

**WYNIKI BADAŃ NAD LOKALNYMI ZMIANAMI
POLA MAGNETYCZNEGO ZIEMI
NA LUBELSKIM SKŁONIE
WSCHODNIOEUROPEJSKIEGO KRATONU
(PROFIL PARCZEW – CHEŁM)**

**Study on the relative local temporal changes of the geomagnetic field
on the Lublin slope of the East European Craton
(the Parczew – Chełm profile)**

**Grzegorz BOJDYS, Teresa GRABOWSKA, Aleksander WÓJCIK
& Zdzisława MEDOŃ**

*Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska;
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;
e-mail: bojdzys@geol.agh.edu.pl, tgrabow@geol.agh.edu.pl, awojcik@geol.agh.edu.pl,
medon@geol.agh.edu.pl*

Treść: Na tle budowy geologicznej lubelsko-podlaskiego skłonu kratonu wschodnioeuropejskiego (LPSK) przedstawiono rezultaty badań nad lokalnymi względnymi zmianami w czasie całkowitego pola magnetycznego Ziemi. Obiektem badań były wyniki pomiarów ziemskiego pola magnetycznego, wykonywanych w ciągu ostatnich 12 lat (1997–2008) w 20 punktach pomiarowych, zlokalizowanych wzdłuż profilu Parczew – Chełm. Na podstawie wartości ziemskiego pola magnetycznego wyznaczono względne zmiany czasowe tego pola. Zmiany te przedstawiono w formie wykresu oraz 2D i 3D odwzorowań, uwidoczniających ich związek z obrazem obserwowanych anomalii magnetycznych. Metodą 2D modelowania magnetycznego dokonano próby wyjaśnienia przyczyny lokalnych, względnych zmian pola magnetycznego, wiążąc to zjawisko ze zmianami wektora namagnesowania skał podłoża krystalicznego zachodzącymi pod wpływem zmieniającego się w czasie pola magnetycznego Ziemi.

Słowa kluczowe: lokalne względne zmiany pola magnetycznego, lubelski skłon wschodnioeuropejskiego kratonu, magnetometr protonowy, pole IGRF, 2D modelowanie magnetyczne

Abstract: The local relative changes of the total intensity geomagnetic field in time are presented against the background of the geological structure of Lublin-Podlasie slope (LPSK) of the East European Craton. The research concerned measurement results of the total intensity (T) of the geomagnetic field, taken in the last 12 years (1997–2008) at 20 sites located along the Parczew – Chełm profile. Relative temporal changes of the geomagnetic field were determined on the basis of values of geomagnetic field calculated with reference to geomagnetic field measured at the base. These changes are presented as graphs, and in the form of space-time 2D and 3D representations, showing their relationship with the magnetic anomaly map. The cause of local relative changes was attempted to be explained by 2D magnetic modeling assuming that the changes of the induced magnetization of the basement crystalline rocks are result of the geomagnetic secular variations.

Key words: geomagnetic field, temporal changes, proton magnetometer, magnetic modeling, EEC

WSTĘP

Badania czasowych zmian ziemskiego pola magnetycznego na lubelsko-podlaskim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego (LPSK) zapoczątkowane zostały przez Kobańskiego (1988a, b). Pierwszy cykl pomiarów wzdłuż profilu przecinającego uskoki Hanny i umiejscowionego na skłonie lubelskim (SE część LPSK) wykonano w 1986 r. Pomiary te kontynuowane są do chwili obecnej w ramach działalności statutowej Katedry Geofizyki WGGiOŚ AGH. Według Kobańskiego (1996) istnieje związek między lokalnymi względnymi zmianami pola magnetycznego Ziemi i zmianami namagnesowania indukcyjnego skał podłoża krystalicznego.

Treścią prezentowanej pracy jest, po pierwsze, prezentacja i omówienie lokalnych względnych zmian w czasie całkowitego pola magnetycznego Ziemi w 12-letnim przedziale czasowym (1997–2008) na profilu Parczew – Chełm, a po drugie – przedstawienie wyników badań nad rozpoznananiem przyczyn tych zmian.

Do wykonania pierwszego z tych zadań zastosowano opracowaną wcześniej metodykę wyznaczania lokalnych zmian czasowych (Małozzewski & Jankowski 1997, Bojdys *et al.* 2003, Bojdys & Grabowska 2007).

Drugie zadanie realizowano poprzez konstrukcję ekwiwalentnych modeli ciał zaburzających, metodą 2D modelowania magnetycznego. W odniesieniu do tych ciał, potraktowanych jako źródła obserwowanych na profilu anomalii, zmieniano wektor namagnesowania indukcyjnego i obliczano efekty magnetyczne. Zmiany namagnesowania w 12-letnim przedziale czasowym wiązano ze zmieniającym się w czasie ziemskim polem magnetycznym, aproksymowanym Międzynarodowym Magnetycznym Polem Odniesienia (IGRF).

Obliczone efekty magnetyczne były podstawą do wyznaczenia względnych zmian czasowych tych efektów i porównania ich z obserwowanymi wzdłuż profilu lokalnymi względnymi zmianami ziemskiego pola magnetycznego.

Wszystkie prace związane z obliczeniami efektów magnetycznych oraz 2D modelowaniem magnetycznym prowadzono, wykorzystując zestaw oryginalnych programów komputerowych autorstwa G. Bojdysa (2006–2008).

ELEMENTY BUDOWY GEOLOGICZNEJ LUBELSKO-PODLASKIEGO SKŁONU KRATONU WSCHODNIOEUROPEJSKIEGO

Obszar, w którym znajduje się profil, to południowo-wschodnia część lubelsko-podlaskiego skłonu kratonu wschodnioeuropejskiego (LPSK), gdzie na przełomie górnego neoproterozoiku i dolnego paleozoiku powstał rozległy basen sedymentacyjny (Poprawa & Paczeńska 2002). Dzięki licznym badaniom geologicznym ustalono, że basen lubelsko-podlaski rozwinął się na skrzyżowaniu ponadregionalnych struktur tektonicznych, a mianowicie aulakogenu orszańsko-wołyńskiego (AOW) i wschodniego obrzeżenia TESZ. (Poprawa & Paczeńska 2002). Wzdłuż obu stref rozwiniętych na starszych założeniach tektonicznych miały miejsce procesy ryftowania oraz reaktywacji tektonicznej i intensywnego wulkanizmu.

Wynikiem tych zdarzeń jest formacja sławatycka, której górna część reprezentowana jest przez osady wulkanogeniczne i bazalty przewarstwione tufami oraz aglomeratami.

Basen lubelsko-podlaski składa się z dwóch podstawowych jednostek tektonicznych: obniżenia podlaskiego na północy i lubelskiego skłonu kratonu w swej części południowo-wschodniej. Północną granicę lubelskiego skłonu kratonu, na którym zlokalizowany jest profil magnetyczny, stanowi zrąb łukowsko-wisznicki, natomiast granicę południowo-wschodnią wyznacza tarcza ukraińska.

Podłoże krystaliczne lubelsko-podlaskiego basenu, zbudowane ze skał metamorficznych i magmowych, jest silnie zuskokowane (Poprawa & Paczeńska 2002). Litologia podłoża krystalicznego i jego tektonika mają decydujący wpływ na obraz anomalii magnetycznych w tym rejonie (Grabowska *et al.* 2003–2005).

Profil, wzdłuż którego wykonuje się cykliczne pomiary pola magnetycznego (Fig. 1) przecina prostopadłe do rozciągłości wyniesienie wisznicko-sławatyckie, będące SE częścią zrzebu Łukowa, a także ograniczający je od południowego wschodu uskoki Hanny.

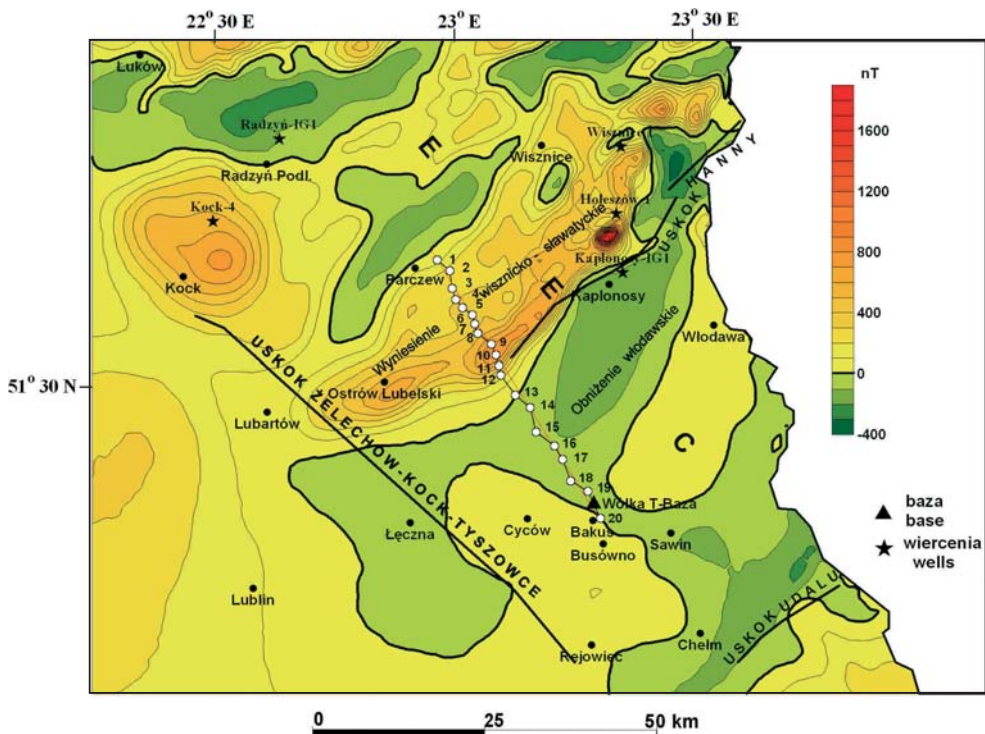


Fig. 1. Lokalizacja profilu Parczew – Chełm na tle fragmentu mapy anomalii magnetycznych ΔT całkowitego pola magnetycznego SE Polski. Pole IGRF 1982 (Grabowska *et al.* 2003–2005). Izolinie co 100 nT. Przebieg uskoków wg Żelichowskiego (1969)

Fig. 1. Location of measurements sites along the Parczew – Chełm profile against the background of the magnetic anomaly map ΔT of the SE Poland (IGRF 1982). Contour interval 100 nT. Faults after Żelichowski (1969)

Na mapie anomalii magnetycznych (Fig. 1) oba wymienione elementy tektoniczne zaznaczają się bardzo wyraźnie. W kierunku południowo-wschodnim profil wchodzi w obszar obniżenia włodawskiego, gdzie podłoże krystaliczne znajduje się na głębokości rzędu 3500 m, a obraz anomalii jest mniej skomplikowany.

Na tle rozwoju tektonicznego w paleozoiku profil magnetyczny Parczew – Chełm sytuuje się wzdłuż obniżenia parczewskiego, wypełnionego osadami karbonu o miąższościach kilkuset metrów (Żelichowski & Kozłowski 1983).

Od południowego zachodu obniżenie parczewskie obcięte jest uskokiem Żelechów – Kock – Tyszowce. Północno-wschodnie skrzydło obniżenia opiera się o podniesioną część prekambryjskiego kratonu.

Budowa tektoniczna obniżenia parczewskiego została ukształtowana w fazie bretońskiej, której towarzyszyła działalność wulkaniczna. Wynikiem przedwizeńskiego wulkanizmu są osiągnięte wierceniami (Parczew 1 i Kock 4) diabazy, a także pokrywy tufitów ujawnione w wierceniach Radzyń IG-1, Kaplonosy IG-1, (Żelichowski 1972, Żelichowski & Kozłowski 1983).

Zarówno przedwizeńskie pokrywy diabazowe, jak i wcześniej wspomniane bazalty serii sławatyckiej nie mają istotnego wpływu na obraz regionalnych anomalii magnetycznych, który w tym rejonie jest związany z budową geologiczną podłoża krystalicznego (Grabowska *et al.* 2003–2005).

METODYKA POMIARÓW CAŁKOWITEGO POLA MAGNETYCZNEGO WZDŁUŻ PROFILU PARCZEW – CHEŁM

W okresie od 1997 do 2008 roku wzdłuż profilu Parczew – Chełm wykonano 12 cykli pomiarowych modułu wektora indukcji T całkowitego pola magnetycznego w 20 punktach pomiarowych (Fig. 1). Lokalizację punktów pomiarowych ustalono przy użyciu ręcznego odbiornika GPS map 76 firmy Garmin.

Pomiary pola magnetycznego prowadzono magnetometrem protonowym typu PMP-7 polskiej produkcji (w latach 1997–2001) i magnetometrem ENVI System firmy kanadyjskiej Scintrex (w latach 2002–2008). Oba rodzaje magnetometrów charakteryzują się tą samą czułością, wynoszącą 0.1 nT.

Na każdym z punktów pomiarowych wykonywano 15-minutową serię pomiarów z 10-sekundowym czasem repetycji.

Pomiary te były zsynchronizowane z rejestracją całkowitego pola magnetycznego w punkcie bazowym, znajdującym się w południowej części profilu, w miejscu pozbawionym silnych anomalii magnetycznych (Fig. 1). Mierzone w punkcie bazowym pole magnetyczne spełniało rolę pola odniesienia (pola normalnego) przy obliczaniu względnych wartości ziemskiego pola magnetycznego, a następnie wyznaczaniu lokalnych, względnych czasowych zmian tego pola.

Przyjęta metodyka pozwalała określać z zadowalającą dokładnością względne wartości pola magnetycznego oraz eliminować jego zmiany chwilowe.

Podstawą analizy zmian w czasie pola magnetycznego były średnie względne wartości pola magnetycznego $\Delta T_{n,t}$, wyrażane wzorem (1) poprzez średnie wartości T , wyznaczone na podstawie trwającej 15 minut (z 10-sekundowym czasem repetycji) serii pomiarów prowadzonych równocześnie na każdym z punktów profilu (n) i na bazie

$$\Delta T_{n,t} = \bar{T}_{pom.,n,t} - \bar{T}_{baza,t} \quad (1)$$

gdzie:

- n – kolejny punkt pomiarowy,
- t – czas pomiaru.

Wyniki obliczeń wartości w poszczególnych punktach profilu (1–20) w każdym z 12 cykli pomiarowych przedstawiono w tabeli 1 (na wklejce).

OPRACOWANIE WYNIKÓW POMIARÓW

Przy opracowywaniu pomiarów i obliczaniu względnych zmian czasowych ziemskiego pola magnetycznego wykorzystano metodykę przedstawioną w pracy Małoszewskiego & Jankowskiego (1997), zmodyfikowaną następnie przez Bojdysa (Bojdys & Grabowska 2007).

Poziomem odniesienia dla obliczeń względnych zmian czasowych były, jak już wspomniano wcześniej, wartości pola magnetycznego mierzone w punkcie bazowym.

Zmieniające się w przedziale 12 lat względne średnie wartości pola magnetycznego $\Delta T_{n,t}$ na każdym z punktów pomiarowych (Fig. 2) były aproksymowane wielomianami pierwszego stopnia w postaci

$$W_n(t) = b_n t + a_n \quad (2)$$

a także wielomianami drugiego stopnia, lepiej wyrażającymi charakter zmian w czasie względnych wartości pola magnetycznego

$$W_{n2}(t) = c_{n2} t^2 + b_{n2} t + a_{n2} \quad (3)$$

Zestawienie wykresów $\Delta T_{n,t}$ na każdym z 20 punktów profilu (Fig. 2) pozwala zauważyć wyraźny wzrost względnych wartości pola magnetycznego wraz z upływem czasu w obszarze wyniesienia wisznicko-sławatyckiego (punkty 1–10), w przeciwieństwie do obniżenia włodawskiego (punkty 12–20), gdzie wartości te wykazują tendencję do zmniejszania się w czasie.

Zmiana w zachowaniu się względnych wartości pola magnetycznego następuje w strefie uskoku Hanny, wzdłuż którego podłoże krystaliczne zrzucane jest o około 1500 m (Żelichowski 1972).

Dynamikę zmian w czasie średnich względnych wartości pola magnetycznego $\Delta T_{n,t}$, aproksymowanych liniami prostymi, wyrażają współczynniki b_n , określające nachylenie tych prostych. Współczynniki b_n zwane dalej trendami odpowiadają względnym zmianom w czasie $\delta(\Delta T_n)$ pola magnetycznego Ziemi i są wyrażane w nT/rok (Fig. 3).

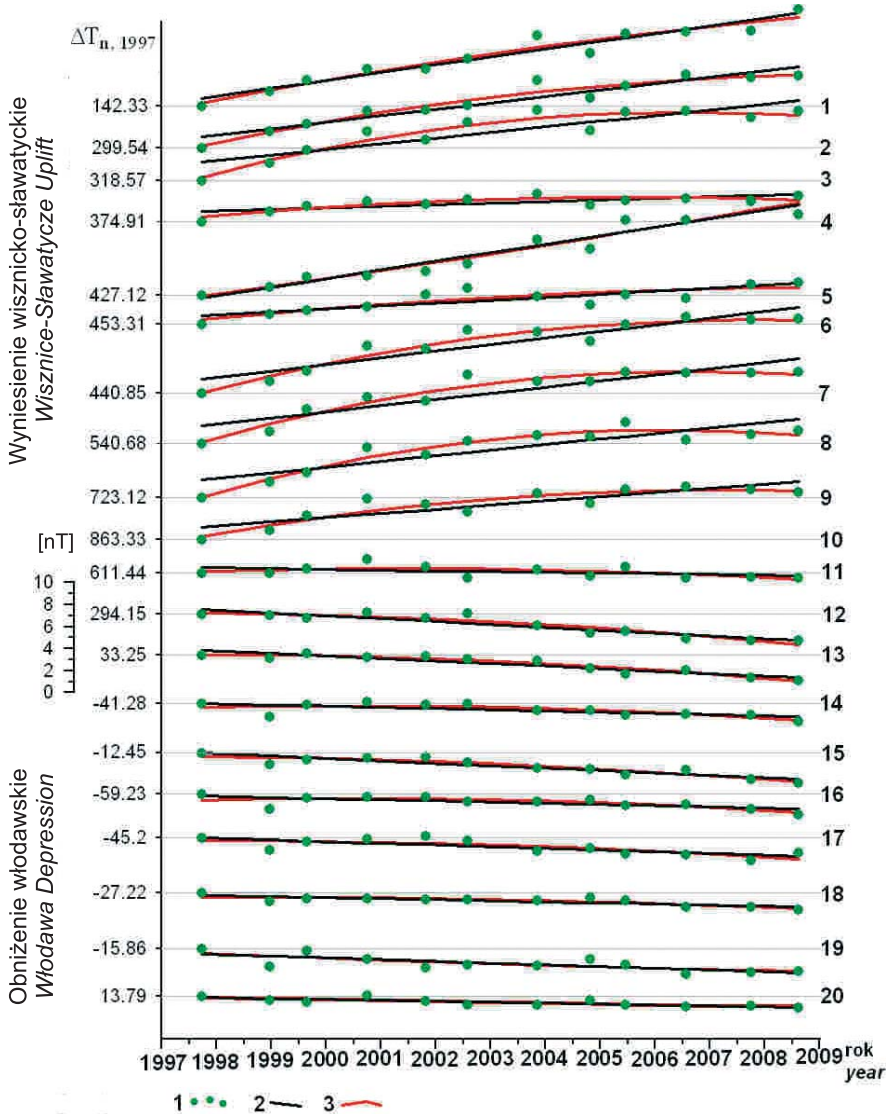


Fig. 2. Wykresy zmian w czasie względnych wartości pola magnetycznego Ziemi w punktach pomiarowych profilu Parczew – Chełm: 1 – wartości średnich względnych zmian ΔT_n , (por. wzór (1) i Tab. 1), 2 – liniowa aproksymacja średnich względnych zmian (por. wzór (2)), 3 – aproksymacja średnich względnych zmian wielomianem 2. stopnia (por. wzór (3)), $\Delta T_{n,1997}$ – średnie względnej wartości ziemskiego pola magnetycznego na każdym z punktów pomiarowych w 1997 roku (por. Tab. 1)

Fig. 2. Plots of the temporal relative changes of the geomagnetic field in every sites of the Parczew – Chełm profile: 1 – values of the mean relative changes ΔT_n (see eq. (1) and Tab. 1), 2 – linear approximation of the mean relative changes ΔT_n (see eq. (2)), 3 – 2 degree polynomial approximation of the mean relative changes ΔT_n (see eq. (3)), $\Delta T_{n,1997}$ – mean of the relative values of geomagnetic field in the 1997 year in every sites of the Parczew – Chełm profile (see Tab. 1)

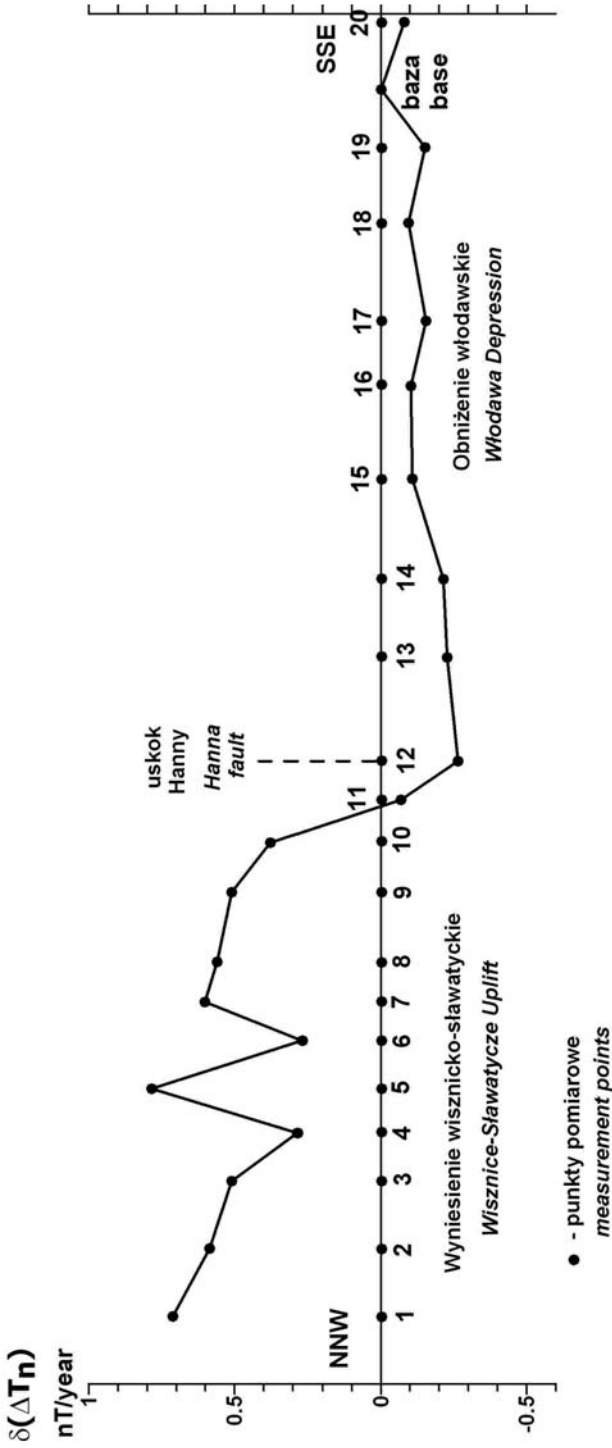


Fig. 3. Względne zmiany czasowe pola magnetycznego Ziemi $\delta(\Delta T_n) = b_n$ (1997–2008) wzdłuż profilu Parczew – Chelms

Fig. 3. Relative temporal variations of the geomagnetic field $\delta(\Delta T_n) = b_n$ along the Parczew – Chelms profile

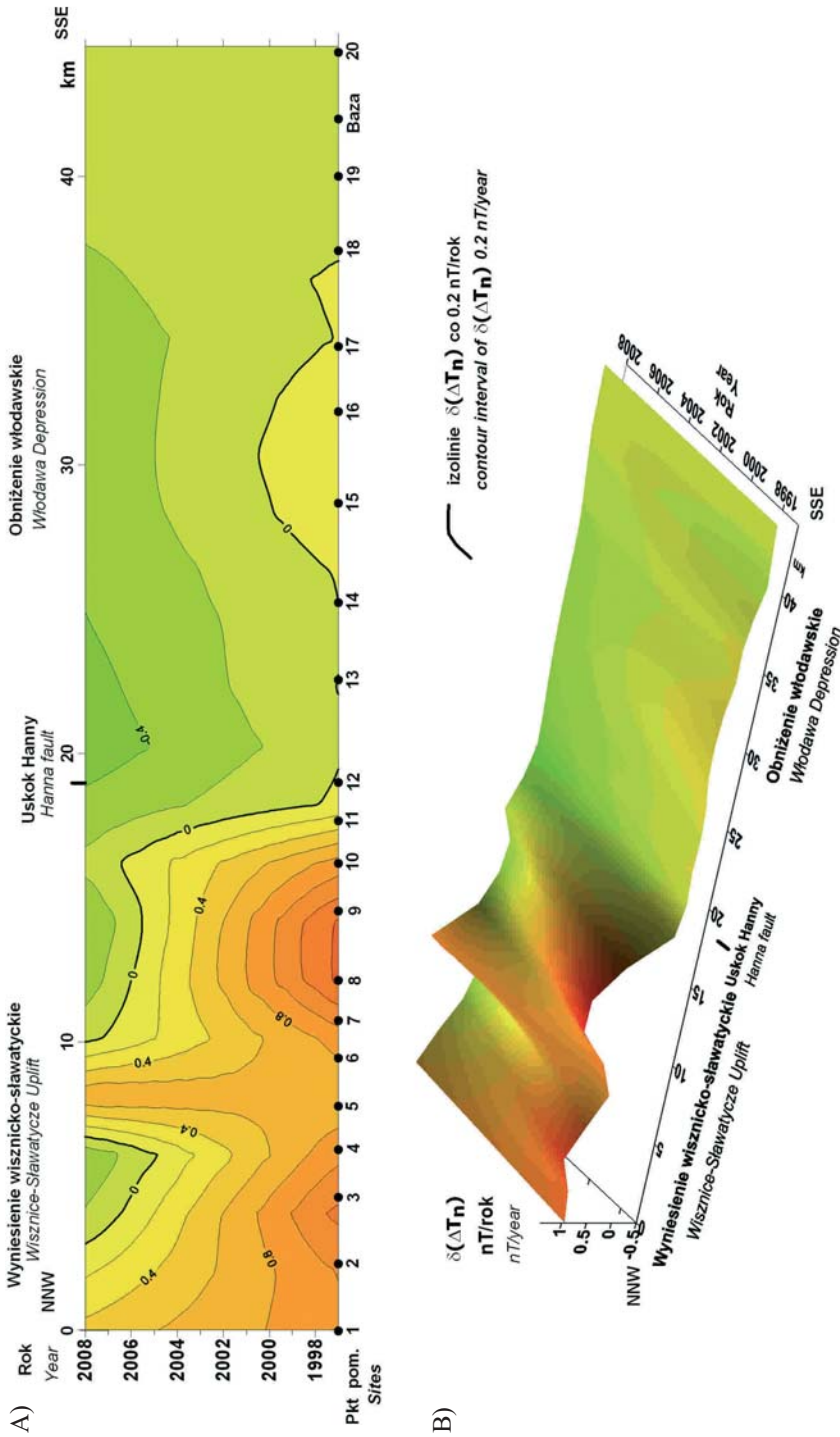


Fig. 4. Czasowo-przestrzenne odwzorowanie względnych zmian pola magnetycznego Ziemi wzdłuż profilu Parzew – Chełm: A) dwuwymiarowy model zmian; B) trójwymiarowy model zmian

Fig. 4. Space-time pattern of the relative variations of the geomagnetic field along the Parzew – Chełm profile: A) 2D variations model; B) 3D variations model

Jak wynika z wykresu, najwyższe wartości względnych zmian czasowych $\delta(\Delta T_n)$, przewyższające $+0.5$ nT/rok, występują w północnej części profilu w obrębie wyniesienia wisznicko-sławatyckiego. Najniższe ujemne wartości względnych zmian czasowych pola magnetycznego, sięgające ok. -0.2 nT/rok, przypadają na obszar obniżenia włodawskiego.

Aproksymacja $\Delta T_{n,t}$ wielomianami drugiego stopnia (Fig. 3) umożliwiła zastosowanie nowej metodyki analizy względnych zmian czasowych pola magnetycznego (Bojdyś & Grabowska 2007), polegającej na przedstawieniu lokalnych względnych zmian ziemskiego pola magnetycznego w formie czasoprzestrzennych 2D i 3D odwzorowań (Fig. 4), ułatwiających przeprowadzenie ich analizy.

Prezentowane na figurze 4 czasoprzestrzenne odwzorowania dobrze odzwierciedlają złożoną dynamikę tych zmian w obszarze wyniesienia wisznicko-sławatyckiego, jak również różnice w szybkości wzrostu pola magnetycznego między wyniesieniem a obniżeniem (zapadliskiem) włodawskim.

WZGLĘDNE ZMIANY CZASOWE W ŚWIETLE INTERPRETACJI ILOŚCIOWEJ

Charakter względnych zmian czasowych ziemskiego pola magnetycznego wzdłuż profilu może wskazywać, jak już to wcześniej zauważył Koblański (1986), na istnienie związku między tymi zmianami, a namagnesowaniem indukcyjnym skał podłoża krystalicznego.

W drugim etapie badań nad lokalnymi zmianami pola magnetycznego podjęto próbę objaśnienia przyczyn tego zjawiska. W tym celu dokonano:

- 1) interpretacji ilościowej anomalii $\Delta T_{n,1997}$ (Fig. 5) przedstawiającej różnicę między wartościami całkowitego pola magnetycznego T pomierzonego w 1997 roku w 20 punktach profilu a wykonywanymi synchronicznie pomiarami na bazie; w wyniku 2D modelowania otrzymano dwa modele ekwiwalentne, tzn. generujące taki sam efekt magnetyczny;
- 2) obliczeń efektów magnetycznych, odpowiadających tym modelom w kolejnych 11 latach, przyjmując zgodnie z polem normalnym IGRF wartości inklinacji i deklinacji oraz wektora namagnesowania indukcyjnego (Tab. 2), zachowując natomiast tę samą geometrię obu ekwiwalentnych modeli oraz ich podatność magnetyczną.

Ad 1)

Modelowania prowadzono, zakładając indukcyjne namagnesowanie, którego kierunek był zgodny z kierunkiem pola normalnego IGRF 1997 (<http://ngdc.noaa.gov/geomag/mag-field.shtml>), określanego poprzez wartości normalnej deklinacji i inklinacji magnetycznej (Tab. 2).

Wymodelowana powierzchnia stropowa modelu (b) (Fig. 5B) w dużym przybliżeniu pokrywa się ze stropem podłoża krystalicznego, rozpoznanego badaniami sejsmicznymi i geologicznymi (Żelichowski & Kozłowski 1983), co potwierdza zasadność przyjęcia indukcyjnego namagnesowania.

Drugi ekwiwalentny model (c) (Fig. 5C) został skonstruowany w celu sprawdzenia wpływu ekwiwalentnych modeli na obliczane względne zmiany pola magnetycznego (Fig. 6 na wkładce – krzywe 2 i 3).

Warto podkreślić, że uzyskane w wyniku modelowania wartości namagnesowania w przypadku obu ekwiwalentnych modeli nie pozostają w sprzeczności z wynikami badań laboratoryjnych podatności magnetycznej skał podłoża krystalicznego w tym rejonie (Grzywacz & Niedziółka 1969).

Skały te, głównie o charakterze zasadowym, posiadają znaczne podatności magnetyczne, zawierające się w granicach od 0.063 SI (wiercenie Łuków) do 0.251 SI (wiercenie Holeszów), które odpowiadają przedziałowi namagnesowania indukcyjnego od 2.5 A/m do 10 A/m.

Ad 2)

Różnice między obliczonymi w kolejnych 11 latach efektami magnetycznymi stanowiły materiał wyjściowy do obliczania względnych zmian w czasie, tych efektów wzdłuż profilu. Na figurze 6 zestawiono je z obserwowanymi na profilu (Fig. 3) względnymi lokalnymi zmianami ziemskiego pola magnetycznego.

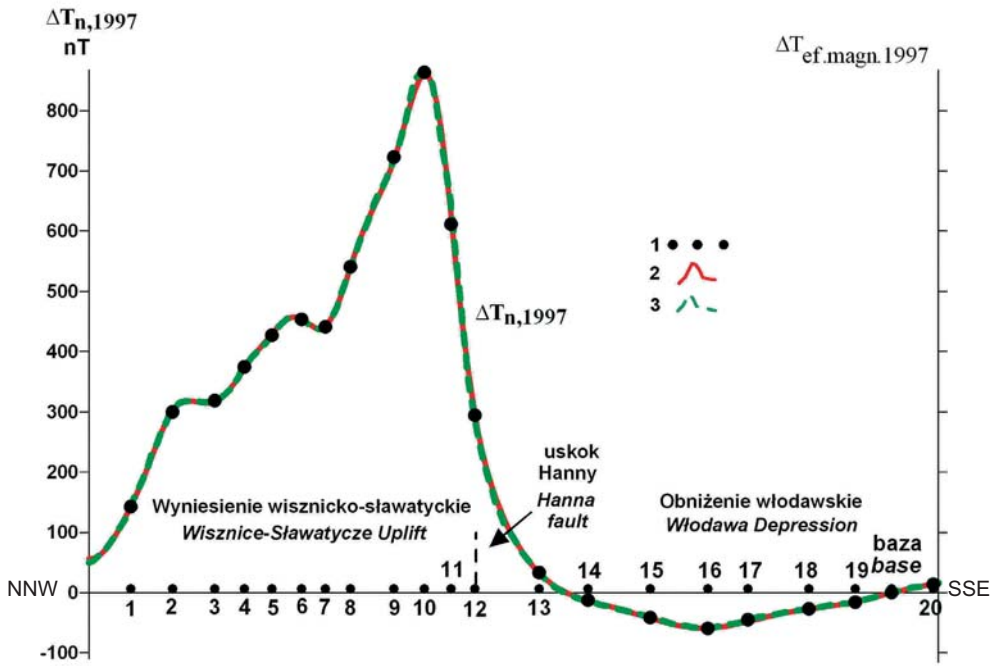
Podobieństwo krzywych (2 i 3), ilustrujących przebieg względnych zmian w czasie efektów magnetycznych z obserwowanymi wzdłuż profilu względnymi zmianami ziemskiego pola magnetycznego, można traktować jako potwierdzenie hipotezy o związku względnych zmian czasowych ziemskiego pola magnetycznego w badanym obszarze głównie ze zmianami namagnesowania indukcyjnego skał.

Optymalny wynik dopasowania obu wyżej wymienionych krzywych (Fig. 6 – krzywe 1 i 4, 5) dla dwóch ekwiwalentnych modeli uzyskano, zmniejszając blisko 1-stopniowy wzrost normalnych wartości deklinacji magnetycznej do 0.5 stopnia (Tab. 2), wyrażony przez zmiany azymutu magnetycznego profilu.

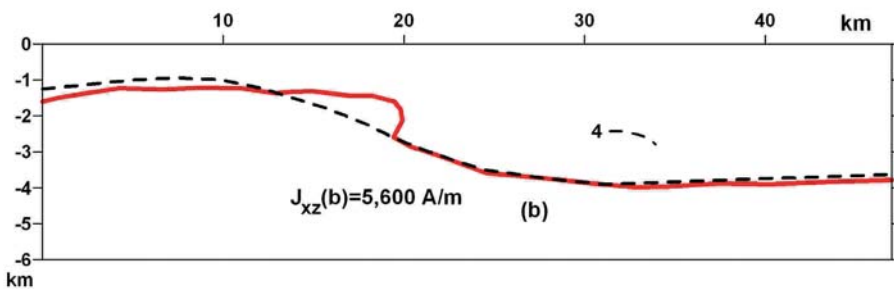
Fig. 5. Wyniki interpretacji ilościowej anomalii $\Delta T_{n,1997}$, wykonanej metodą 2D modelowania magnetycznego wzdłuż profilu Parczew – Chełm: A) anomalia magnetyczna $\Delta T_{n,1997}$ wraz efektami magnetycznymi, odpowiadającymi modelom ekwiwalentnym (b) i (c); B) model ekwiwalentny (b), namagnesowanie indukcyjne $J_{xz}(b) = 5,600$ A/m (por. Tab. 2), strop modelu zgodny w przybliżeniu z powierzchnią podłoża krystalicznego (4); C) model ekwiwalentny (c), składający się z dwóch ośrodków namagnesowanych indukcyjnie $J_{xz}(c1) = J_{xz}(b) = 5,600$ A/m i $J_{xz}(c2) = 4,000$ A/m (por. Tab. 2), strop modelu zgodny w przybliżeniu z powierzchnią podłoża krystalicznego (4). Uwaga: J_{xz} – namagnesowanie w płaszczyźnie profilu (tj. w płaszczyźnie przekroju pionowego xz). Objasnienia do krzywych: 1 – anomalia magnetyczna $\Delta T_{n,1997} = \bar{T}_{n,1997} - \bar{T}_{baza,1997}$, 2 – obliczony efekt magnetyczny $\Delta T_{ef,magn,1997}(b)$, odpowiadający modelowi (b), 3 – obliczony efekt magnetyczny $\Delta T_{ef,magn,1997}(c)$, odpowiadający modelowi (c), 4 – strop podłoża krystalicznego wg danych sejsmicznych i geologicznych (Żelichowski & Kozłowski 1983)

Fig. 5. Results of the quantitative interpretation of the anomaly $\Delta T_{n,1997}$ by the 2D magnetic modeling method along the Parczew – Chełm profile: A) the magnetic anomaly $\Delta T_{n,1997}$ with magnetic effects corresponding to equivalent models (b) and (c); B) the equivalent model (b), induced magnetization $J_{xz}(b) = 5.6$ A/m (Tab. 2), the top of the model approximately in line with the crystalline basement; C) the equivalent model (c), comprising two induced magnetized mediums $J_{xz}(c1) = J_{xz}(b) = 5.6$ A/m and $J_{xz}(c2) = 4.0$ A/m (Tab. 2), the top of the model approximately in line with the crystalline basement. Caution: J_{xz} – magnetization in the profile plane (i.e. in the xz vertical cross-section plane). Explanations to the curves: 1 – magnetic anomaly $\Delta T_{n,1997} = \bar{T}_{n,1997} - \bar{T}_{base,1997}$, 2 – $\Delta T_{ef,magn,1997}(b)$, corresponding to the model (b), 3 – $\Delta T_{ef,magn,1997}(c)$, corresponding to the model (c), 4 – crystalline basement according to the seismic and geological data (Żelichowski & Kozłowski 1983)

A)



B)



C)

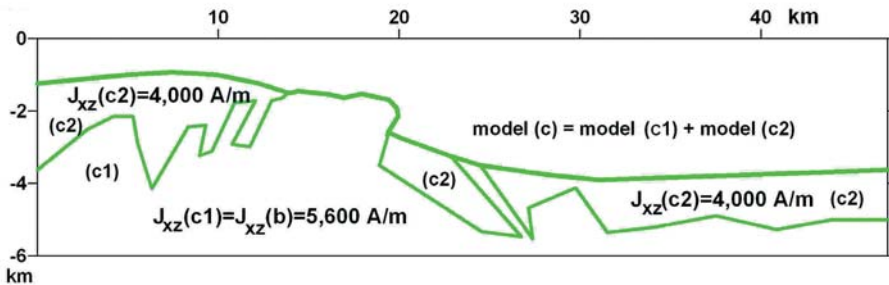


Tabela (Table) 2

Zestawienie wartości normalnego pola IGRF (1997–2008), azymutu magnetycznego profilu Parczew – Chelm i namagnesowania indukcyjnego dla modeli ekwiwalentnych (b) i (c) (por. Fig. 5, 6)

Values of IGRF (1997–2008), azimuth magnetic Parczew – Chelm profile and induced magnetization for equivalent models (b) and (c) (see Figs 5, 6)

Rok	IGRF			$A_{magn.prof.}$ (IGRF) [°:']	$J(b)$ [A/m]	$J_{xz}(b)$ [A/m]	$J(c2)$ [A/m]	$J_{xz}(c2)$ [A/m]
	T [nT]	D [°:']	I [°:']					
1997.97	49349.4	4:4.43	67:15.50	143:55.27	5.749	5.600	4.108	4.000
1998.64	49392.9	4:9.84	67:16.00	143:49.86	5.754	5.604	4.112	4.003
1999.75	49417.6	4:12.91	67:16.26	143:46.79	5.757	5.606	4.114	4.005
2000.82	49456.3	4:18.27	67:16.89	143:41.43	5.761	5.610	4.117	4.008
2001.58	49495.6	4:23.97	67:17.60	143:35.73	5.766	5.613	4.120	4.011
2002.85	49523.7	4:28.04	67:18.11	143:31.66	5.769	5.615	4.123	4.013
2003.81	49569.8	4:34.71	67:18.94	143:24.99	5.775	5.619	4.126	4.016
2004.46	49605.5	4:39.87	67:19.57	143:19.83	5.779	5.622	4.129	4.018
2005.55	49631.1	4:43.96	67:20.05	143:15.74	5.782	5.624	4.131	4.020
2006.74	49675.9	4:51.35	67:20.87	143:08.35	5.787	5.628	4.135	4.023
2007.61	49725	4:59.47	67:21.77	143:00.23	5.793	5.632	4.139	4.027
2008.6	49761.4	5:5.44	67:22.43	142:54.26	5.797	5.635	4.142	4.029

Objaśnienia: T – całkowite pole magnetyczne, D – deklinacja magnetyczna, I – inklinacja magnetyczna, $A_{magn.prof.}$ (IGRF) – azymut magnetyczny profilu, $A_{magn.} = A_{geom.} - D$, $J(b)$ – namagnesowanie indukcyjne dla modelu (b), $J_{xz}(b)$ – namagnesowanie indukcyjne w płaszczyźnie profilu dla modelu (b) (Fig. 5B, 6C), $J(c2)$ – namagnesowanie indukcyjne dla modelu (c), $J_{xz}(c2)$ – namagnesowanie indukcyjne w płaszczyźnie profilu dla modelu (c) (Fig. 5C, 6B), $J_{xz} = J \cdot \sqrt{1 - \cos^2 I} = J \cdot \sin^2 A_{magn.}$

DYSKUSJA

Hipotezę o związku lokalnych względnych zmian czasowych ziemskiego pola magnetycznego ze zmianami namagnesowania indukcyjnego skał podłoża krystalicznego wobec braku pomiarów deklinacji i inklinacji w obszarze badań weryfikowano na podstawie pola IGRF (1997–2008) (<http://ngdc.noaa.gov/geomag/magfield.shtml>), którego wartości odnośnie do całkowitego pola T , deklinacji D i inklinacji I określane były dla bazy zlokalizowanej w rejonie Wólki Tarnowskiej (Fig. 1).

Wynik interpretacji ilościowej anomalii $\Delta T_{n,1997}$ (Fig. 5) oraz podobieństwo względnych zmian efektów magnetycznych do lokalnych względnych zmian ziemskiego pola magnetycznego wzdłuż profilu (Fig. 6A – krzywe 2, 3, 1) potwierdzają wiarygodność przyjętej hipotezy o indukcyjnym namagnesowaniu źródeł anomalii magnetycznych. Metodą prób i błędów, zmieniając deklinację i inklinację w kolejnych modelowaniach, wykazano, że najlepsza zgodność krzywych ilustrujących względne zmiany ziemskiego pola magnetycznego i względne zmiany efektów magnetycznych (Fig. 6A – krzywe 1, 4, 5) osiągnięta została dzięki obniżeniu deklinacji w ciągu 11 lat z +1.0 stopnia do +0.5 stopnia.

Reasumując, należy przypuszczać, że źródłem anomalii magnetycznych obserwowanych na lubelskim skłonie kratonu w obniżeniu parczewskim są indukcyjnie namagnesowane skały podłoża krystalicznego. Natomiast wyjaśnienie potrzeby zmiany deklinacji, przy której uzyskano by zgodność obu typu krzywych (Fig. 6A – krzywe 1 i 4, 5) w drodze rozważań teoretycznych jest dość skomplikowane. Stąd bardzo pożądane byłoby wykonanie pomiarów deklinacji magnetycznej i ewentualne przeprowadzenie dalszej serii modelowań.

PODSUMOWANIE

Analiza przedstawionych wyżej wyników badań pozwala stwierdzić, że względne czasowe zmiany ziemskiego pola magnetycznego o charakterze lokalnym, rejestrowane na lubelskim skłonie kratonu:

- są najprawdopodobniej spowodowane zmianami indukcyjnego namagnesowania skał zasadowych podłoża krystalicznego, zachodzącymi pod wpływem zmieniającego się (rosnącego) ziemskiego pola magnetycznego;
- zachowują w 12-letnim przedziale czasowym podobne trendy (większa dynamika wzrostu pola magnetycznego występuje w obszarze wyniesienia wisznicko-sławatyckiego a słabsza dynamika wzrostu w obniżeniu włodawskim); natomiast zmiana w zachowaniu się pola magnetycznego następuje w uskoku Hanny;
- nie zależą od wybranego modelu ekwiwalentnego, generującego obserwowaną na profilu anomalię magnetyczną.

Przeprowadzone modelowania względnych zmian wiekowych wykazały istotną rolę deklinacji magnetycznej w kształtowaniu ich charakteru. Stąd w celu przeprowadzenia szerszej i bardziej dokładnej analizy względnych czasowych zmian ziemskiego pola magnetycznego wskazane jest, obok pomiarów modułu wektora całkowitego pola magnetycznego, wykonywanie również cyklicznych pomiarów inklinacji i deklinacji magnetycznej.

Artykuł stanowi podsumowanie dotychczasowych badań nad lokalnymi względnyymi zmianami pola magnetycznego Ziemi obserwowanymi wzdłuż profilu Parczew – Chełm, prowadzonymi w ramach działalności statutowej Katedry Geofizyki WGGiOŚ AGH, umowa nr 11.11.140.455 finansowana z funduszków KBN, a następnie Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

LITERATURA

- Bojdys G., 2006–2008. *Zestaw programów autorskich pn.: wielomian, biegiwiek, Model2Dw*. Archiwum Katedry Geofizyki WGGiOŚ AGH, Kraków.
- Bojdys G. & Grabowska T., 2007. Space-time analysis of the relative local secular variations of the geomagnetic field (1966–2005) along the Zgorzelec-Wizajny profile. *Acta Geophysica*, 55, 2, 169–181.
- Grabowska T., Bojdys G., Lemberger M., Cicha M., Medoń Z., Zabawa-Radomińska A. & Radomiński J., 2003–2005. *Interpretacja anomalii magnetycznych (ΔT) południowo-wschodniej Polski – trójwymiarowy magnetyczny model skorupy ziemskiej*. PB nr 5 T12B 044 24, nr umowy AGH 18.18.140.14.
- Grzywacz J. & Niedziółka T. (oprac. zespołowe PPG pod kier. J. Grzywacza), 1969. *Opracowanie badań geofizycznych wykonanych do 1967 r. na obszarze Lubelszczyzny*. Archiwum PPG, Warszawa (maszynopis).
- Koblański A., 1986. Struktura pola magnetycznego na obszarze Lubelskiego Zagłębia Węglowego i jej związek z tektoniką podłoża karbonu. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Górnictwo*, 149, 359–368.
- Koblański A., 1988a. Związek czasowych zmian pola magnetycznego z procesami tektonicznymi (z podsumowaniem w jęz. angielskim). *Zeszyty Naukowe AGH, Geofizyka Stosowana*, 1, 461–472.
- Koblański A., 1988b. Badania tektonomagnetyczne w obszarze lubelskim (z podsumowaniem w jęz. angielskim). *Zeszyty Naukowe AGH, Geofizyka Stosowana*, 1, 473–481.
- Koblański A., 1996. *Badania dynamiki zmian pola magnetycznego w rejonie lubelskim* (z podsumowaniem w jęz. angielskim). Działalność statutowa Zakładu Geofizyki AGH, Kraków (manuskrypt).
- Małuszewski S., & Jankowski J., 1997. On secular variations of the geomagnetic field along a profile across the Teisseyre–Tornquist Zone. *Acta Geophysica Polonica*, XLV, 1, 23–31.
- Poprawa P. & Paczeńska J., 2002. Rozwój ryftu w późnym neoproterozoiku – wczesnym paleozoiku na lubelsko-podlaskim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego – analiza subsydencji i zapisu facjalnego. *Przegląd Geologiczny*, 50, 1, 49–63.
- Żelichowski A.M. & Kozłowski S., 1983. *Atlas geologiczno-surowcowy obszaru lubelskiego, skala 1 : 500 000*. Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Żelichowski A.M., 1972. Rozwój budowy geologicznej obszaru między Górami Świętokrzyskimi i Bugiem. *Biuletyn Instytutu Geologicznego*, 263, *Z badań tektonicznych w Polsce*, III, 1–97.

Summary

The Parczew – Lublin profile, along which cyclical measurements of the total geomagnetic field are taken in order to find temporal changes of this field, is located on the Lublin slope of the East European craton.

The profile crosses the Wisznice-Sławatycze uplift, which is the SE part of the Łuków horst, and the Hanna fault, along which the crystalline basement is dropped by about 1,500m. The southern part of the profile goes into the Włodawa depression area.

All mentioned tectonic units of the crystalline basement are reflected in the magnetic anomaly map ΔT (Fig. 1).

The content of the paper is to present local relative changes of the total intensity (T) of the geomagnetic field in time during a 12 years time interval (1997–2008) along the profile and to attempt to explain its causes.

Magnetic field measurements were taken at 20 sites with proton magnetometers PMP-7, manufactured in Poland, and ENVI System by Scintrex (Canada), with the sensitivity of 0.1 nT.

A series of measurements with 10 seconds repetition time lasting 15 minutes was taken at each of the profile points.

The points were located with a handheld GPS map 76 receiver by Garmin.

Measurements at consecutive profile points were synchronized with magnetic field recording on the base, located in the area free of strong magnetic anomalies near Wólka Tarnowska (Fig. 1). It allowed to eliminate transient changes of the geomagnetic field, to determine its relative values at consecutive profile points and subsequently local relative temporal changes of this field.

The analysis of long-term relative changes of the total geomagnetic intensity T value was based on average relative magnetic field values $\Delta T_{n,t}$, calculated according to equation (1) at each of the profile points

$$\Delta T_{n,t} = \bar{T}_{obs,n,t} - \bar{T}_{base,t} \quad (1)$$

where:

$\bar{T}_{obs,n,t}, T_{base,t}$ – values of measurement series of the total geomagnetic field lasting 15 minutes (with 10 seconds repetition time), taken at consecutive measurement points and synchronically on the base,
 t – measurement time.

$\Delta T_{n,t}$ calculation results at individual profile points (1–20) for each of the 12 measurement cycles in the years 1997–2008 are presented in table 1, and graphically in figure 2.

Using formerly developed calculation methodology for relative temporal changes of the geomagnetic field (Małoszewski & Jankowski 1997, Bojdyś *et al.* 2007), the $\Delta T_{n,t}$ values changing in the interval of 12 years at each of the measurement points (Fig. 2) were approximated with first degree polynomials in the form of

$$W_n(t) = b_n t + a_n \quad (2)$$

as well as with second degree polynomials.

Trends in changes of relative values of the magnetic field $\Delta T_{n,t}$ in time, approximated with straight lines are well illustrated by b_n factors defining the slope of these straight lines.

The b_n factors called the trends correspond to the relative changes of the geomagnetic field in time $\delta(\Delta T_n)$ and are expressed in nT/year. The highest values of relative temporal changes occur in the northern part of the profile within the strongest uplifted fragment of the crystalline basement (Wisznice-Sławatycze uplift). However, the lowest negative values of the relative changes are characteristic for the Włodawa depression (Fig. 3).

The boundary between these two geological units runs along the Hanna fault zone, where the crystalline basement is dropped by about 1500 m (Żelichowski 1972).

Approximation of the relative values $\Delta T_{n,t}$ with second degree polynomials enabled to present local relative magnetic field changes in the form of space-time 2D and 3D representations (Fig. 4) facilitating a detailed analysis of this effect.

The second part of the paper presents an attempt to explain the cause of geomagnetic field changes, in particular their relationship with changes in induced magnetization of the crystalline basement rocks considered by Koblański (1986) before.

To verify this hypothesis a quantitative interpretation of the anomaly

$$\Delta T_{n,1997} = \bar{T}_{obs.,n,1997} - \bar{T}_{base,1997}$$

determined at 20 profile points was performed (Fig. 5A).

Using 2D modelling methods, two equivalent models (Fig. 5B, C) generating the same magnetic effect (Fig. 5A – curves 2, 3) were obtained.

The induced magnetization values obtained in the 2D modelling process as well as the top of models are not contrary to the laboratory (susceptibility), seismic (top of crystalline basement) and geological data (Żelichowski & Kozłowski 1983).

Further assuming induced magnetization of models and changing magnetic inclination and declination values in line with the normal IGRF field (Tab. 2) and assuming the magnetization vector values in consecutive 12 years resulting from the changes in the total field T, magnetic effects corresponding to these changes were calculated. Then relative changes of these magnetic effects $\delta(\Delta T_{ef,magn.})$ in time (Fig. 6A – curves 2, 3) were calculated on the basis of these magnetic effects and compared to relative changes of the geomagnetic field in time (Fig. 6A – curve 1)

A similar nature of both curves makes credible the hypothesis on a relationship of local relative changes of the geomagnetic field along the Parczew – Chełm profile with the increase of the crystalline basement magnetization (Fig. 6B) caused by continually growing normal geomagnetic field.

Both kinds of changes (Fig. 6A – curves 4, 5) are much better approximated by reducing the magnetic declination value by 0.5 degree as compare to the value from the IGRF data (Tab. 2).

The analysis of the research results allows to state that the relative local temporal changes of the geomagnetic field, recorded on the Lublin slope of the craton have the following features:

- are most likely caused by the changes in induced magnetization of basic rocks of the basement, originating under the influence of the changing (increasing) geomagnetic field;
- in a 12 years interval keep similar trends i.e. a higher dynamics of geomagnetic field growth occurs in the Wisznice – Sławatycze uplift as compare to a lower dynamics of increase in the Włodawa depression; however, a change in the magnetic field behaviour coincides with the Hanna fault;
- independence temporal changes on a selected equivalent model, generating the magnetic anomaly observed in the profile.

Performed modelling of relative temporal changes of the geomagnetic field showed a significant role of the magnetic declination in forming of their nature.

Therefore in order to carry out a broader and more accurate analysis of relative temporal changes of the geomagnetic field, it is recommended to perform cyclical magnetic inclination and declination measurements in addition to measurements of the total intensity (T) of geomagnetic field.

Tabela (Table) 1

Lokalizacja punktów pomiarowych i względne wartości pola magnetycznego Ziemi (ΔT_{rn})

Location of measurement sites and the relative geomagnetic field values (ΔT_{rn})

Rok pomiarów <i>Year of measurements</i>		1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	
Nr pkt <i>No. of point</i>	Współrzędne <i>Coordinates</i>		$\Delta T_{rn} = T_{pomiar,t} - T_{baza,t}$ $\Delta T_{rn} = T_{obs,n,t} - T_{base,t}$											
	[° ' "] N	[° ' "] E	[nT]											
1	51:38:45	22:58:42	142.33	143.75	144.72	145.77	146.69	146.67	148.79	147.23	148.98	149.11	149.26	151.20
2	51:37:50	23:00:12	299.54	301.00	301.74	302.86	302.96	303.44	305.65	304.04	305.15	306.17	305.96	306.08
3	51:36:28	23:00:22	318.57	320.17	321.37	323.03	322.25	323.89	324.94	323.14	324.83	324.92	324.26	324.90
4	51:35:34	23:00:43	374.91	376.70	377.71	378.63	378.10	378.98	379.98	377.92	378.75	379.16	378.61	379.62
5	51:34:55	23:01:31	427.12	427.89	428.84	428.92	429.37	430.00	432.19	431.33	434.54	433.94	435.77	434.47
6	51:34:18	23:02:42	453.31	454.24	454.61	454.93	456.00	456.59	455.86	455.08	456.04	455.63	456.96	457.12
7	51:33:35	23:02:58	440.85	441.95	442.90	445.10	444.90	446.58	446.45	445.59	447.12	447.75	447.51	447.57
8	51:32:50	23:03:17	540.68	541.75	543.79	544.87	544.52	546.88	546.32	546.34	547.17	547.12	547.05	547.15
9	51:31:55	23:04:55	723.12	724.59	725.47	727.75	727.08	728.29	728.84	728.75	730.03	728.40	728.92	729.23
10	51:31:03	23:05:22	863.33	864.16	865.51	867.01	866.53	865.85	867.56	866.65	867.87	868.14	867.93	867.67
11	51:30:15	23:05:41	611.44	611.48	611.92	612.77	612.10	611.03	611.84	611.23	612.10	611.04	611.10	611.03
12	51:29:30	23:05:52	294.15	294.03	293.81	294.33	293.79	294.21	293.11	292.41	292.62	291.70	291.81	291.73
13	51:27:52	23:07:30	33.25	32.98	33.43	33.04	33.15	32.86	32.76	32.01	31.50	31.89	31.21	30.91
14	51:26:50	23:09:18	-12.45	-13.50	-13.07	-12.89	-12.79	-13.32	-13.80	-13.95	-14.39	-13.98	-14.82	-15.17
15	51:24:54	23:09:50	-41.28	-42.53	-41.42	-41.16	-41.41	-41.34	-41.94	-41.90	-42.34	-42.21	-42.29	-42.95
16	51:23:43	23:12:05	-59.23	-60.57	-59.57	-59.42	-59.51	-59.88	-59.85	-59.72	-60.21	-60.14	-60.56	-61.07
17	51:22:38	23:12:58	-45.20	-46.27	-45.49	-45.30	-45.03	-45.42	-46.36	-46.13	-46.62	-46.73	-47.23	-46.55
18	51:20:53	23:13:50	-27.22	-27.98	-27.70	-27.67	-27.79	-27.79	-27.88	-27.61	-27.89	-28.48	-28.43	-28.71
19	51:20:00	23:15:53	-15.86	-17.49	-16.03	-16.80	-17.53	-17.33	-17.39	-16.78	-17.29	-18.20	-17.96	-17.89
20	51:17:50	23:17:17	13.79	13.47	13.34	13.91	13.37	13.03	13.02	13.50	13.02	12.89	12.98	12.83
		$T_{baza} - T_{Belek}$												
Baza <i>Base</i>	51:18:58	23:16:27	-297.05	-292.41	-304.47	-300.73	-299.39	-300.22	-302.62	-301.19	-302.05	-301.5	-301.28	-300.953

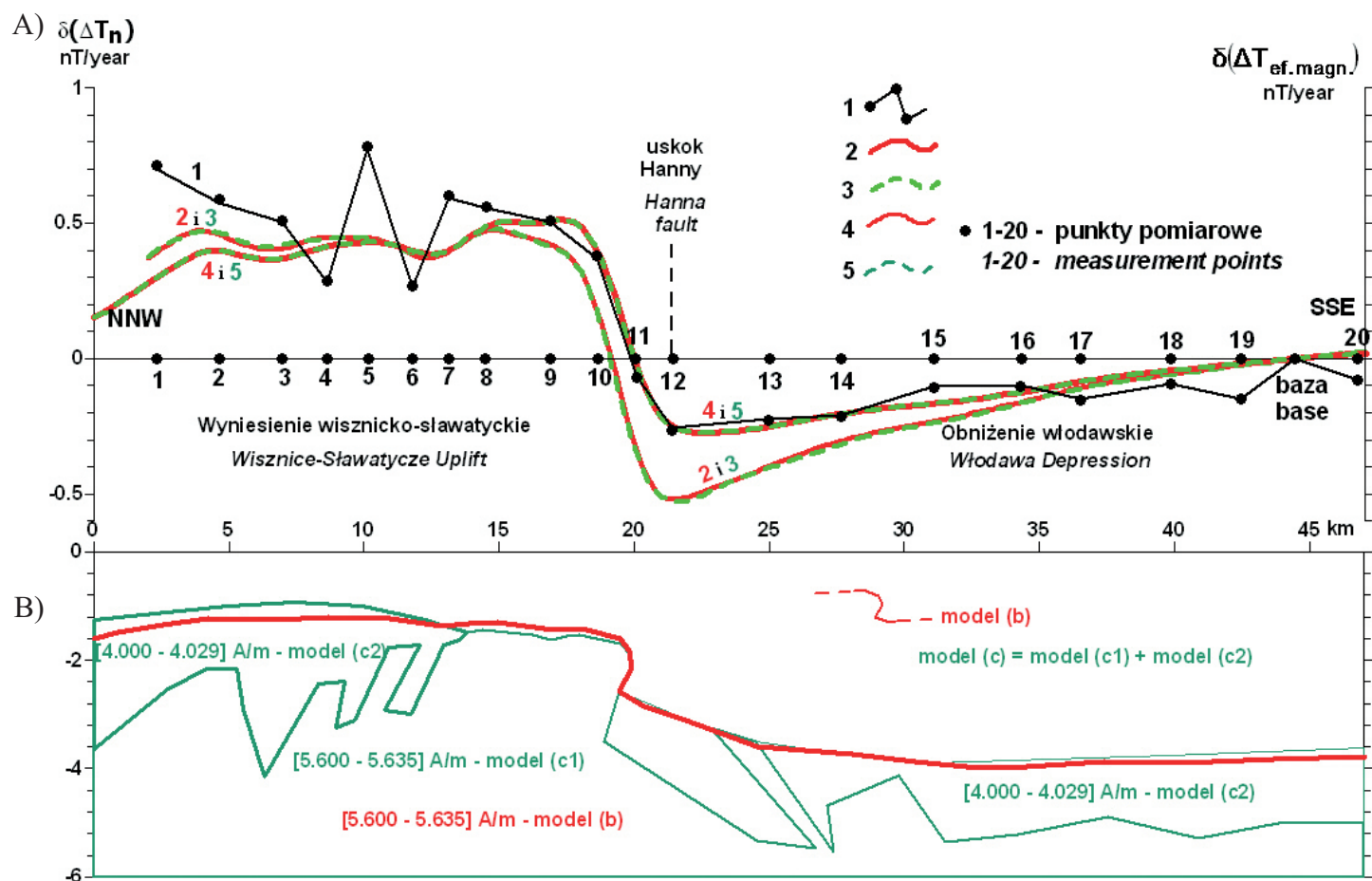


Fig. 6. Względne zmiany czasowe pola magnetycznego Ziemi i względne zmiany czasowe efektów magnetycznych dla modeli ekwiwalentnych (b) i (c) (1997–2008) wzdłuż profilu Parczew – Chełm: A) zestawienie względnych zmian czasowych ziemskiego pola magnetycznego $\delta(\Delta T_n) = b_n$ z względnymi zmianami czasowymi efektów magnetycznych $\delta(\Delta T_{ef.magn.})$, związanymi ze wzrostem namagnesowania indukcyjnego w okresie od 1997–2008 (por. Tab. 2); B) modele ekwiwalentne (b) i (c) wraz z zaznaczonymi wzrostami ich namagnesowania indukcyjnego, wywołanymi wzrostem ziemskiego pola magnetycznego w okresie 1997–2008 (p. Tab. 2). Objasnienia do krzywych: 1 – względne zmiany czasowe ziemskiego pola magnetycznego $\delta(\Delta T_n) = b_n$ (por. Fig. 3), 2 i 3 – względne zmiany czasowe efektów magnetycznych $\delta(\Delta T_{ef.magn.})$, związane ze zmianami namagnesowania indukcyjnego, odpowiadające modelowi (b) (por. Fig. 5B) i modelowi (c) (por. Fig. 5C), 4 i 5 – względne zmiany czasowe efektów magnetycznych $\delta(\Delta T_{ef.magn.})$ związane z modelami (b) i (c), w których uwzględniono zmiany deklinacji D o wartości 0.5° zamiast 1° w 2008 (por. Tab. 2)

Fig. 6. Relative temporal changes of the geomagnetic field and relative temporal changes of magnetic effects for equivalent models (b) and (c) (1997–2008) along the Parczew – Chełm profile: A) comparison of relative temporal changes of the geomagnetic field $\delta(\Delta T_n) = b_n$ and relative temporal changes of magnetic effects $\delta(\Delta T_{ef.magn.})$, related to the increase of the induced magnetization in 1997–2008 years (Tab. 2); B) equivalent models (b) and (c) with marked increases of their induced magnetization, caused by the increase of the geomagnetic field in 1997–2008 years (Tab. 2). Explanations to the curves: 1 – relative temporal changes of geomagnetic field $\delta(\Delta T_n) = b_n$ (Fig. 3), 2 and 3 – relative temporal changes of the magnetic effects $\delta(\Delta T_{ef.magn.})$, related to the changes of the induced magnetization, corresponding to the model (b) (Fig. 5B) and to the model (c) (Fig. 5C), 4 and 5 – relative temporal changes of the magnetic effects $\delta(\Delta T_{ef.magn.})$ corresponding to the models (b) and (c), where declination D changes up to 0.5° in 2008 year instead 1° (Tab. 2) were taken into account