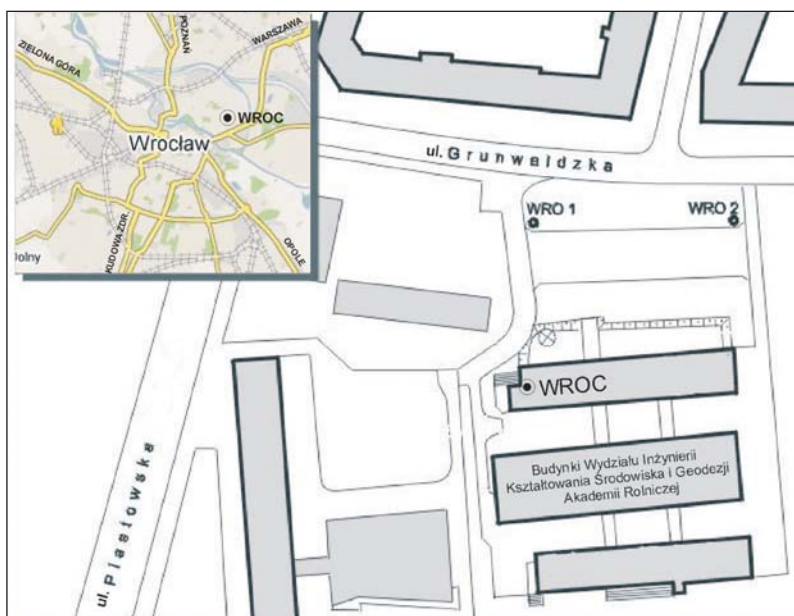
W serwisie EPN dane ze stacji są przetwarzane w trzech centrach analiz danych:

- WUT (Politechnika Warszawska, Polska),
- BKG (Instytut Kartografii i Geodezji, Frankfurt nad Menem, Niemcy),
- OLG (Instytut Badań Kosmicznych, Graz, Austria).

W serwisie IGS stacja uwzględniona jest również w obliczaniu orbit i parametrów jonosfery przez centra analiz: MIT (Massachusetts Institute of Technology, USA), NOAA/NGS (*National Oceanic and Atmospheric Administration/NGS*, USA) i NRCan (*Natural Resources Canada*, Kanada).

---

\* Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Przyrodniczy, Wrocław

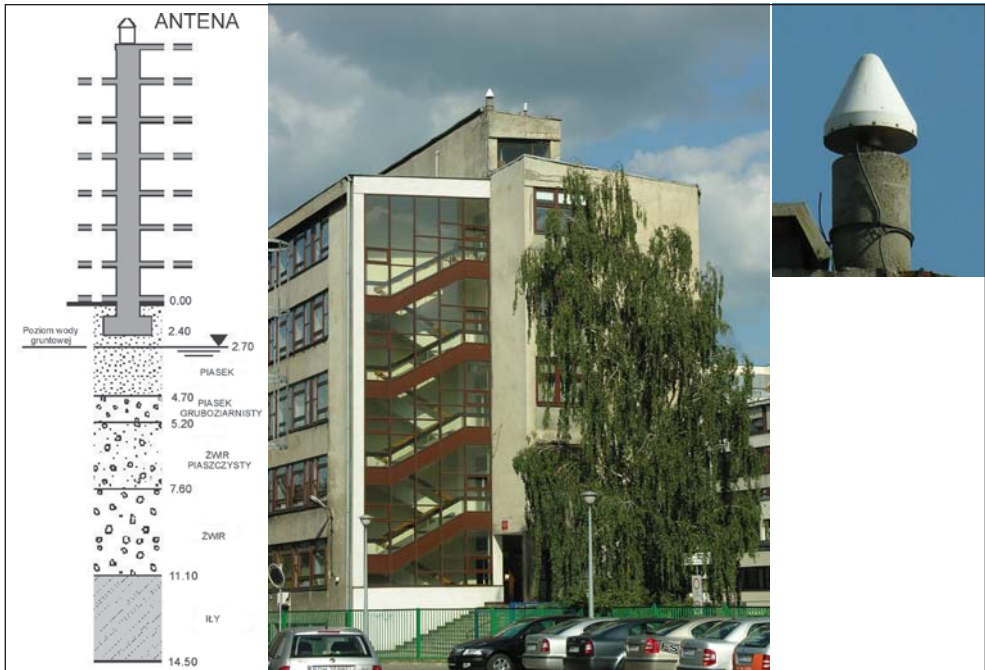


Rys. 1. Lokalizacja permanentnej stacji GPS/GLONASS na terenie Wrocławia

Siedmiokondygnacyjny budynek Akademii Rolniczej o wysokości 20 metrów, na którym umieszczono antenę GPS, jest posadowiony na podłożu ze skał osadowych, gdzie dominującą frakcją jest żwir piaszczysty o charakterze zwięzłym (rys. 2). W odniesieniu do budowy geologicznej południowo-zachodniej Polski, punkt „WROC” leży na obszarze monokliny przedsudeckiej w odległości 20 km od strefy uskoku środkowej Odry, w obrębie platformy zachodnioeuropejskiej.

Permanentna stacja EPN/IGS „Wrocław” jest wykorzystywana jako stacja odniesienia w lokalnych projektach badawczych realizowanych na terenie południowo-zachodniej Polski m.in. w:

- badaniach zagrożeń naturalnych obiektów inżynierskich na Dolnym Śląsku [4],
- badaniach geodynamicznych Sudetów Wschodnich po polskiej i czeskiej stronie [8],
- badaniu współczesnej kinematyki głównych struktur tektonicznych polskich Sudetów i bloku przedsudeckiego [5],
- badaniu współczesnych ruchów skorupy ziemskiej w masywie Karkonoszy [6].



Rys. 2. Umieszczenie anteny stacji „WROC”

## 2. Pozyskanie i przygotowanie danych do analizy

### 2.1. Zestawienie danych w szeregi czasowe

Analizą objęto szeregi czasowe współrzędnych stacji „Wrocław” obejmujące okres od początku działania stacji (881 tydzień GPS) do końca 2005 roku (1355 tydzień GPS). Stacja była nieaktywna w okresie od 1020 do 1062 tygodnia GPS. Do analizy wykorzystano tygodniowe rozwiązania kombinowane sieci EPN, zawarte w plikach SINEX znajdujących się na serwerach EPN, łącznie z 432 tygodni.

Zestawione współrzędne ( $X, Y, Z$ ) stacji WROC z każdego tygodnia analizowanego przedziału czasowego oraz błędy tych współrzędnych ( $m_x, m_y, m_z$ ) można przedstawić w postaci szeregów czasowych (rys. 3).

Współrzędne geocentryczne wyrażone są w różnych realizacjach układu ITRF, dlatego też przed przystąpieniem do właściwej analizy konieczne jest sprowadzenie ich do jednolitego układu współrzędnych.

Współrzędne  $X, Y, Z$  zostały przeliczone do układu ITRF2000 według formuły transformacyjnej [1]:

$$X_{2000} = (I + R)^{-1} \cdot (X_{XX} - T),$$

gdzie:

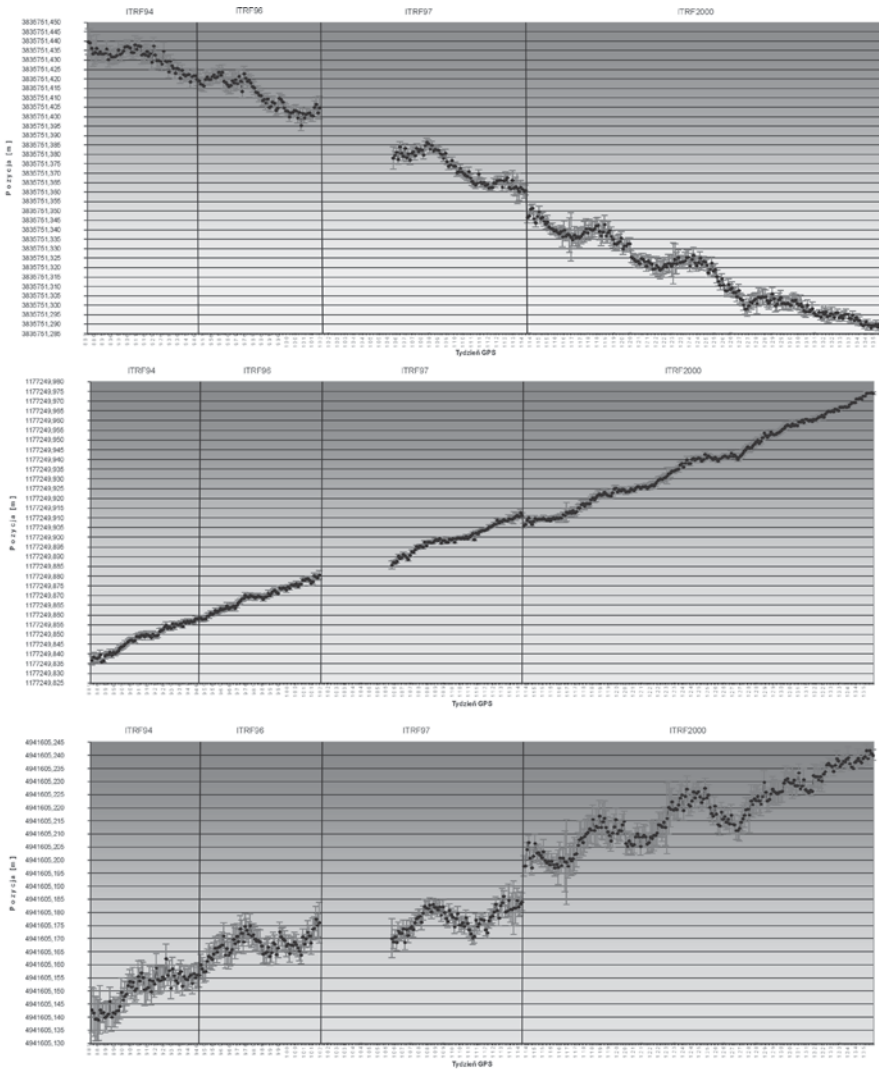
$X_{2000}$  – wektor współrzędnych w układzie ITRF2000,

$I$  – macierz jednostkowa,

$R$  – macierz rotacji i przeskalowania,

$X_{XX}$  – wektor znanych współrzędnych w układzie ITRF<sub>XX'</sub>

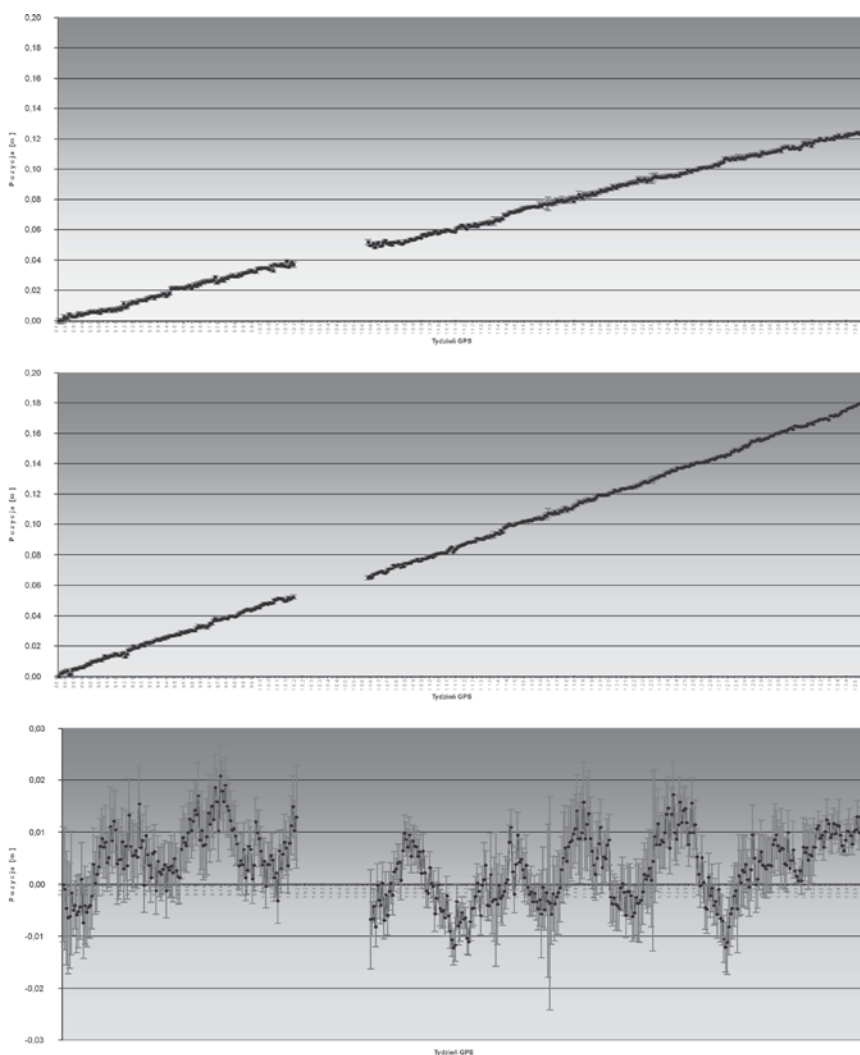
$T$  – wektor translacji.



Rys. 3. Ciągi czasowe współrzędnych geocentrycznych X, Y, Z stacji „WROC”

## 2.2. Transformacja współrzędnych z układu geocentrycznego (x, y, z) do układu topocentrycznego

Z założenia analiza szeregów czasowych ma dotyczyć współrzędnych topocentrycznych (składowe horyzontalne N i E oraz składowa wertykalna U). Szeregi czasowe współrzędnych przeliczone do układu topocentrycznego zobrazowano na rysunku 4.



Rys. 4. Ciągi czasowe współrzędnych topocentrycznych N, E, U stacji „WROC”

Konieczna więc była transformacja z układu geocentrycznego do układu topocentrycznego, wykorzystująca powszechnie znaną formułę transformacyjną [3]:

$$\begin{bmatrix} \Delta N_i \\ \Delta E_i \\ \Delta U_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin B \cos L & -\sin B \sin L & \cos B \\ -\sin L & \cos L & 0 \\ \cos B \cos L & \cos B \sin L & \sin B \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta X_{0-i} \\ \Delta Y_{0-i} \\ \Delta Z_{0-i} \end{bmatrix}$$

gdzie:

$B$  i  $L$  – przybliżone współrzędne geodezyjne stacji „Wrocław”,

$\Delta N, \Delta E, \Delta U$  – przyrosty współrzędnych topocentrycznych,

$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  – przyrosty współrzędnych geocentrycznych.

Błędy zostały przeliczone według następującej formuły [9]:

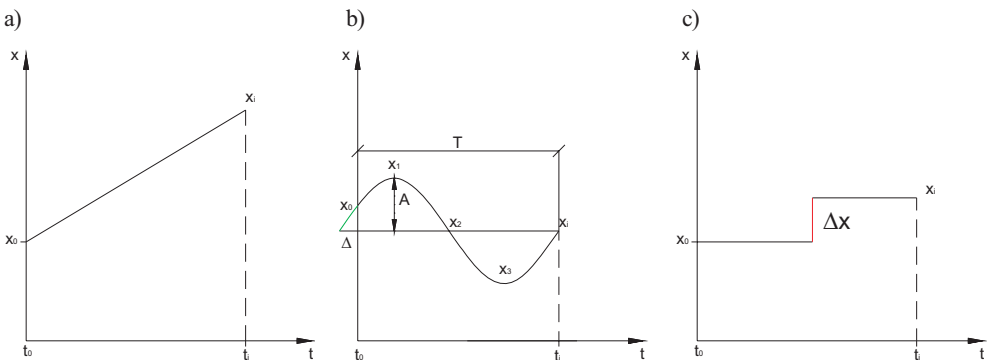
$$\begin{bmatrix} \text{var}N_i & \text{cov}NE_i & \text{cov}NU_i \\ \text{cov}NE_i & \text{var}E_i & \text{cov}EU_i \\ \text{cov}NU_i & \text{cov}EU_i & \text{var}U_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin B \cos L & -\sin B \sin L & \cos B \\ -\sin L & \cos L & 0 \\ \cos B \cos L & \cos B \sin L & \sin B \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \text{var}X_i & \text{cov}XY_i & \text{cov}XZ_i \\ \text{cov}XY_i & \text{var}Y_i & \text{cov}YZ_i \\ \text{cov}XZ_i & \text{cov}YZ_i & \text{var}Z_i \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -\sin B \cos L & -\sin B \sin L & \cos B \\ -\sin L & \cos L & 0 \\ \cos B \cos L & \cos B \sin L & \sin B \end{bmatrix}^T$$

### 3. Analiza ciągów czasowych współrzędnych

#### 3.1. Modele ruchu punktu

Założono, że zmiany współrzędnych stacji „WROC” są wynikiem nałożenia się trzech modeli ruchu punktu (rys. 5):

- 1) ruchu liniowego,
- 2) ruchu okresowego,
- 3) ruchu skokowego.



Rys. 5. Modele ruchu punktu: a) liniowy; b) okresowy; c) skokowy

### 3.2. Estymacja prędkości liniowych

Jak łatwo zauważyć na zamieszczonych wykresach (rys. 4), szeregi czasowe składowych horyzontalnych charakteryzują się silnym trendem liniowym, na który sumują się zarówno ruchy wewnątrzpłytkowe (*interplate*) jak i ruch całej płyty kontynentalnej.

W celu wyznaczenia parametrów trendu liniowego, ciągi czasowe zostały aproksymowane funkcją liniową postaci:

$$y_i = at_i + b,$$

gdzie:

$t_i$  – tydzień GPS

$y_i$  – obserwacja

Parametry  $a$  i  $b$  zostały obliczone dwiema metodami: metodą najmniejszych kwadratów i metodą estymacji odpornej. Szukane parametry dla metody najmniejszych kwadratów wyznaczone zostały z zależności:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (A^T P A)^{-1} A^T P Y, \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} t_1 & 1 \\ t_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ t_n & 1 \end{bmatrix}$$

gdzie:

$a, b$  – estymowane parametry modelu liniowego,

$t_1 \dots t_n$  – momenty czasowe (tygodnie GPS),

$y_1 \dots y_n$  – wartość współrzędnych dla tych momentów czasowych,

$$P - \text{macierz wag; } p_i = \frac{1}{m_{y_i}^2 [mm]}.$$

Metoda najmniejszych kwadratów charakteryzuje się małą odpornością na zniekształcenia wyników przez obserwacje odstające (*outliers*), dlatego znacznie lepszymi metodami wyznaczenia parametrów ruchu są estymacje odporne. W pracy tej zastosowano M-estymację z funkcją wagową Hubera [9], w której macierz wag  $P$  oblicza się z następującego wzoru:

$$P_{i+1} = \begin{cases} p_i & \text{gdy } |v_i| \leq c \\ \frac{c}{|v_i|} * p_i & \text{gdy } |v_i| > c \end{cases}$$

gdzie  $c = 2 * m_{v_i}$ .

Składowe prędkości ruchu liniowego stacji WROC oraz ich błędy średnie, obliczone obiema metodami, zestawiono w tabeli 1.

**Tabela 1.** Składowe prędkości liniowej stacji WROC obliczone metodą MNK i metodą estymacji odpornej Hubera

Metoda	VN [mm/rok]	$m_{VN}$	VE [mm/rok]	$m_{VE}$	VU [mm/rok]	$m_{VU}$
MNK	13,63	0,02	19,67	0,03	0,77	0,10
Odporna	13,61	0,02	19,56	0,03	0,52	0,10

Do wyznaczenia składowych prędkości ruchu całej płyty kontynentalnej, opisanego modelem geologicznym NNR-NUVEL1A wykorzystano kalkulator *online* dostępny na stronie internetowej UNAVCO pod adresem [http://sps.unavco.org/crustal\\_motion/dxdt/nncalc/](http://sps.unavco.org/crustal_motion/dxdt/nncalc/).

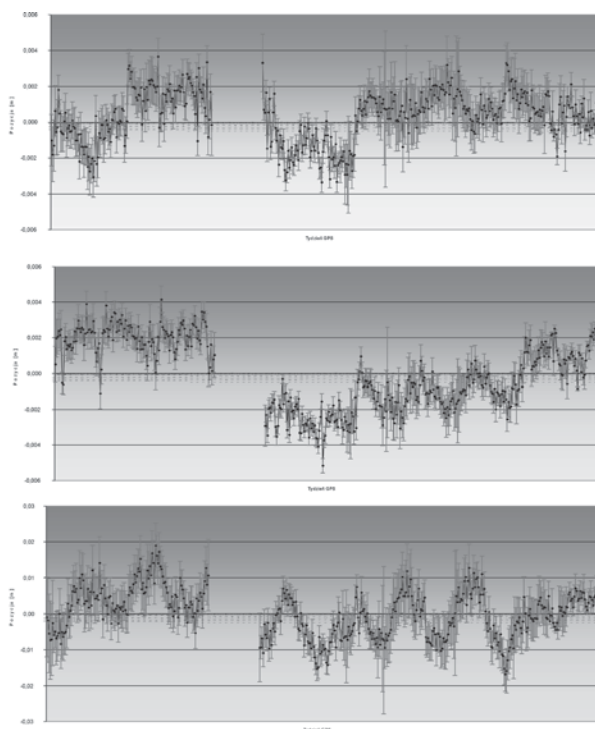
Po odjęciu prędkości wynikających z ruchu całej płyty otrzymano wartości składowych prędkości rezydualnych zestawione w tabeli 2.

**Tabela 2.** Składowe prędkości rezydualnej dla stacji „Wrocław”

Składowe prędkości	$v_N$ [mm/rok]	$m_{v_N}$	$v_E$ [mm/rok]	$m_{v_E}$	$v_U$ [mm/rok]	$m_{v_U}$
Składowe prędkości płyty (NUVEL1A)	12,74	–	20,76	–	0,00	–
Składowe prędkości rezydualnej	0,87	0,02	-1,20	0,03	0,52	0,10

Graficzny obraz ciągów czasowych otrzymanych po usunięciu trendu liniowego pokazano na rysunku 6. Na wykresach jest widoczny wyraźny efekt składowych periodycznych dla wszystkich trzech współrzędnych.





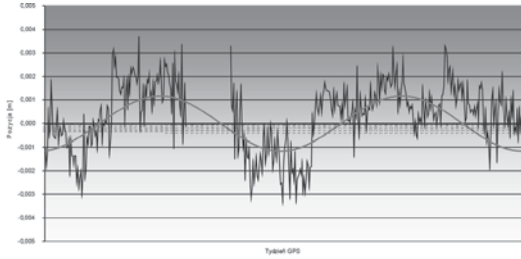
Rys. 6. Ciągi czasowe współrzędnych topocentrycznych N, E, U stacji „WROC” po usunięciu trendu liniowego

### 3.3. Identyfikacja składowych okresowych

W celu identyfikacji składowych okresowych zmian współrzędnych stacji „WROC” przeprowadzono analizę spektralną szeregów czasowych dla okresu 9 lat obserwacji, z rozdzielczością jednego tygodnia. W obliczeniach wykorzystano moduł „szybkiej transformaty Fouriera” (FFT – *Fast Fourier Transform*) w środowisku programowym MATLAB.

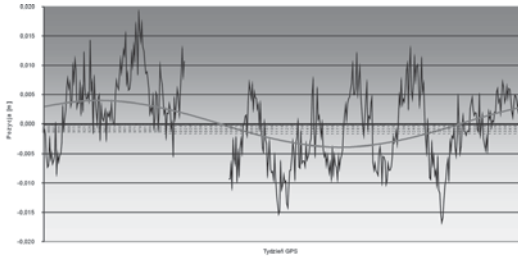
Wynikiem zastosowania tej funkcji jest wektor liczb zespolonych. Na podstawie części rzeczywistej i urojonej każdego elementu tego wektora (każdej liczby zespolonej) wyznaczono amplitudę, moc widma, okres (względnie częstotliwość) oraz fazę sygnału periodycznego [7]. Wartości parametrów (okres  $T$ , amplituda  $A$ , faza  $F$  i częstotliwość  $f$ ) i wykresy składowych okresowych o największych amplitudach (powyżej 1 mm dla współrzędnych horyzontalnych i 3 mm dla współrzędnej wertykalnej) przedstawiono na rysunku 7. Zestawienie parametrów pięciu najistotniejszych składowych okresowych dla każdej współrzędnej podano w tabeli 3.

## Składowa N



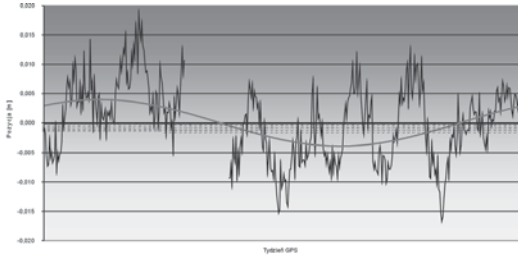
$T = 237$  tygodni (4,5 roku)  
 $A = 1,16$  mm  
 $F = 277,28^\circ$   
 $f = 0,004219$  [1/tydzień]

## Składowa E

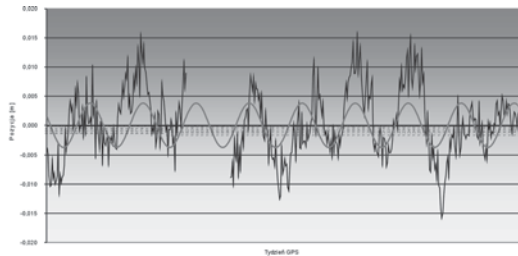


$T = 474$  tygodni (9 lat)  
 $A = 2,21$  mm  
 $F = 61,21^\circ$   
 $f = 0,002110$  [1/tydzień]

## Składowa U



$T = 474$  tygodni (9 lat)  
 $A = 3,98$  mm  
 $F = 47,81^\circ$   
 $f = 0,002110$  [1/tydzień]



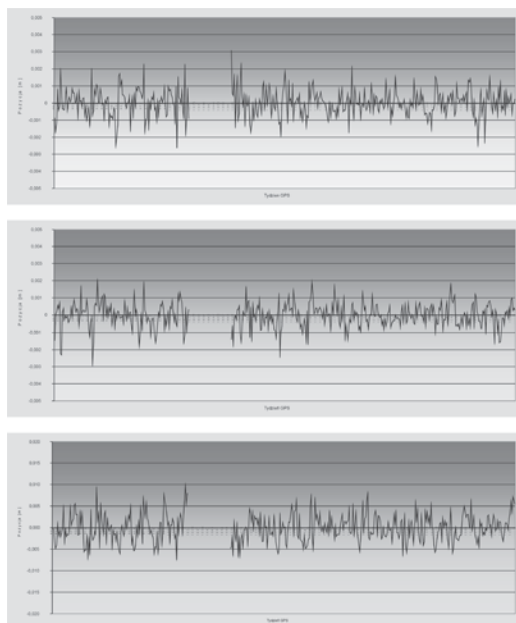
$T = 52,667$  tygodnia (1 rok)  
 $A = 3,80$  mm  
 $F = 151,14^\circ$   
 $f = 0,018987$  [1/tydzień]

**Rys. 7.** Parametry i wykresy podstawowych składowych okresowych w szeregach czasowych współrzędnych stacji „WROC”

**Tabela 3.** Parametry podstawowych składowych okresowych w szeregach czasowych współrzędnych stacji „WROC”

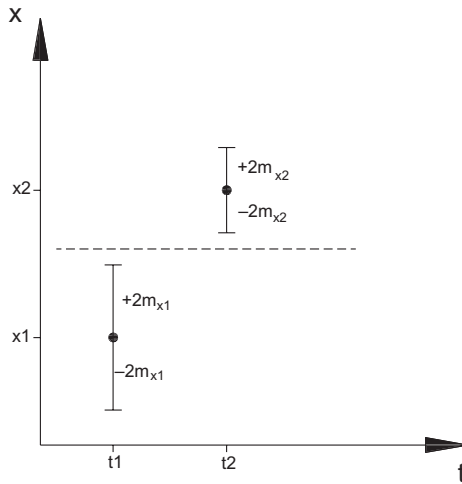
N			E			U		
Okres $T$ [tydzień]	Amplituda [mm]	$F$ [DEG]	Okres $T$ [tydzień]	Amplituda [mm]	$F$ [DEG]	Okres $T$ [tydzień]	Amplituda [mm]	$F$ [DEG]
237 (4,5 roku)	1,16	277,3	474 (9 lat)	2,21	61,2	474 (9 lat)	3,98	47,8
158 (3 lata)	0,49	175,3	237 (4,5 roku)	0,58	-42,5	52 (1 rok)	3,80	151,1
52 (1 rok)	0,47	326,2	52 (1 rok)	0,45	-283,2	47 (0,9 roku)	2,90	226,8
474 (9 lat)	0,45	121,9	158 (3 lata)	0,44	-210,5	237 (4,5 roku)	2,77	-48,2
68 (1,3 roku)	0,38	95,7	47 (0,9 roku)	0,32	-153,9	68 (1,3 roku)	1,76	314,2

Po usunięciu trendu liniowego oraz najbardziej istotnych składowych periodycznych rezydualne szeregi czasowe współrzędnych stacji „WROC” wykazują charakter szumu białego (rys. 8).

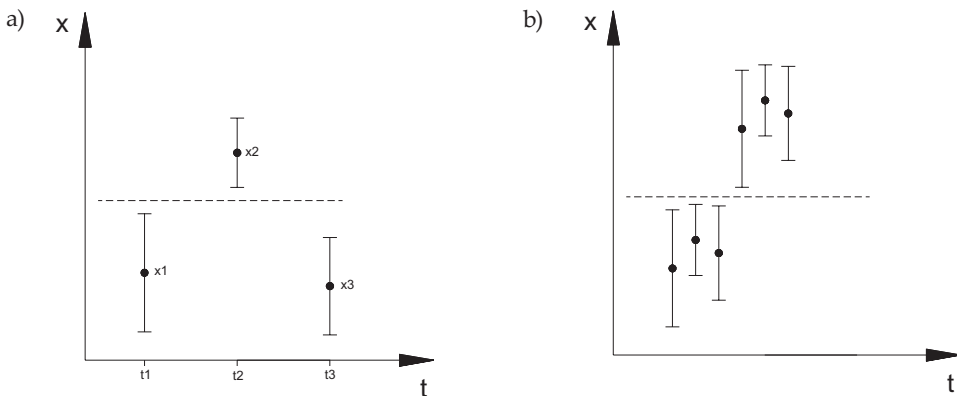
**Rys. 8.** Ciągi czasowe współrzędnych topocentrycznych N, E, U stacji „WROC” po usunięciu trendu liniowego i składowych okresowych

### 3.4. Analiza przemieszczeń epizodycznych

Skokowa zmiana współrzędnych, czyli tzw. przemieszczenie epizodyczne, może być spowodowana zarówno czynnikami naturalnymi – tektonicznymi (wstrząsy sejsmiczne i inne gwałtowne ruchy w obrębie skorupy ziemskiej) – jak i czynnikami antropogenicznymi (uszkodzenie znaku pomiarowego, zmiana anteny na punkcie pomiarowym – przesunięcie centrum fazowego, zmiana układu odniesienia, itp.).



Rys. 9. Ilustracja istotnej różnicy sąsiednich obserwacji



Rys. 10. Przykład różnicy obserwacji, która wynika z:  
a) obserwacji odstających; b) przemieszczenia epizodycznego

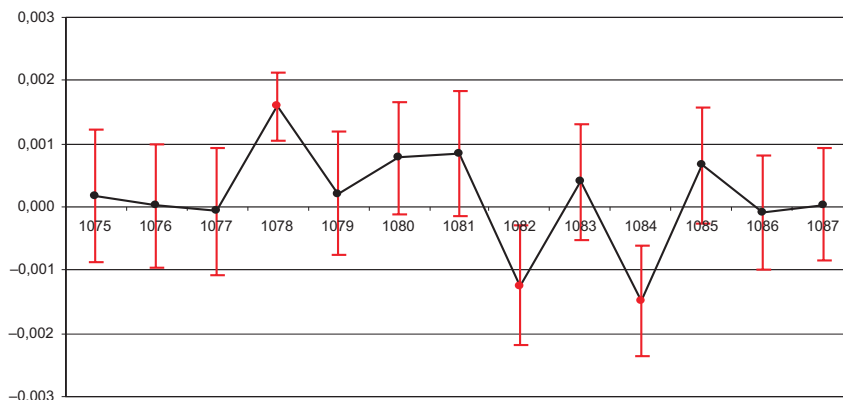
Model ruchu uwzględniający przemieszczenia epizodyczne powinien być w szczególności zastosowany po uzyskaniu informacji o [5]:

- wystąpieniu wstrząsu tektonicznego (lub górniczego) w rejonie punktu lub na obszarze przyległym;
- naruszeniu słupa pomiarowego powodującego zmianę jego położenia;
- zmianie anteny na punkcie pomiarowym (o ile korekty centrum fazowego anten nie są wyznaczane w procesie obliczeniowym);
- znaczącej zmianie otoczenia punktu pomiarowego (np. odbicia sygnału satelitarnego).

Do wykrycia ewentualnych przemieszczeń epizodycznych w rezydualnych szeregach czasowych zastosowano algorytm składający się z dwóch etapów:

1. znalezienia par obserwacji, których różnica jest większa od dwukrotnej sumy błędów tych obserwacji (rys. 9);
2. analizy charakteru różnic dla znalezionych par – jednorazowe obserwacje „odstające” lub „stała” różnica pomiędzy grupami obserwacji (rys. 10).

W wyniku pierwszego etapu analizy zidentyfikowano 5 par istotnych różnic dla współrzędnej N i 7 par takich różnic dla współrzędnej E. Nie znaleziono istotnych różnic dla współrzędnej U.



**Rys. 11.** Wykres wartości składowej E dla przedziału 1075–1087 tygodni GPS

Analiza zidentyfikowanych różnic w etapie drugim wykazała obecność obserwacji odstających dla wszystkich par istotnych różnic (przykład – rys. 11).

## 4. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych analiz szeregów czasowych współrzędnych stacji WROC można stwierdzić że:

- liniowa prędkość pozioma stacji WROC, rezydualna względem modelu geokinematycznego NUVEL1A-NNR, wynosi ok. 1,5 mm/rok w kierunku NW;
- prędkość liniowego ruchu pionowego wynosi ok. +0,5 mm/rok;
- zmiany okresowe w ciągach czasowych współrzędnych stacji WROC są istotne. Maksymalne amplitudy tych zmian osiągają wartości ok. 1 mm dla składowej N, ok. 2 mm dla składowej E i ok. 4 mm dla składowej wysokościowej;
- największe amplitudy osiągają zmiany periodyczne o okresie kilkuletnim (ok. 9 lat i 4,5 roku). Cykliczne zmiany roczne są istotne tylko dla składowej wysokościowej;
- nie wykryto istotnych zmian skokowych (przemieszczeń epizodycznych).

Z uwagi na stosunkowo krótki jeszcze czas działania stacji „WROC” przedstawione wyniki mają charakter rezultatów wstępnych. Niemniej otrzymane parametry modelu zmian współrzędnych stacji mogą być poddane próbie interpretacji, co będzie stanowiło tematykę następnego etapu badań.

## Literatura

- [1] Altamimi Z., Boucher C.: *Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign* (<http://lareg.ensg.ign.fr/EUREF/memo.pdf>) 2001.
- [2] Bosy J., Kontny B.: *Wielofunkcyjna permanentna stacja referencyjna GPS/GLONASS „Wrocław”*, Zeszyty Naukowe WSOSP, Dęblin, Nr 2/2001, s. 11–22.
- [3] Czarnecki K.: *Geodezja współczesna w zarysie*, Wydawnictwo Wiedza i Życie 1997.
- [4] Kontny B.: *Zagrożenia naturalne obiektów inżynierskich na Dolnym Śląsku w świetle najnowszych wyników pomiarów GPS w lokalnych sieciach geodynamicznych*, Zeszyty Naukowe AR Wrocław, Geodezja i Urządzenia Rolne XX, nr 352, Wrocław, 2002, s. 175–180.
- [5] Kontny B.: *Geodezyjne badania współczesnej kinematyki głównych struktur tektonicznych polskich Sudetów i bloku przedsudeckiego na podstawie pomiarów GPS*, Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Nr 468, Rozprawy CCII, 2003, s. 146.
- [6] Kontny B., Bosy J., Makolski K.: *Local Geodynamic Network KARKONOSZE – the results of three years of measurements and first interpretations*, Acta Geodynamica et Geomaterialia (formerly Acta Montana), Vol. 1, No. 3 (135), 2004, s. 83–89.

- [7] Marven C., Ewers G.: *Zarys cyfrowego przetwarzania sygnałów*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1999.
- [8] Schenk V., Cacoń S., Bosy J., Kontny B., Kottnauer P., Schenkowa Z.: *The GPS geodynamic network East Sudeten. Five annual campaigns (1997-2001). Data processing and results*. Acta Montana, Ser. A, Geodynamics, No 20 (124), Praha, 2002, s. 13–23.
- [9] Wiśniewski Z.: *Rachunek wyrównawczy w geodezji*, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, 2005.