

Konferencja naukowa
**Systemy odniesień przestrzennych — podstawy geodynamiczne, aktualne
realizacje oraz kierunki rozwoju**



INSTYTUT NAWIGACJI

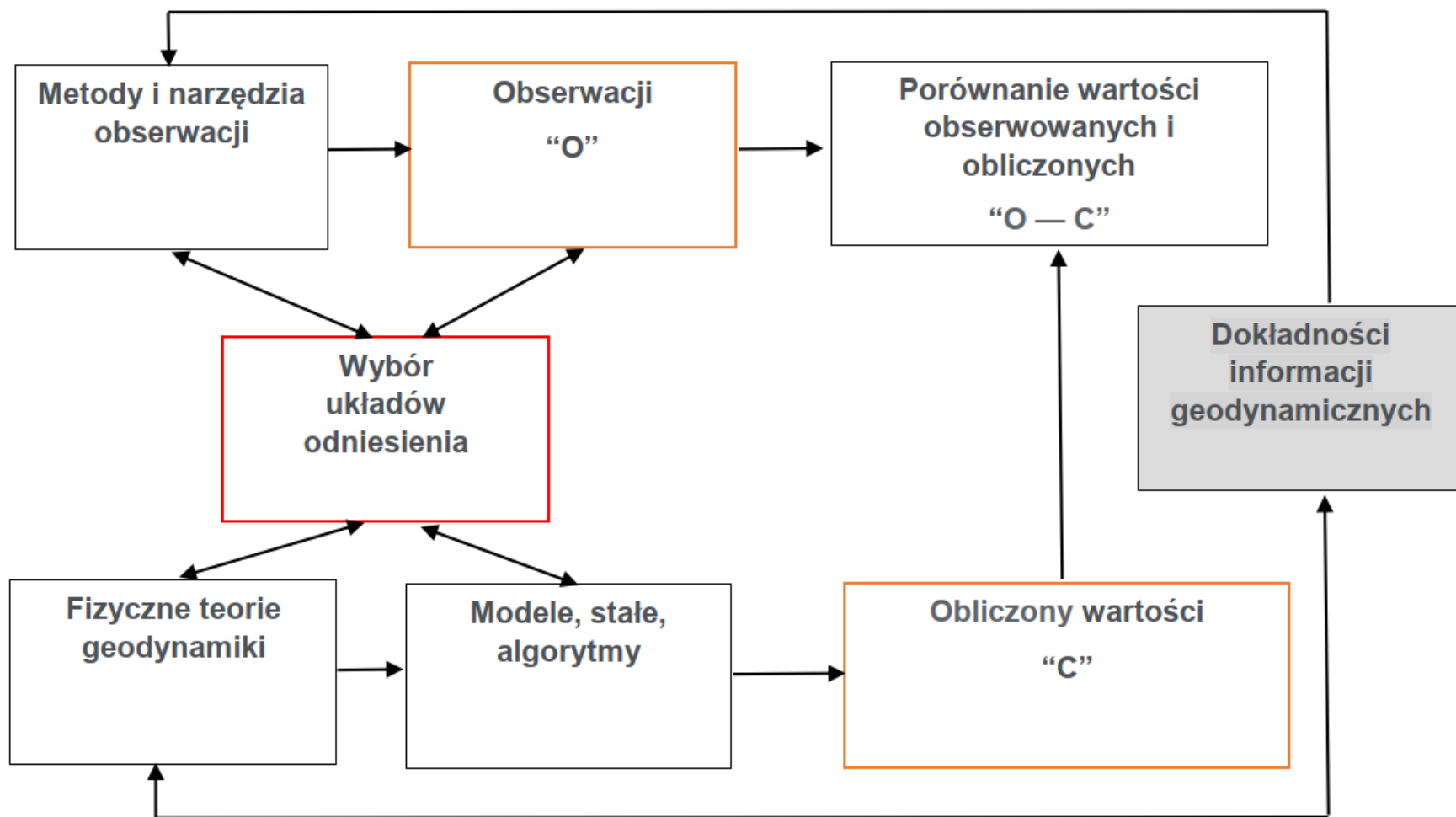
Wpływ regionalnych zestawów stacji referencyjnych GNSS na interpretacje geodynamiczne w Europie Środkowo-Wschodniej

Stepan SAWCZUK, Adam LYSZKOWICZ – *Lotnicza Akademia
Wojskowa w Dęblinie*

Sofia DOSKICZ – *Politechnika Lwowska*

- W celu realizacji układu odniesienia należy wykonać specjalne obserwacje (pomiaru) i połączyć je za pomocą wybranych modeli fizycznych z oszacowanymi parametrami, w tym współrzędnymi obiektów odniesienia: punktów na powierzchni Ziemi, kwazarów itp.
- W wyniku przetworzenia takich obserwacji uzyskuje się praktyczną realizację układu odniesienia.
- Proces ten ma charakter cykliczny, gdyż prowadzi do nowego etapu doskonalenia metod pomiaru charakterystyk geodynamicznych, a także budowy bardziej zaawansowanych modeli teoretycznych badanych zjawisk.
- Porównując wyniki obserwacji z teorią (modelami) uzyskujemy nowe informacje o badanym zjawisku, które przez pewien czas mogą odpowiadać potrzebom nauki i praktyki.

Uzyskiwania $O - C$. (różnice obserwowanych i obliczonych parametrów)



Zgodność obserwowanej pozycji z obliczoną świadczy o prawidłowości przeprowadzonych badań

Jednym z kluczowych aspektów realizacji regionalnego układu odniesienia jest redukcja pola prędkości opartego na ITRF do tzw. stabilnej części kontynentu (płyta tektoniczna) za pomocą następującego zlinearyzowanego równania:

$$\mathbf{V}_i^{Eyy} = \mathbf{V}_i^{Iyy} + \begin{pmatrix} 0 & -\dot{R}3_{YY} & \dot{R}2_{YY} \\ \dot{R}3_{YY} & 0 & -\dot{R}1_{YY} \\ -\dot{R}2_{YY} & \dot{R}1_{YY} & 0 \end{pmatrix} \times \mathbf{X}_{YY}^I.$$

Jeżeli prędkości liniowe $\mathbf{V}_i^{Iyy}$ są wyznaczone instrumentalnie dla kilku punktów płyty, to położenie bieguna Eulera i prędkość kątową $\boldsymbol{\Omega}$ można ustawić analitycznie:

$$\mathbf{V}_i^{Eyy} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{X}_i = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_Z & \omega_Y \\ \omega_Z & 0 & -\omega_X \\ -\omega_Y & \omega_X & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}.$$

Ocena parametrów bieguna Eulera w odniesieniu do płyty euroazjatyckiej w ITRF

Frame	Φ °	Λ °	Ω (deg/My)	Ω (mas/y)	$\dot{R}_{1YY}$ (mas/y)	$\dot{R}_{2YY}$ (mas/y)	$\dot{R}_{3YY}$ (mas/y)
ITRF2000	54.61	256.12	0.249	0.935	-0.081	-0.490	0.792
ITRF2005	56.33	264.02	0.261	0.939	-0.054	-0.518	0.781
ITRF2008	54.23	261.17	0.257	0.924	-0.083	-0.534	0.750
ITRF2014	54.20	260.05	0.261	0.939	-0.085	-0.531	0.770

$$\mathbf{V}_i^{Eyy} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{X}_i = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_Z & \omega_Y \\ \omega_Z & 0 & -\omega_X \\ -\omega_Y & \omega_X & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}.$$

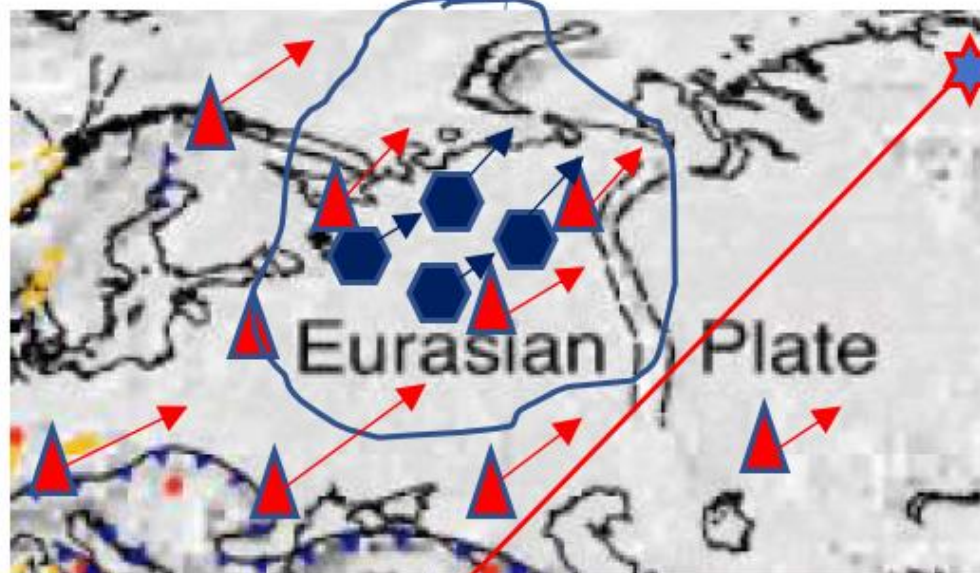
Równanie to pokazuje prędkość V ruchu pewnego punktu i , znajdującego się na stałej części płyty tektonicznej o współrzędnych $\mathbf{X}_i = [X_i, Y_i, Z_i]^T$, względem prędkości kątowej $\boldsymbol{\Omega}$ bieguna Eulera. Takimi punktami naszych badań są permanentne (referencyjne) stacje GNSS wybrane według określonych kryteriów.

Głównym problemem związanym z dokładnością wyznaczania prędkości zestawu punktów sieci znajdujących się na fragmencie płyty tektonicznej nie jest wpływ rozrzutu błędów pomiarowych na wyniki wyrównywania, lecz **określenie i kwantyfikacja kryteriów**, według których zestaw takich punktów może zapewnić stabilne rozwiązanie niż inny zestaw punktów bazowych dla tej samej sieci.

Earth rotation
axis

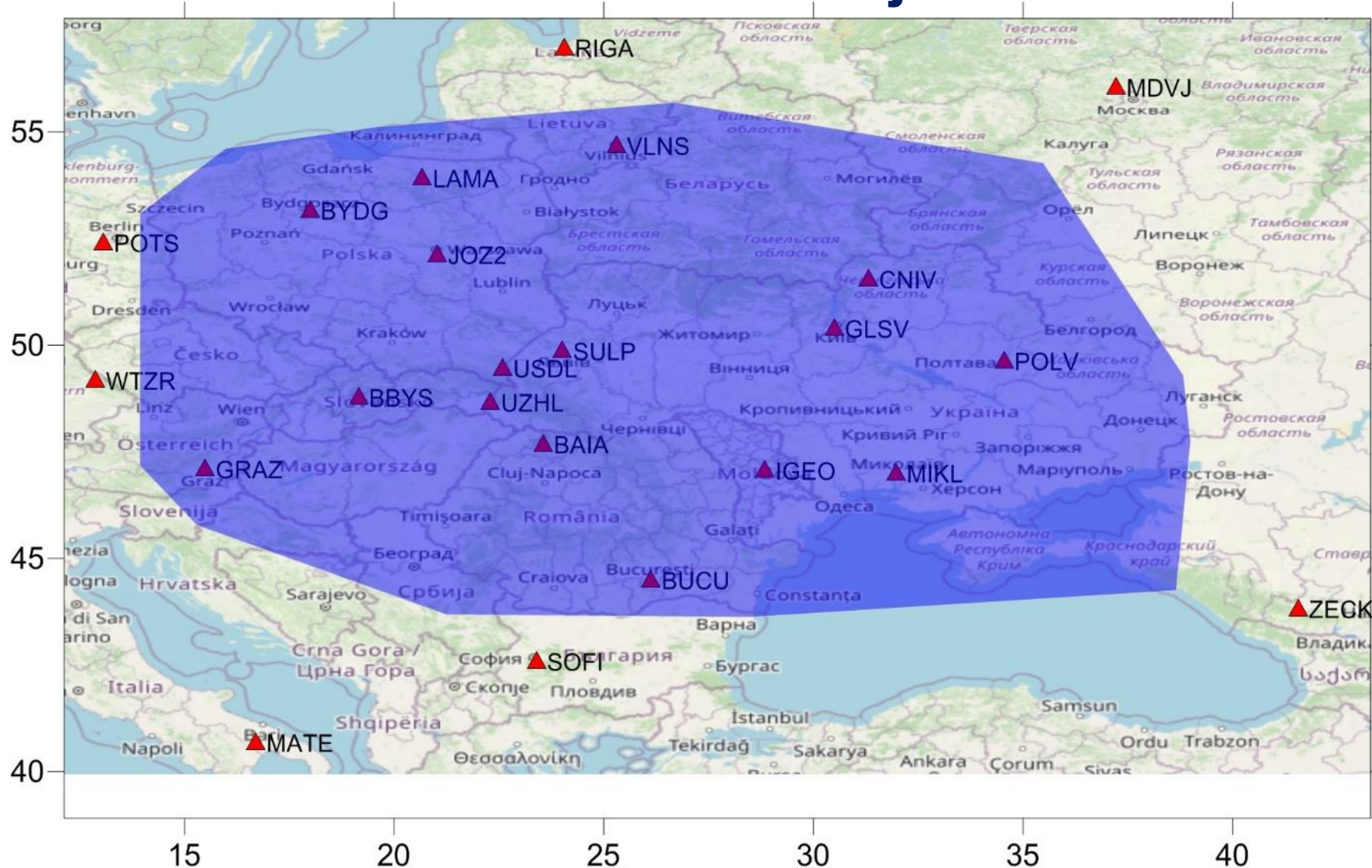
 Ω

Euler pole

 Φ Λ 

- Do badań wykorzystano obserwacje GNSS z lat 2013-2017 z sieci EPN (23 stacje GNSS) oraz prywatne sieci stacji referencyjnych w Europie Środkowo-Wschodniej (149 stacji GNSS).
- Wybór takiego przedziału czasowego wynikał z faktu, że kiedyś prawie wszystkie te obserwacje zostały już przetworzone pięć lat temu (Savchuk S., Doshich, 2017), a teraz faktycznie przetworzyliśmy je ponownie.
- Celem tego ponownego przetwarzania było przejście do nowej realizacji ITRF2014, a także wykorzystanie nowych modeli i parametrów zaimplementowanych w oprogramowaniu.
- Główna część stacji GNSS należała do polskiej sieci VRSNet.pl (59 stacji) oraz ukraińskiej sieci ZAKPOS - (90 stacji).

Rozmieszczenie stacji GNSS



- Dane GNSS za 5 lat (2013-2017) zostały przetworzone, a błędy oszacowane za pomocą oprogramowania GAMIT/GLOBK.
- Ten proces obliczeniowy składał się z dwóch etapów organizacyjnych.
- W pierwszym etapie GAMIT, który obejmuje metodę najmniejszych kwadratów, został wykorzystany do przetwarzania danych z obserwacji fazy w celu oszacowania trójwymiarowych współrzędnych względnych stacji naziemnych, orbit satelitów, opóźnień atmosferycznych w zenicie i parametrów orientacji Ziemi.
- W drugim etapie zastosowano globalny filtr Kalmana (GLOBK) do oszacowania sekwencyjnego zbioru współrzędnych stacji i ich prędkości, łącząc otrzymane w pierwszym etapie dobowe rozwiązania swobodne i ich kowariancje.

- W porównaniu do poprzedniego opracowania zastosowaliśmy następujące zmiany modeli i parametrów:
 - *added grid tables for GPT3 model and set default (gpt.grid) to latest, highest-resolution file (gpt3_1.grd) from gpt2_5.grd.GG;*
 - *added IGRF13 magnetic field model and changed default from IGRF12 to IGRF13;*
 - *added ECOMC Radiation Model for ARC and changed default from BERNE to ECOMC;*
 - *added FES2014b ocean tide loading list file corresponding to all sites in igb14_comb.apr;*
 - *set Etide model to IERS10 and added UT1 Libration to Earth Rotation model;*
 - *implemented new Desai and Sibois diurnal/semidiurnal ocean tide EOP model;*
 - *updated to use DE405 (little-endian) file for 1900-2050 from JPL.*
- Ponadto uwzględniono wiele drobnych usprawnień w algorytmach przetwarzania i wyeliminowano zidentyfikowane nieścisłości.

- W Gamit/Globk logika parametrów pozwala na użycie maksymalnie 99 stacji. Przy znacznej liczbie stacji większą wydajność osiąga się dzięki przetwarzaniu równoległemu z wykorzystaniem połączonych podsieci. W ten sposób sieć wejściowa, która obejmowała około 160 stacji, została podzielona na trzy połączone podsieci (zachodnią, wschodnią i środkową).
- Każda podsieć dynamiczna jest przetwarzana niezależnie za pomocą oprogramowania GAMIT. Rozwiązania trzech podsieci dobowych są łączone w jedno rozwiązanie dobowe (szacowane są tylko przesunięcie liniowe i rotacja) za pomocą GLOBK przy użyciu szacowanych pozycji 23 stacji bazowych.

- Wszystkie dobowe swobodny rozwiązania za cały okres (tygodnie GPS 1721-1982) są połączone w długoterminowe rozwiązanie z GLORG.
- To długoterminowe rozwiązanie jest dostosowane do ITRF2014 przy użyciu minimalnych ograniczeń dotyczących wszystkich parametrów transformacji z wybranym zestawem stacji referencyjnych EPN.
- 23 GNSS stacje bazowe zostały wybrane na podstawie dostępności ich danych (co najmniej 80% całkowitego okresu przetwarzania) oraz ich jakości.
- Stacje o znanych lub podejrzewanych odstępach prędkości zostały odrzucone. W procesie iteracyjnym odrzucono również stacje wykazujące duże pozostałości pozycji i prędkości względem ITRF2014. Progi dla współrzędnych ustalono: 0,5 cm w poziomie i 1,5 cm w pionie. Progi dla prędkości resztkowych ustalono odpowiednio na 1,5 mm/rok i 2 mm/rok.

Tabela “Summary velocity estimates from GLOBK Ver. 5.34” przedstawia przykład odrzucenia stacji RJHE.

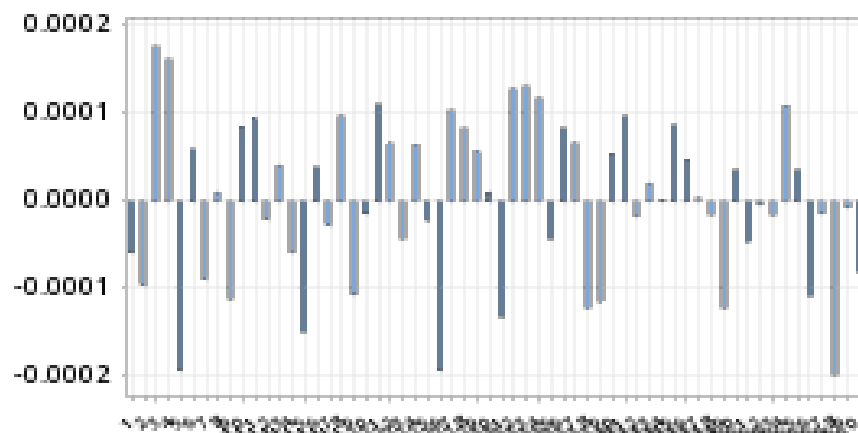
Long./ (deg)	Lat./ (deg)	E & N Rate/(mm/yr)		E & N +-(mm/yr)		Site
41.56507	43.78839	25.41	11.52	0.02	0.02	ZECK_4PS*
37.81146	47.99709	24.45	12.59	0.09	0.10	DNCK_GPS
23.33779	50.35018	20.69	15.33	0.23	0.29	TOML_GPS
25.26685	50.91062	19.84	09.76	1.49	1.78	RJHE_GPS
22.20079	49.55975	20.42	13.28	0.76	0.97	SANO_GPS
...	...	...	...	...	...	...

- Po otrzymaniu rozwiązania długoterminowego (plik globk.org) utworzono <residual time series> (składników topocentrycznych E , N , U) dla 150 stacji GNSS.
- Ich RMS wahają się od 1,5 mm do 2,5 mm dla składowych poziomych.
- Tylko część tych wartości przypisana szumowi danych GNSS, ponieważ duża część czasowej zmienności w <residual time series> jest związana z efektami periodycznymi wywołanymi przez niemodelowane procesy geodynamiczne.

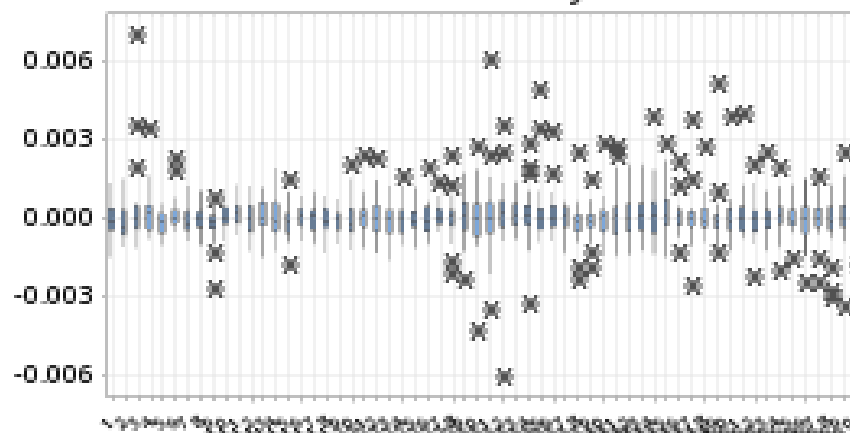
Seasonal Analysis for N station JOZ2

Additive Model

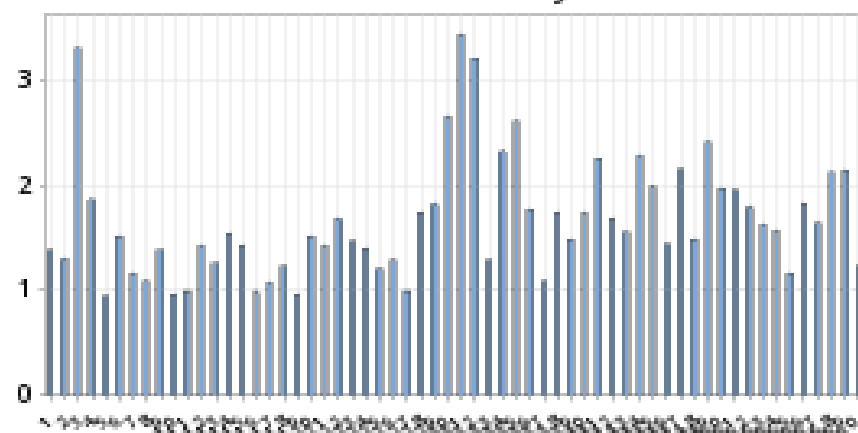
Seasonal Indices



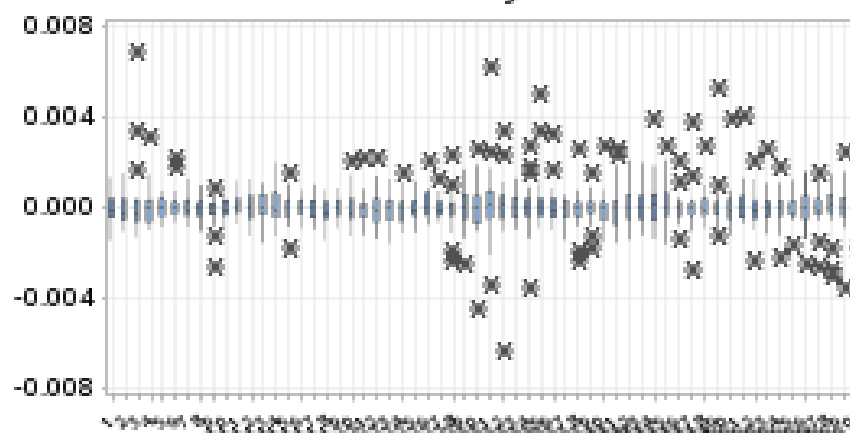
Detrended Data by Season



Percent Variation by Season



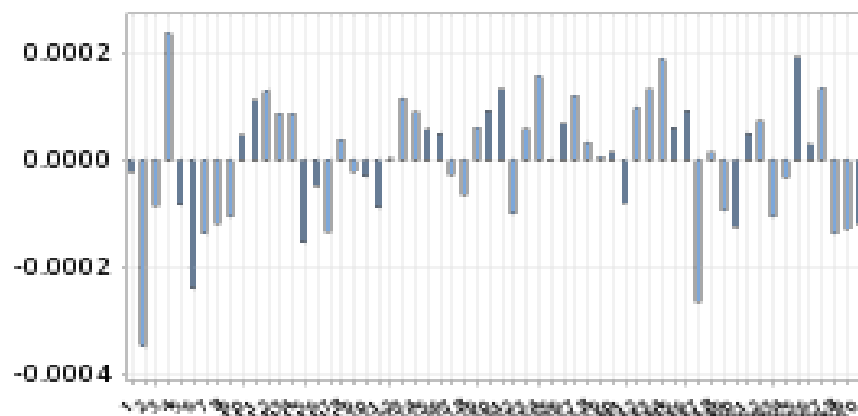
Residuals by Season



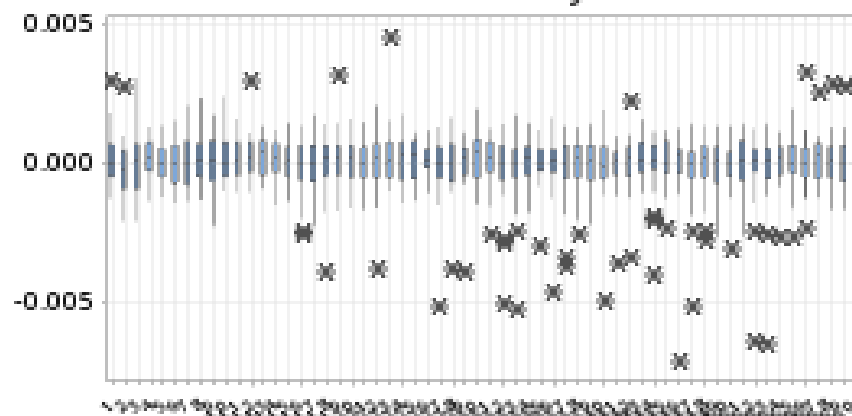
Seasonal Analysis for E station LAMA

Additive Model

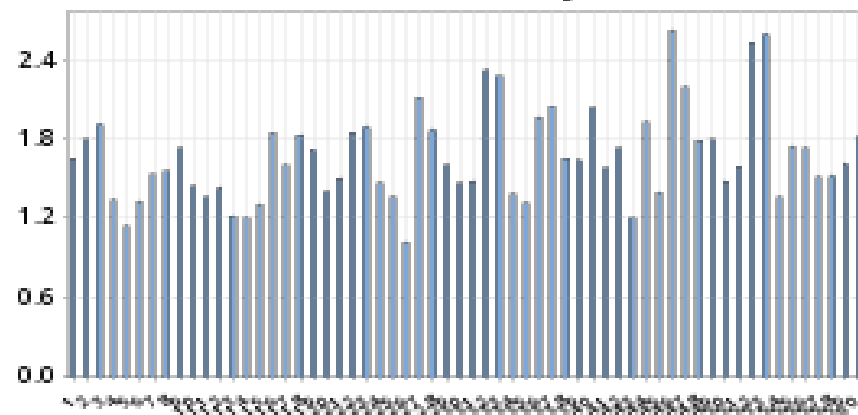
Seasonal Indices



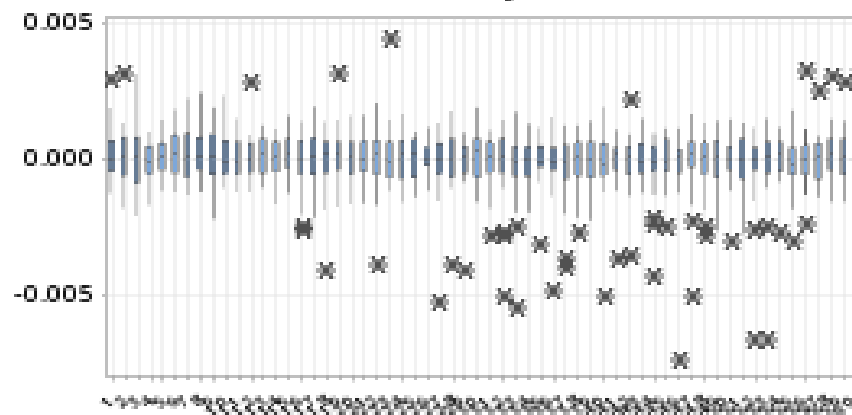
Detrended Data by Season



Percent Variation by Season



Residuals by Season



- Pakiet oprogramowania GAMIT-GLOBK umożliwia przetwarzanie danych pojedynczej płyty tektonicznej lub mniej sztywnego bloku z własnego rozwiązania za pomocą polecenia „płyta” programu **glorg**.
- Za pomocą tego polecenia **glorg** oblicza wektor obrotu (biegun Eulera) bloku (warstwy sferycznej), który zawiera wybrane stacje (punkty), w odniesieniu do stabilizacji układu odniesienia.
- Oryginalny plik ORG zawiera składowe i błędy rotacji wektora i zastępuje regulację prędkości wartościami uzyskanymi podczas stabilizacji z pozostałościami związanymi z płytą proponowaną do włączenia tych punktów.
- Podobnie obliczyliśmy parametry rotacji części płyty euroazjatyckiej obejmującej Europę Środkowo-Wschodnią.

W tym celu cały zbiór danych został podzielony na cztery sieci stacji GNSS (scenariusze):

- sieć 1 obejmuje wszystkie stacje klasy A zgodnie ze starą klasyfikacją EUREF (**scenariusz 1**);
- sieć 2 obejmuje wybór wszystkich stacji, które należały do klasy C0 zgodnie z nową klasyfikacją EUREF (**scenariusz 2**);
- sieć 3 obejmuje wszystkie stacje, które należały do klasy C2 zgodnie z nową klasyfikacją EUREF (**scenariusz 3**);
- sieć 4 obejmuje wszystkie stacje należące do klasy C0 i C2 zgodnie z nową klasyfikacją EUREF (**scenariusz 4**).

Motywacja

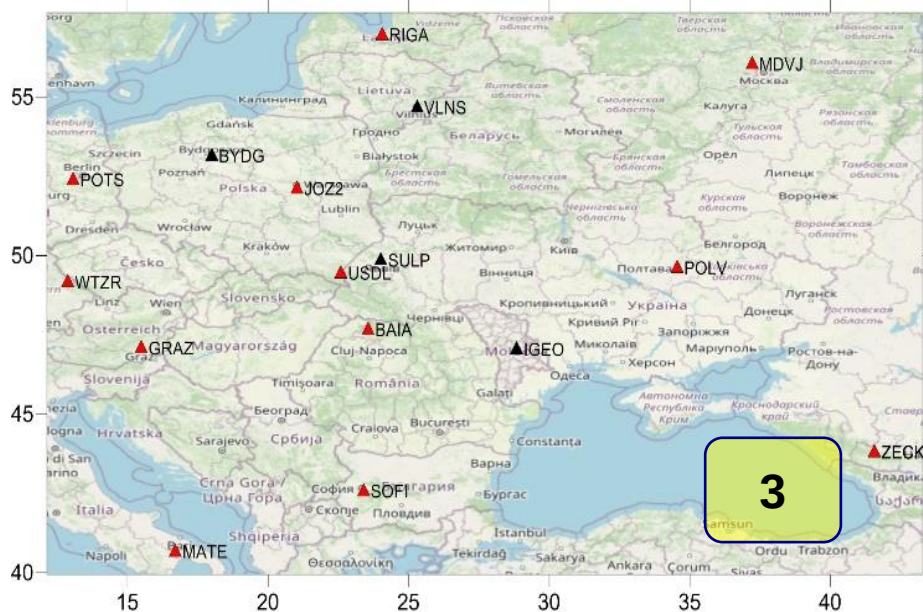
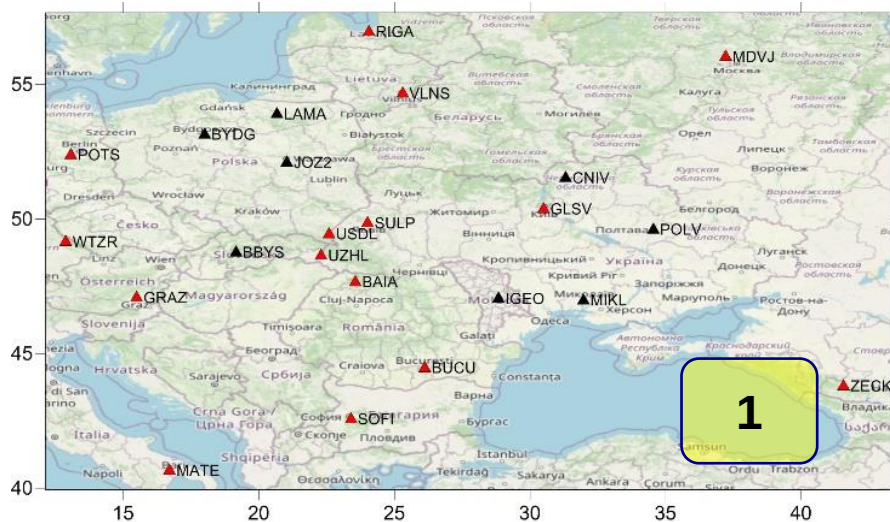
Dane

Opracowanie

Wyniki

Analiza

Podsumowanie



Grybów

8-10 czerwca 2022 r.

Plate rotation vector results

Sites (class **A** station) used to estimate pole positions

PLATE	SITES
EURASIA (Central and Eastern Europe)	POLV_2PS MIKL_2PS CNIV_3PS IGEO_GPS JOZ2_2PS LAMA_3PS BBYS_4PS BYDG_2PS

```

PLATE      SITES
↓
TRANSLATION  X (mm/yr)  +-      Y (mm/yr)  +-      Z (mm/yr)  +-      RhoXY  RhoXZ  RhoYZ
              -9.30      0.72      9.89      0.36      3.43      0.49  -0.511 -0.971 0.299  TRAN

PLATE      Wx (deg/My)  +-      Wy (deg/My)  +-      Wz (deg/My)  +-      RhoXY  RhoXZ  RhoYZ
EURASIA    0.027433    0.002454  -0.069127  0.007492  0.118801  0.003287  -0.040 -0.467 -0.801  XYZ

PLATE      Lat. (deg)  +-      Long (deg)  +-      Mag (deg/My)  +-      RhoLtLg RhoLtMg RhoLgMg
EURASIA    57.953      1.985      -68.354      2.707      0.140160  0.006085  0.492 -0.844 -0.841  LLM

Checking covariance matrix after equate and force
Globk Analysis GGVer 10.71.019 Mon Aug 30 16:01:10 EDT 2021
  
```

Parametry obrotu (biegun Eulera) części płyty euroazjatyckiej

Scen.	Φ (deg)	Λ (deg)	Ω (deg/My)	$\dot{R}1_{E14}$ (deg/My)	$\dot{R}2_{E14}$ (deg/My)	$\dot{R}3_{E14}$ (deg/My)
1	57.953 ± 1.985	291.646 ± 2.707	0.140160 ± 0.006085	0.027433 ± 0.002454	-0.069127 ± 0.007492	0.118801 ± 0.003287
2	72.788 ± 1.561	292.560 ± 3.367	0.158679 ± 0.005646	-0.039574 ± 0.005245	-0.025270 ± 0.011158	0.151572 ± 0.004305
3	66.980 ± 1.733	293.488 ± 2.616	0.162969 ± 0.005182	0.025400 ± 0.002070	-0.058449 ± 0.006705	0.149992 ± 0.003220
4	67.161 ± 1.741	293.389 ± 2.632	0.162775 ± 0.005170	0.025080 ± 0.002070	-0.057988 ± 0.006705	0.150014 ± 0.003220

Na podstawie danych z tabeli **Parametry obrotu** oraz zgodnie ze wzorem

$$\mathbf{V}_i = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{X}_i = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_Z & \omega_Y \\ \omega_Z & 0 & -\omega_X \\ -\omega_Y & \omega_X & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}.$$

obliczyliśmy prędkości zmian współrzędnych 150 punktów GNSS.

Prędkości te porównano z prędkościami „teoretycznymi”, które obliczono na podstawie danych w tabeli **Ocena parametrów bieguny Eulera** dla realizacji ITRF2014.

Otrzymane różnice prędkości geocentrycznych zostały przekształcone w różnice topocentryczne ΔV_N i ΔV_E .

Tabela **Różnice prędkości Środkowo-Wschodniej części eurazjatyckiej płyty tektonicznej** przedstawia średnie różnice prędkości i ich RMS dla czterech wybranych scenariuszy.

Scen.	Sites used	ΔV_N [mm]	ΔV_E [mm]
1	23	1.30 ± 0.88	1.68 ± 0.74
2	8	0.82 ± 0.46	1.16 ± 0.29
3	14	1.11 ± 0.73	1.49 ± 0.63
4	8	1.12 ± 0.74	1.50 ± 1.02

- Podjęto próbę zmiany liczby stacji, które uczestniczyły w określonych parametrach Eulera.
- Na rysunku **Scenariusze** takie stacje są pokazane w kolorze czarnym.
- Dla każdego scenariusza pozostawiono odpowiednio 8, 4, 5 i 5 stacji.
- Podczas korzystania z tych stacji parametry rotacji znacznie się zmieniły, ale różnice prędkości pozostały prawie na tym samym poziomie.

- Do przeprowadzenia aprobaty nieklasycznej teorii błędów pomiarowych wybraliśmy 8 stacji GNSS sieci EPN z kategorii C0.
- W tym celu wykorzystano szeregi czasowe obserwacji GNSS z lat 2013–2017 pobranych z rozwiązania GAMIT.
- Obliczyliśmy wartości asymetrii, ekscesu i ich standardów, przedziały ufności w celu weryfikacji, czy uzyskane wyniki obserwacji mieszczą się w dopuszczalnej ocenie [Dvulit P. and all.].
- W celu przetestowania hipotezy o podporządkowaniu szeregów czasowych normalnemu prawu rozkładu Gaussa znalezione również wartości prawdopodobieństw $p(\chi^2)$.

Dvulit P., Savchuk S., Sosonka I. (2020). **The processing of GNSS observation by non-classical error theory of measurements.** Geodynamics, Vol. 1(28), p. 19-28, DOI: 10.23939/jgd2020.01.019.

Dvulit P., Savchuk S., Sosonka I. (2021). **Accuracy estimation of site coordinates derived from GNSS-observations by non-classical error theory of measurements.** Geodesy and Geodynamics, Vol.12, Issue 5, DOI:10.1016/j.geog.2021.07.005.

- Z punktu widzenia klasycznej teorii pomiary na stacjach GNSS wykonywane są zadowalająco:
 - asymetria we wszystkich przypadkach jest nieznaczna (wahają się odpowiednio od +0.05 do -0.10), a przedziały ufności pokrywają zero tylko w 4 przypadkach na 8;
 - jeśli chodzi o ekscesie ε , to najkorzystniejszą sytuację obserwuje się dla stacji JOZ2, UZDL, POLV oraz RIGA a najgorsze – dla BAIA ($\varepsilon < 0$). Permanentne GNSS stacji WTZR, GRAZ i POTS znajduje się w środkowej części pozostałych stacji.
- Normalnie prawdopodobieństwo powinno wynosić $p(\chi^2) > 0.3$ zgodnie z nieklasyczną teorią błędów pomiarowych. Otrzymane prawdopodobieństwo wahają się odpowiednio od 0 do 0.67.

Jeśli ponownie obliczymy parametry rotacji Eulera dla scenariusza 2 bez stacji BAIA i ponownie uzyskamy różnice prędkości to: różnice prędkości ΔV zmniejszyły się nieznacznie pod względem wielkości, ale istotniejszym czynnikiem było znaczne zmniejszenie ich błędów (prawie dwukrotnie).

Scen.	Sites used	ΔV_N [mm]	ΔV_E [mm]
2	8	0.82 ± 0.46	1.16 ± 0.29
2	7	0.62 ± 0.21	0.84 ± 0.18

Otrzymane wyniki pokazują, że diagnoza charakterystyk metrologicznych szeregów czasowych obserwacji GNSS metodami nieklasycznej teorii błędów pomiarowych pozwala wiarygodnie ocenić przydatność stacji GNSS do rozwiązywania problemów o najwyższej dokładności, w tym geodynamiki.

- W przypadku korzystania z podejścia sieciowego do wiarygodnego wyrażania pozycji i prędkości GNSS w danym układzie odniesienia (ITRF2014, ETRF2014), konieczne jest zidentyfikowanie „stabilnych” i „niezawodnych” stacji bazowych. Wybór tych stacji może mieć istotny wpływ na szacowane pozycje i prędkości oraz oczywiście na uzyskane interpretacje geodynamiczne.
- Oszacowaliśmy biegun Eulera na wybranych stacjach sieci EPN. Małe prędkości resztkowe pokazują, że wybrane stacje w czterech scenariuszach są dobre do oszacowania bieguna Eulera w Europie Środkowej i Wschodniej.

- Obliczone według parametrów Eulera prędkości różnią się nieznacznie (około 1 mm/rok) od oficjalnie publikowanych dla całej euroazjatyckiej płyty tektonicznej. Wskazuje to, że wybrany obszar obraca się prawie sztywno z płytą tektoniczną i prawdopodobnie nie ma własnego ruchu wewnątrz płyty. Inne przyczyny, takie jak różna liczba i rozkład przestrzenny stacji GNSS, mają mniejszy wpływ na różnicę prędkości.

- Testowanie kryterium Pearsona rozkładu normalnego błędów empirycznych dla stacji EPN w kategorii C0 prezentuje następujące wyniki: prawdopodobieństwo, że pomiary są wybrane z normalnego ogólnego sumowania zmieniającego się od 0 do 0.44 dla N , od 0 do 0.67 dla E , od 0 do 0.38 dla komponentu U , co oznacza, że są znacząco oddalone od praktycznych miar (> 0.3). Biorąc pod uwagę ten fakt, przeliczone różnice prędkości ΔV zmieniły się nieznacznie (zmniejszyły się o 25%), jednak doszło do znacznego zmniejszenia ich błędów.
- W przyszłości konieczne jest zidentyfikowanie przyczyn błędów resztowych, które zniekształcają rzeczywiste rozkłady wyników GNSS w celu osiągnięcia właściwych miar asymetrii i ekscesu dokładności rozkładu typu VII Pearsona-Jeffreysa.

Dziękuję za uwagę !



INSTYTUT NAWIGACJI

s.savchuk@law.mil.pl