

Kamil Kowalczyk\*

## Ruchy pionowe skorupy ziemskiej w Polsce

### 1. Definicja ruchów pionowych

W referacie rozpatrywane są ruchy pionowe górnej warstwy skorupy ziemskiej na obszarze Polski. Przyczyny notowanych ruchów pionowych są różne – od procesów geofizycznych aż po procesy wywołane działalnością człowieka. Szczegółowo, do przyczyn powstawania ruchów pionowych można zaliczyć [15]: powstawanie i znikanie lądolodów, zmiany ilości wód w zbiornikach, sedymentacja, erozja, zwiększanie obciążenia skorupy w rezultacie ruchów górotwórczych, a także zmiany minerałów zachodzące w litosferze oraz prądy konwekcyjne w płaszczu Ziemi. Na zmiany prędkości ruchów pionowych skorupy wpływają również: kopalnie surowców, melioracje, komunikacja, a także testy broni atomowej. Ze względu na możliwość występowania jednocześnie kilku z powyższych czynników można przyjąć, że ruch pionowy skorupy ziemskiej nie jest liniowy, a już na pewno nie ma on charakteru liniowego na większym obszarze. Krótkotrwałe ruchy pionowe nie mogą być wyznaczone z danych niwelacyjnych. Uniemożliwia to okres pomiaru kolejnych kampanii niwelacji precyzyjnej. Takie krótkotrwałe zmiany można wyznaczać z danych GPS na stacji permanentnych.

Ruchy pionowe skorupy ziemskiej można wyznaczać względem różnych poziomów odniesienia. I tak, jeśli w sieci niwelacyjnej przyjmujemy, że pewien reper jest stabilny i jego wysokość nie ulega zmianie w czasie, to ruchy pionowe  $v_r$  wyznaczone względem takiego reperu nazywamy ruchami względnymi. Jeśli ruchy pionowe zostaną wyznaczone względem średniego poziomu morza, to nazywamy je „obserwowanymi” [4].

„Obserwowane” ruchy pionowe skorupy ziemskiej  $v_0$  można wyznaczyć, rejestrując zmiany poziomu morza na stacjach mareograficznych, a także z powtarzanych kampanii niwelacji precyzyjnej

$$v_0 = v_r + v_m \quad (1)$$

gdzie  $v_m$  – ruch pionowy łaty mareografu względem średniego poziomu morza.

\* Wydział Geodezji i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Olsztyn

W Polsce maksymalne „obserwowane” ruchy pionowe skorupy ziemskiej są oceniane na  $-4$  mm/rok [16].

Tak zdefiniowane ruchy pionowe skorupy ziemskiej są odniesione do średniego poziomu morza. Niestety, średni poziom morza nie jest stały. Globalne zmiany poziomu mórz i oceanów  $v_e$  zwane są zmianami eustatycznymi. W rejonie Bałtyku zmiany eustatyczne są szacowane od  $0,8$  mm/rok do  $1,1$  mm/rok [2, 10].

Ruchy pionowe skorupy ziemskiej – poprawione o zmiany eustatyczne – dają ruchy skorupy ziemskiej odniesione do geoidy. W niniejszej pracy ruchy te będą zwane „niwelacyjnymi” i oznaczone przez  $v$ .

Ostatecznie mamy

$$v = v_0 + v_e \quad (2)$$

Należy spodziewać się, że w Polsce maksymalne „niwelacyjne” ruchy pionowe będą wynosić ok.  $-3,0$  mm/rok. Niestety, geoida także ulega zmianom. Z powodu dążenia do równowagi, masy w płaszczu ziemskim przemieszczają się, a tym samym powierzchnia geoidy podnosi się lub opada. Szacuje się [14], że zmiany jej powierzchni są, co najwyżej, dziesięć razy mniejsze niż zmiany wysokości skorupy ziemskiej. Oznacza to, że na terenie Polski maksymalne jej zmiany mogą stanowić  $0,3$  mm/rok, w rejonie zaś Zatoki Botnickiej dochodzić do  $1,0$  mm/rok. Jeśli do ruchów „niwelacyjnych” dodamy ruchy pionowe geoidy  $v_g$ , to tak zdefiniowane ruchy skorupy ziemskiej będą odnosiły się do elipsoidy.

Całkowity ruch pionowy skorupy ziemskiej  $v_a$ , zwany również absolutnym, można zdefiniować następującym wzorem

$$v_a = v_0 + v_e + v_g \quad (3)$$

gdzie  $v_g$  – to ruch spowodowany podnoszeniem się lub opadaniem geoidy.

## 2. Wcześniejsze i obecne wyznaczenia ruchów pionowych na obszarze polski

W roku 1960 J. Niewiarowski i T. Wyrzykowski [12] dokonali pierwszego wyznaczenia prędkości ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski. Prędkości te zostały obliczone z danych niwelacyjnych z lat 1952–1958 (I i II klasa) i 1926–1937 (I klasa), metodą przybliżoną. Metoda ta polegała na porównaniu wysokości wspólnych punktów dwu wyrównanych sieci nawiązanych do tego samego punktu przyjętego jako stały.

Drugie wyznaczenie prędkości ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski wykonano w latach w 1977–1987. Do obliczeń wykorzystano pomiary niwelacyjne z lat 1947–1960 i 1974–1979 [16]. Efektem końcowym tych obliczeń jest mapa prędkości ruchów pionowych skorupy ziemskiej.

Obecnie wyznaczono nowe prędkości ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski [6]. Jako dane do wyznaczenia użyto dane niwelacyjne oraz dane mareograficzne.

### 2.1. Dane niwelacyjne

Do obliczeń wykorzystano dane niwelacyjne, bez poprawek normalnych, z dwóch ostatnich kampanii niwelacji precyzyjnej. Jest to bardzo dobry materiał do tych prac gdyż, pomiar sieci w czwartej kampanii niwelacyjnej (1997–2003) odbywał się głównie po tych samych liniach niwelacyjnych, co pomiary w latach 1974–1982 z niewielkimi zmianami. W efekcie otrzymano 235 wspólnych reperów węzłowych z obu kampanii.

### 2.2. Dane mareograficzne

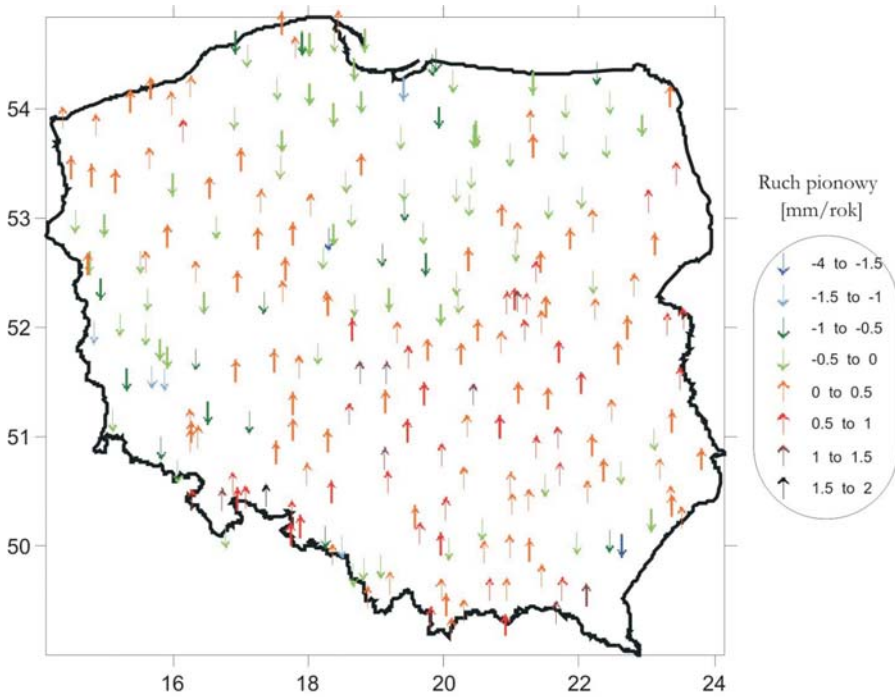
Przy wyznaczeniu prędkości ruchów pionowych skorupy ziemskiej wykorzystano dane z polskich stacji mareograficznych w: Świnoujściu, Kołobrzegu, Ustce i Władysławowie [<http://www.pol.ac.uk/psmsl>]. Dane te (okres obserwacji co najmniej 50 lat), to roczne średnie wartości poziomu morza zredukowane do wspólnego poziomu odniesienia oraz przeanalizowane pod względem jakości przez *Permanent Service of Mean Sea Level* (PSMSL).

Dane mareograficzne (średnie roczne) zostały poddane wygładzeniu metodą średniej ruchomej. Średnia ruchoma przewiduje wartości w okresie prognozy na podstawie średniej wartości zmiennej dla określonej liczby poprzednich okresów. Liczba sąsiadujących elementów jest zdefiniowana przez „okno”. Wielkość okna powinna być równa najdłuższemu okresowi występującemu w danych obserwacyjnych. To sugeruje, że okno powinno wynosić około 20 lat (18,9 roku wynosi okres obiegu węzłów księżyca) [11]. W przypadku okna „prostokątnego” wszystkie elementy mają jednakowe wagi.

### 2.3. Zastosowana metoda

Względne prędkości ruchów pionowych (rys. 1) na reperach węzłowych wyznaczono względem reperu węzłowego we Władysławowie. „Obserwowane” ruchy pionowe na tych reperach wyznaczono względem mareografu we Władysławowie, przyjmując ruch pionowy mareografu jako średnią prędkość z czterech stacji mareograficznych, tj. Świnoujścia, Kołobrzegu i Ustki.

W kolejnym etapie prac względne prędkości ruchów pionowych poddano zagęszczeniu, wykorzystując do tego celu metodę kolokacji [7]. Metoda ta jest powszechnie stosowana do interpolacji odstępów geoidy od elipsoidy.



Rys. 1. Obserwowane ruchy pionowe na obszarze Polski [8]

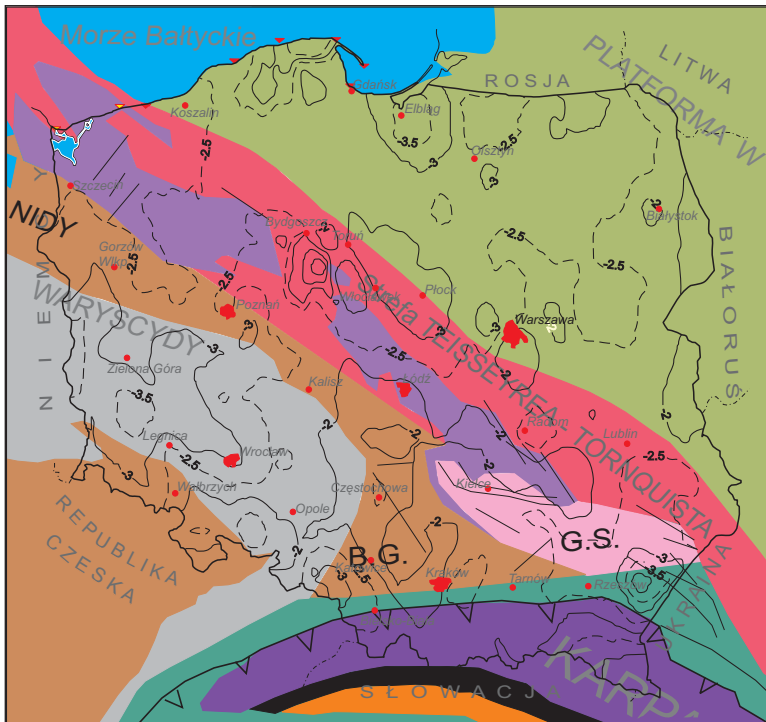
Jako analityczne funkcje kowariancji wykorzystano funkcję kowariancji Hirvonen. Do wszystkich obliczeń zastosowano własne programy obliczeniowe napisane w środowisku Matlab.

#### 2.4. Otrzymane wyniki

W efekcie końcowym otrzymano (rys. 2) matematyczny model prędkości ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski.

W Polsce nie występują ruchy dodatnie. Największe ujemne prędkości ruchów pionowych stwierdzono w okolicach Inowrocławia i Rzeszowa (poniżej  $-5$  mm/rok), obie okolice leżą w tzw. strefie ruchów tektonicznych T-T. W okolicach Warszawy prędkości ruchów pionowych kształtują się od  $-1$  mm/rok do  $-3$  mm/rok. Na większości obszaru Polski prędkości ruchów wahają się od  $-1,5$  mm/rok do  $-3$  mm/rok. Prędkości ruchów pionowych powyżej  $-3$  mm/rok występują w okolicach Elbląga (Żuławy Wiślane), Płocka, Torunia i Włocławka (granica strefy T-T) oraz na obszarze zachodniej Polski: od Wrocławia do Legnicy przez Zieloną Górę do Gorzo-

wa Wielkopolskiego (jest to obszar warwiscydów na granicy z masywem czeskim). Najmniejsze ruchy ujemne, zanotowano w okolicach południowych Bieszczadów (Karpaty).

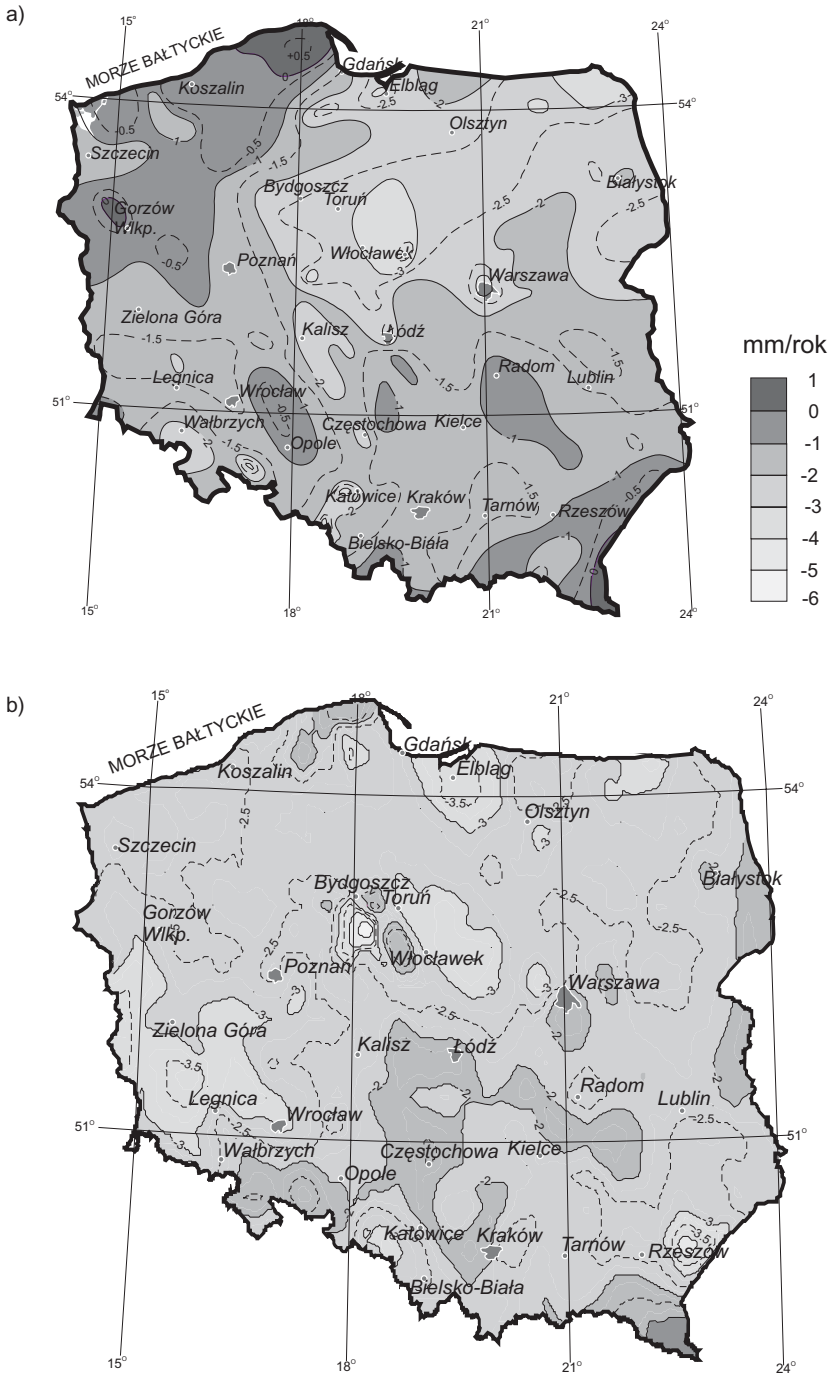


Rys. 2. Mapa prędkości ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski na tle jej budowy geologicznej

## 2.5. Porównanie obu wyznaczeń

Prędkości ruchów pionowych z obu wyznaczeń (rys. 3) częściowo się pokrywają, szczególnie w środkowej i północno-wschodniej Polsce (okolice Elbląga), a także w trójkącie miast: Włocławek – Płock – Toruń.

Najmniejsze prędkości ruchów pionowych na obu mapach występują na obszarze Bieszczadów. W okolicach Warszawy nie zanotowano tak dużych prędkości jak we wcześniejszym wyznaczeniu. Kształtują się one od  $-1$  mm/rok do  $-2$  mm/rok (poprzednio:  $-2,5$  mm/rok do  $-4,1$  mm/rok). Podobne wartości wykazano w okolicach Nysy od  $0$  mm/rok do  $-1$  mm/rok (wcześniej poniżej  $-3$  mm/rok).



Rys. 3. Ruchy pionowe wyznaczone w latach: a) 1985 [16]; b) 2006 [6]

### 3. Ruchy pionowe na permanentnych stacjach GPS – pierwsze wyniki

Prędkości ruchów pionowych skorupy ziemskiej można wyznaczyć również z permanentnych obserwacji GPS gromadzonych w centrach obliczeniowych opracowujących dane ze stacji permanentnych całego świata. Centra te wstępnie obliczają gromadzone obserwacje, a wyniki, w postaci szeregów czasowych, są publikowane w Internecie. Dane do analiz przeprowadzonych w niniejszej pracy pobrano z serwera <ftp://igs.ensg.ign.fr>. Dane te, zapisane w formacie SINEX, opracował Massachusetts Institute of Technology, a o ich wyborze zdecydowała znacząca liczba polskich stacji włączonych do obliczeń w tym centrum oraz dostępność danych z długiego okresu obserwacyjnego. Procedurę obliczeniową, której analizowano szeregi czasowe, zaczerpnięto z literatury [1, 5].

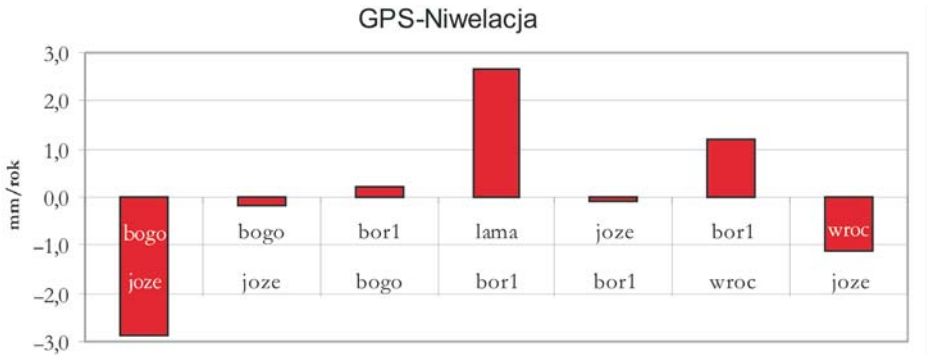
Badania przeprowadzono na stacjach permanentnych w Lamkówku, Borowej Górze, Borowcu, Wrocławiu, Józefosławiu oraz Władysławowie. Dane obejmowały średnio 440 tygodni GPS (od ok. 860 tyg. do 1300 tygodnia) z wyłączeniem stacji we Władysławowie. Do obliczeń zastosowano własne programy obliczeniowe napisane w środowisku Matlaba. Danych nie poddano wygładzeniu. Otrzymane prędkości ruchów pionowych wahają się od  $-0,5$  mm/rok na stacji JOZE, a do  $-4$  mm/rok na stacji LAMA. Przeprowadzono także sprawdzenie długości okresu z jakiego należy zastosować dane, aby otrzymać prędkości ruchów pionowych z żadaną dokładnością. I tak, gdy do obliczeń użyto danych, z co najmniej sześciu lat, empiryczne odchylenie standardowe wynosiło ok.  $\pm 0,2$  mm/rok, a z co najmniej czteroletniego okresu obserwacji  $\pm 0,5$  mm/rok. Z tego wynika, że w przypadku polskich stacji GPS okres obserwacji powinien wynosić co najmniej 4 lata, czyli o rok dłużej niż okres podany w literaturze, czyli 3 lata [3].

Podjęto także próbę porównania prędkości ruchów pionowych na stacjach permanentnych z prędkościami ruchów pionowych wyznaczonych z niwelacji precyzyjnej. Wartość ruchu eustatycznego przyjęto jako  $+0,9$  mm/rok [10, 2].

Najmniejsze różnice otrzymano z porównania ruchów pionowych otrzymano na stacjach permanentnych BOGO, BOR1, JOZE, średnio  $-0,2$  mm/rok. Największą różnicę stwierdzono na stacji (LAMA  $-2,9$  mm/rok).

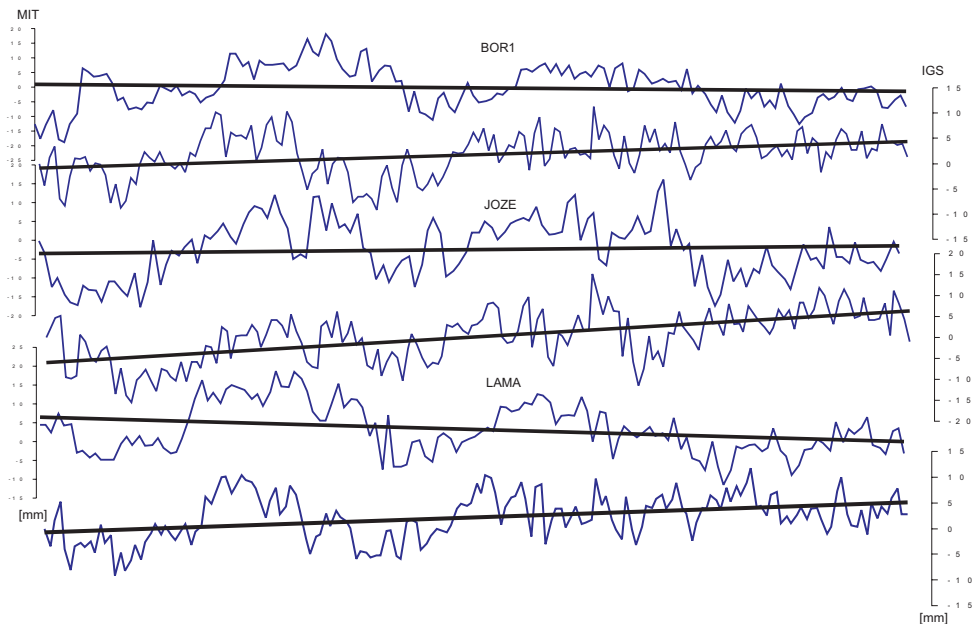
Powyższe porównanie dotyczyło ruchów bezwzględnych. Autor postanowił przeanalizować także ruchy względne. W tym przypadku porównano zmiany ruchów pionowych między stacjami permanentnymi, nie zaś same ruchy pionowe. Graficzne zestawienie różnic zmian ruchów pionowych pomiędzy stacjami permanentnych przedstawiono na rysunku 4.

Najmniejsze różnice zaobserwowano między stacjami: JOZE, BOR1, BOGO, największe z wykorzystaniem stacji LAMA (ok.  $-3$  mm/rok).



**Rys. 4.** Różnice zmiany ruchów pionowych między stacjami permanentnymi wyznaczone z danych niwelacyjnych i GPS

Jak wspomniano wcześniej, do badań wykorzystano dane z Massachusetts Institute of Technology (MIT), jednak istnieje szereg innych centrów obliczeniowych. Na rysunku 5 pokazano kierunki trendu dla danych ze stacji BOR1, LAMA i JOZE opracowanych przez wyżej wymieniony instytut oraz dane opracowane w ramach programu *International GPS Service for Geodynamics* (IGS).



**Rys. 5.** Kierunki trendu wyznaczone z danych MIT i IGS



Otrzymane rezultaty różnią się od siebie: BOR1 ( $-0,84$  mm/rok/ $1,58$  mm/rok), JOZE ( $0,81$  mm/rok / $3,73$  mm/rok), LAMA ( $-2,46$ mm/rok / $1,78$  mm/rok). Wynika z tego konieczność przeprowadzenia szczegółowej analizy danych podczas wyznaczania ruchów pionowych z danych GPS.

#### 4. Wnioski

Opracowano model współczesnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej dla obszaru Polski. Wykorzystano do tego celu dane niwelacyjne: 1974–1982 i 1997–2003. Model ten odniesiono do średniego poziomu południowego wybrzeża Morza Bałtyckiego. Model jest opracowany jako numeryczny zbiór wyinterpolowanych ruchów pionowych w punktach siatki południków i równoleżników oraz analogowa mapa ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski.

W Polsce nie występują ruchy dodatnie. Największe ujemne ruchy pionowe stwierdzono w okolicach Inowrocławia i Rzeszowa (poniżej  $-5$  mm/rok), obie okolice leżą w tzw. strefie ruchów tektonicznych T-T. W okolicach Warszawy ruchy pionowe kształtują się od  $-1$  mm/rok do  $-3$  mm/rok. Na większości obszaru Polski ruchy wahają się od  $-1,5$  mm/rok do  $-3$  mm/rok. Ruchy pionowe powyżej  $-3$  mm/rok występują w okolicach Elbląga (Żuławy Wiślane), Płocka, Torunia i Włocławka (granica strefy T-T) oraz na obszarze zachodniej Polski: od Wrocławia do Legnicy przez Zieloną Górę do Gorzowa Wielkopolskiego (jest to obszar waryscydlów na granicy z masywem czeskim). Najmniejsze ruchy ujemne zanotowano w okolicach południowych Bieszczadów (Karpaty).

Pierwsze testy modelu wskazują na jego poprawność. Istnieje jednak konieczność dalszego weryfikowania opracowanego modelu ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski w oparciu o dane geologiczne, grawimetryczne geomorfologiczne. Model ten po przetestowaniu może stanowić cenny wkład do kinematycznego opracowania sieci UELN. Nowe wyznaczenie prędkości ruchów pionowych powierzchni skorupy ziemskiej na obszarze Polski jest dokładniejsze od poprzedniego. Na podstawie modelu numerycznego istnieje możliwość interpolacji ruchów pionowych w dowolnym miejscu Polski.

Wykazano, że jeśli dysponujemy permanentnymi obserwacjami GPS z odpowiednio długiego okresu czasu (co najmniej 4 lata), to takie obserwacje mogą istotnie uzupełnić dane niwelacyjne.

Istnieje potrzeba i konieczność badania ruchów pionowych skorupy ziemskiej korzystając z danych GPS. Aby wyznaczać prędkości ruchów pionowych z danych GPS potrzeba więcej stacji permanentnych o dłuższym okresie obserwacji. Podczas wyznaczania prędkości ruchów pionowych z danych GPS należy uwzględnić instytucję opracowującą te dane.

## Literatura

- [1] Borkowski A., Bosy J., Kontny B.: *Time series analysis of EPN stations as a criterion of choice of reference stations for local geodynamic networks*. Artificial Satellites, Vol. 38, No. 1, 2003.
- [2] Ekman M.: *A Reinvestigation of the World's Second Longest Series of Sea Level Observations: Stockholm 1774-1984*, Tekniska skrifter, Professional Papers, (4): 9 p., Nati. Land Survey, Gävle 1986.
- [3] Ihde J., Augath W.: *The Vertical Reference System for Europe*, Veröffentlichungen der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Astronomisch-Geodätisch Arbeiten, Heft Nr 61: 2000, 99–110.
- [4] Kakkuri J.: *Character of the Fennoscandian land uplift in the 20th century*. Geological Survey of Finland, Special Paper 2, 2000, 15-20.
- [5] Kontny B., Bosy J., Borkowski A.: *Correlation between EPN station velocities and the tectonics of Europe*. Artificial Satellites Planetary Geodesy, 39(2), 2004.
- [6] Kowalczyk K.: *Wyznaczenie modelu ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski*, Rozprawa doktorska UW-M w Olsztynie 2006a.
- [7] Kowalczyk K.: *Modeling the vertical movements of the earth's crust with the help of the collocation method*, Geodetic Meeting Poland Italy, Wrocław, 22-24 June, 2006 b.
- [8] [http://www.geo.ar.wroc.pl/8bgmpi/papers\\_poster.html](http://www.geo.ar.wroc.pl/8bgmpi/papers_poster.html).
- [9] Kowalczyk K.: *Nowa mapa współczesnych pionowych ruchów skorupy ziemskiej na obszarze Polski*, Geodeta Nr 8, 2006 c, 45–48.
- [10] Lehmann M., Jaworski L.: *Analiza wyznaczenia składowej pionowej wybranych stacji IGS w rozwiązaniach globalnych IGS*, Sem. pt. Satelitarne metody wyznaczenia pozycji we współczesnej geodezji i nawigacji, Poznań, 23-24 czerwca 2005 .
- [11] Lisitzin E.: *Sea Level Changes*, Elsevier, Amsterdam–Oxford–New York, 1974, 286.
- [12] Łyszkowicz A.: *Raport z realizacji zadania badawczego. Analiza jakościowa i ilościowa istniejących danych mareograficznych*, Olsztyn 2003.
- [13] Niewiarowski J, Wyrzykowski T.: *Wyznaczenie współczesnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski przez porównanie wyników powtarzanych niwelacji precyzyjnych*, Prace Instytutu Geodezji i Kartografii, Tom VII, Zeszyt 1 (17) 1961.
- [14] *Permanent Service of Mean Sea Level (PSMSL)* <http://www.pol.ac.uk/psmsl>.
- [15] Sjöberg L.: *Studies on the Land Uplift and its Implications on the Geoid in Fennoscandia*. Univ. of Uppsala, Inst. of Geoph. Dep. of Geod., Rep. 14, 1982, 26.

- 
- [16] Vaničk P., Krakiwsk Y.E., *Geodesy: the concepts*, North-Holland.
- [17] Wyrzykowski T.: *Nowe wyznaczenie prędkości współczesnych pionowych ruchów powierzchni skorupy ziemskiej na obszarze Polski*, Prace Instytutu Geodezji i Kartografii Tom XXXIV, Zeszyt 1 (78), 1987.