



Czasowe zmiany pola siły ciężkości w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym i ich związek z eksploatacją górnictwem

Temporal changes in the gravity field of the Upper Silesian Coal Basin and their relation to mining

Dr inż. Andrzej Kotyrba*)

Treść: W artykule przedstawiono wyniki badań zmian pola siły ciężkości zachodzących współcześnie w północnej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW). W przeszłości w badanym obszarze podziemną eksploatację górnictwem prowadziło wiele kopalń węgla kamiennego, rud cynku i ołowiu. Część kopalń została zlikwidowana. Pozostałe prowadzą eksploatację nadal. W 2002 roku w obszarze badań założono sieć monitoringowych punktów geodezyjnych. W wyniku okresowych pomiarów na tych punktach zgromadzono trzy zbiory danych obejmujących wartości składowej pionowej siły ciężkości g , wartości anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera dg oraz wysokości punktów siatki z lat 2002, 2003 i 2011. Dane te przeanalizowano w odniesieniu do prędkości ruchów pionowych skorupy ziemskiej w obszarze zagłębia górnośląskiego, sejsmiczności oraz hydrogeologii regionu.

Abstract: This paper presents the research results of the gravity field changes taking place nowadays in the northern part of the Upper Silesian Coal Basin (USCB). In the past, in the tested area underground mining operations were led by numerous coal and ore mines. Some mines have been closed. Others continue their operation. In 2002, in the area of research a geodetic network of monitoring points has been established. As a result of periodic measurements on these points, three data sets were collected which covered the vertical component of the force of gravity g , the gravity anomalies in Bouguer reduction dg and the elevation of grid points from the years 2002, 2003 and 2011. This data was analyzed in relation to the speed of vertical movement of the earth crust in the area of the Upper Silesian basin, seismic activity and hydrogeology of the region.

Słowa kluczowe:

górnictwo, eksploatacja, badania, monitoring

Key words:

mining industry, exploitation, research, monitoring

1. Wprowadzenie

Pole grawitacji ziemskiej jest jednym z elementów naturalnego środowiska geologicznego. Kształt pola siły ciężkości w określonym obszarze kuli ziemskiej zdeteminowany jest różnicowaniem gęstości objętościowej budujących go utworów geologicznych. Jego zmiana nie jest uwzględniana w ocenach oddziaływania eksploatacji górnictwem na środowisko, pomimo iż oczywistym jest, że eksploatacja powoduje przemiany w regionalnym rozkładzie masy, które mogą mieć wpływ na naturalną równowagę górnych warstw skorupy ziemskiej. Implikacją zmian pola grawitacji są ruchy górotworu w skali regionalnej, których objawy są obserwowane jako wstrząsy i odkształcenia powierzchni [8]. Podziemna eksploatacja węgla kamiennego w obszarze GZW powoduje przemieszczenie znacznych mas skalnych z głębokich partii górotworu na powierzchnię ziemi. Powoduje to trwałe przeobrażenie gęstości objętościowej utworów zalegających pomiędzy poziomem eksploatacji a powierzchnią ziemi

przy jednoczesnej zmianie jej morfologii. Przeobrażenia te rozpoczynają się z chwilą wykonania wyrobisk w obszarach eksploatacji podziemnej. Przyjmuje się, że w cyklu życia kopalni podziemnej zakończenie procesu oddziaływania eksploatacji na powierzchnię kończy się dopiero wraz z powrotem wód podziemnych do poziomów obserwowanych przed jej rozpoczęciem. Pogląd ten ma jedynie wartość hipotetyczną, gdyż obserwacje zachowania się powierzchni terenów, w których górotwór został przeobrażony antropogenicznie (tereny podziemnej eksploatacji, tereny z budowlami podziemnymi, tereny drenażu poziomów wodonośnych) wskazują na ruchy w czasie. Próba wyjaśnienia przyczyn takich zjawisk są teorie o „ekspansji pustek podziemnych do powierzchni” pod wpływem działania sił grawitacji [1,2,3].

Znajomość pola siły ciężkości w obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego ogranicza się jedynie do jego składowej pionowej. Jest to wynikiem powszechnego stosowania do pomiarów siły ciężkości grawimetrów lądowych. Przyrządy te umożliwiają określenie wartości składowej pionowej siły ciężkości w danym punkcie metodą różnicową, w której mierzy się różnicę wartości siły ciężkości pomiędzy punktem

*) Główny Instytut Górnictwa, Katowice

bazowym o znanej wartości siły ciężkości (punkt osnowy grawimetrycznej Polski) a punktem, w którym chcemy tę wartość określić. Różnica wartości daje nam w wyniku estymatę absolutnej wartości składowej pionowej siły ciężkości g . Zmianę w czasie charakteryzuje więc różnica wartości g pomierzonej w danym punkcie w dwóch różnych momentach czasu (anomalia czasowa siły ciężkości δg_t).

Na wartość absolutną natężenia siły ciężkości na powierzchni ziemi wpływ mają:

- położenie punktu na powierzchni kuli ziemskiej opisane szerokością i długością geograficzną,
- kształt kuli ziemskiej,
- rozkład masy wewnątrz kuli ziemskiej.

W badaniach grawimetrycznych powszechnie wykorzystuje się wartość anomalii składowej pionowej siły ciężkości zredukowanej do poziomu geoidy oznaczanej symbolem δg . Jest to wielkość określająca rzeczywiste odstępstwo pola siły ciężkości w danym punkcie od matematycznego modelu kuli ziemskiej o jednorodnym rozkładzie masy w jej wnętrzu. Wartość tę oblicza się ze wzoru

$$\delta g_B = g + (0,3086 - 0,04187\sigma) \cdot H - \gamma_0 \quad (1)$$

gdzie:

- g – pomierzona w danym punkcie wartość siły ciężkości, mGal,
- H – wysokość n.p.m. punktu pomiarowego w systemie bałtyckim, m,
- σ – gęstość warstwy zredukowanej, 10^3 kg/m^3
- $0,3086H$ – poprawka wolnopowietrzna Faye'a, mGal (eliminująca wpływ wysokości położenia punktu pomiarowego względem poziomu odniesienia),
- $0,04187\sigma H$ – poprawka Bouguera, mGal (eliminująca składową pionową siłę przyciągania kompleksu skalnego ograniczonego płaszczyznami poziomymi przechodzącymi przez punkt pomiarowy i poziom odniesienia),
- γ_0 – normalna w danym punkcie wartość siły ciężkości, mGal.

Zakładając, że wartości normalne siły ciężkości nie ulegają zmianie w czasie, gdyż w lądowych pomiarach grawimetrycznych są one obliczane dla określonych matematycznie modeli geometrycznych kuli ziemskiej, przekształcając wzór 1 otrzymujemy wyrażenie opisujące zmianę w czasie anomalii Bouguera (anomalię różnicową δg_{Bt}) w postaci (2). We wzorze tym indeksami dolnymi oznaczono dwa różne momenty czasu $t=0$ i $t=t$, w których dokonano pomiaru siły ciężkości.

$$\delta g_{Bt}(t) = (g_t - g_0) - 0,3086(H_t - H_0) - 0,04187(\sigma_t - \sigma_0) \quad (2)$$

Ze wzoru 2 wynika, że na wartość czasowej, różnicowej anomalii składowej pionowej siły ciężkości w redukcji Bouguera wpływ mają trzy następujące parametry:

- różnica wartości siły ciężkości w punkcie pomiarowym w momentach czasu t i 0 ,
- różnica wysokości punktu pomiarowego (nad średnim poziomem mórz i oceanów opisanym geoidą) w momentach czasu t i 0 ,
- różnica gęstości objętościowej warstwy zredukowanej pomiędzy powierzchnią ziemi a poziomem redukcji (np. powierzchnią geoidy) w momentach czasu t i 0 .

W skali opisanego w artykule regionu (obszar monitoringowej sieci grawimetrycznej) o powierzchni ok. 900 km^2 ($24,5 \times 36 \text{ km}$) za najważniejszy powód zmian należy uznać podziemną eksploatację górnictw. W jej wyniku zmianom ulega rzeźba niektórych rejonów powierzchni i gęstość utworów

geologicznych pomiędzy powierzchnią terenu a poziomem eksploatacji (zmienne niezależne). Zmiana wartości anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera jest już tylko pochodną zmian tych parametrów.

Rozproszenie rejonów eksploatacji podziemnej w obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego powoduje, że zmianom ulega również pole regionalnych naprężeń w górotworze, które zostały ustalone procesami geologicznymi. Zmiany rozkładu pola naprężeń są źródłem zjawisk dynamicznych, takich jak ruchy górotworu i wstrząsy sejsmiczne. Zjawiska te są tylko sygnałami procesów prowadzących do wytworzenia nowego stanu regionalnej równowagi w górotworze. Tak więc zmiana rozkładu pola siły ciężkości w regionie jest czynnikiem wpływającym bezpośrednio i pośrednio na wszystkie zagrożenia naturalne towarzyszące podziemnej eksploatacji oraz procesy obserwowane w rzeźbie terenów górnictw i pogórnictw.

Dotychczasowe badania związku pola zmian siły ciężkości z eksploatacją podziemną ograniczały się do obszarów objętych strefą jej bezpośrednich wpływów w ujęciu geodezyjnym (pole bliskie). Zależność anomalii siły ciężkości od czasu w analogii do zależności osiadania punktu położonego w obszarze oddziaływania eksploatacji nad przestrzenią, w której zachodzą odkształcenia dylatacyjne (objętościowe) można opisać wzorem 3 [7]

$$\Delta g_i(t) = \Delta g_{k0} \cdot (1 - e^{-ct}) \quad (3)$$

gdzie:

- $\Delta g_i(t)$ – wartość anomalii siły ciężkości w czasie t ,
- Δg_{k0} – wartość anomalii siły ciężkości w czasie $t=0$,
- c – współczynnik czasu.

Z zależności tej wynika, że na obszarach prowadzonej eksploatacji wartości siły ciężkości w punktach zlokalizowanych nad nią maleją eksponencjalnie z czasem. Potwierdzają to obserwacje eksperymentalne. Z wielu geodezyjnych i grawimetrycznych pomiarów powierzchniowych przeprowadzonych w rejonach eksploatacji podziemnej wynika, że wartości siły ciężkości bardziej lub mniej regularnie powielają charakter obniżen powierzchni terenu [10].

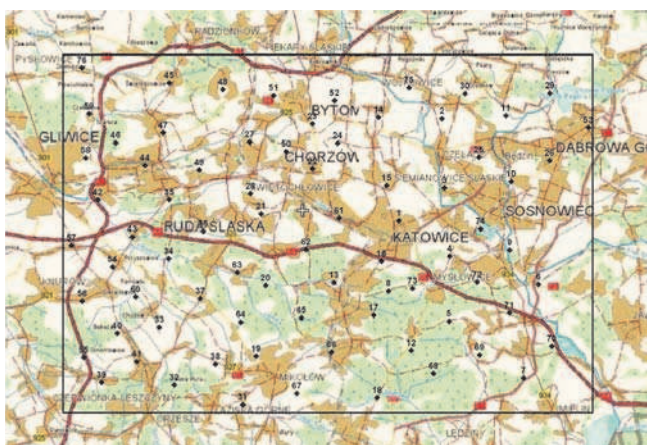
Ze wzoru (2) wynika, że wartości anomalii siły ciężkości w danym punkcie mogą ulegać zmniejszeniu wraz z obniżeniami powierzchni i gęstości warstwy zredukowanej. Mogą też ulegać wzrostowi w rejonach, w których następuje przyrost gęstości warstwy zredukowanej. Oba wymienione parametry ulegają zmianie w procesie przeobrażenia struktury górotworu przy przenoszeniu się wpływów eksploatacji podziemnej na powierzchnię terenu. W przypadku zaobserwowanych w latach 2002 i 2003 zmian pola grawitacji w obszarze regionu objętego monitoringiem (składającego się z wielu przypadkowo rozmieszczonych w obszarze badań pól bliskich), zmiany wartości siły ciężkości przyjmowały znaki ujemne i dodatnie [5]. Różnice znaków były niezależne od tego czy dany punkt pomiarowy był zlokalizowany na terenie czynnej czy zlikwidowanej kopalni czy też w terenie, na którym nie prowadzono eksploatacji podziemnej. Nakazuje to przyjąć, że oprócz bliskich wpływów eksploatacji istnieją również wpływy dalekie. W przeciwieństwie do wpływów bliskich nie są one ograniczone w czasie, gdyż proces ustalania się równowagi górotworu w skali regionalnej jest długotrwały i zależy od wielu różnych czynników. Ze względu na sposób przeobrażenia środowiska eksploatacją podziemną, czas powrotu górotworu do momentu stałej równowagi może być tego samego rzędu co czas relaksacji naprężeń w górotworze po zakończonych ruchach tektonicznych. Czas ten liczony jest w jednostkach geologicznych, a więc tysiącach i setkach tysięcy lat [4]. Powyższe stwierdzenia nakazują przyjąć, że oprócz krótkoterminowych oddziaływań eksploatacji na górotwór i powierzchnię terenów górnictw istnieją również oddziaływania długoterminowe.

2. Metodyka badań

W roku 2002 na terenie północnej części GZW założono sieć monitoringowych, 77 grawimetrycznych punktów obserwacyjnych dowiązanych do punktu podstawowej osnowy grawimetrycznej Polski w Siewierzu (poza granicami zagłębia węglowego) o numerze identyfikacyjnym 5019.2811.35.000, w którym wartość składowej pionowej przyspieszenia ziemskiego wynosi $g = 981060,274 \pm 0,007 \text{ mGal}$. Usytuowanie rejonu badań na mapach sytuacyjnych Polski oraz Górnego Śląska ilustrują odpowiednio rysunki 1 i 2.



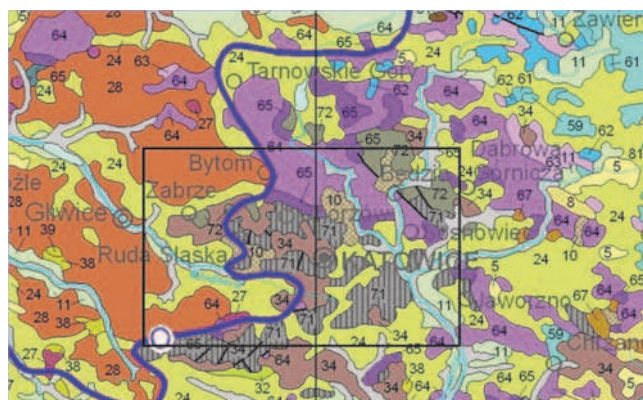
Rys. 1. Położenie obszaru badań na mapie Polski (orientacja)
Fig. 1. Location of the research area on the map of Poland (orientation)



Rys. 2. Usytuowanie punktów obserwacyjnych oraz granic obszaru odwzorowania pola siły ciężkości na mapie sytuacyjnej Górnego Śląska

Fig. 2. Location of observation points and borders of the area with mapping the gravity field on a land survey map of Upper Silesia

W obszarze badań na powierzchni odsłaniają się utwory czwartorzędu, trzeciorzęd, triasu i karbonu (rys.3). Odpowiednio są one oznaczone na rysunku kolorami, żółtym, brązowym, fioletowym i szarym. Pod względem strukturalnym obszar badań monitoringowych obejmuje nieckę bytomską, siodło główne i północną część niecki głównej.



Rys. 3. Rejon badań grawimetrycznych (prostokąt) na tle mapy geologicznej Polski w skali 1:500000 [9]

Fig. 3. Area of gravimetric research (rectangle) in the background of geological map of Poland in the scale 1:500 000 [9]

Położenie sieci grawimetrycznej GIG na tle obszarów górniczych czynnych i zlikwidowanych w latach 1990-2005 kopalń uwidoczniło na rys. 4. W latach 2002 i 2003 na punktach sieci wykonano dwie początkowe serie obserwacji grawimetrycznych. Z pomiarów tych otrzymano jeden zbiór danych różnicowych do analizy zmienności pola w czasie. Jego analiza wykazała, że w obszarach prowadzonej i dokonanej eksploatacji w okresie pierwszego roku zachodzą zmiany natężenia siły ciężkości o wartości znacznie przekraczającej wartość błędów pomiarowych [5]. Roczne spadki siły ciężkości interpretowano jako wynik ubytku masy w górotworze, powodujące ruchy powierzchni terenu (osiadania). Przyrosty siły ciężkości wiązano z rejonami wzrostów składowej pionowej ciśnienia w górotworze, wywołanymi eksploatacją górniczą lub ruchami neotektonicznymi.

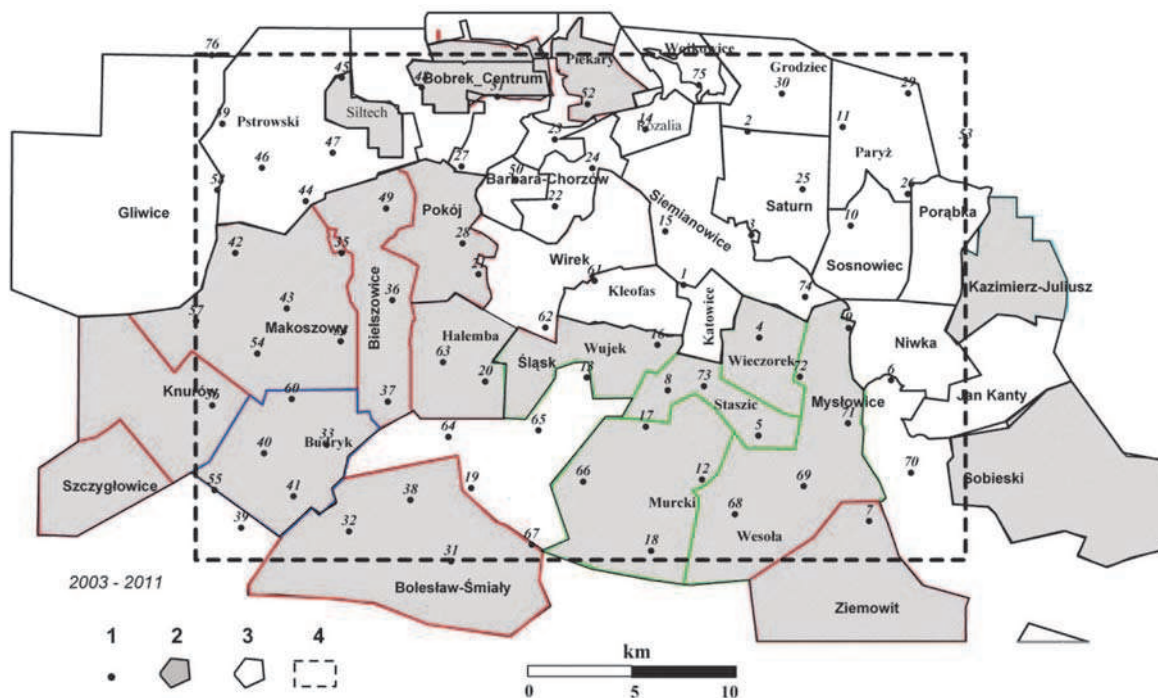
2. Ruchy pionowe skorupy w obszarze GZW na tle obszaru Polski

Pomimo wprowadzenia do geodezji nowoczesnych technologii pomiarowych (w tym bazujących na satelitach), w obszarach eksploatacji podziemnej trudno dokonać wiarygodnych pomiarów przemieszczeń skorupy, gdyż powodowane eksploatacją obniżenia powierzchni wielokrotnie przekraczają wartość jej odkształceń. Trudność ta dotyczy zwłaszcza szacowania długoterminowych zmian położenia skorupy w oparciu o analizę porównawczą zbiorów danych obserwacyjnych starymi i nowymi technikami pomiarowymi.

Do oceny trendu i amplitudy zachodzących w czasie zmian położenia powierzchni terenów Górnego Śląska wywołanych czynnikami geologicznymi można wykorzystać dane geodezyjne charakteryzujące obszar całej Polski (rys. 5). Na podstawie tych danych można próbować ocenić zmiany zachodzące w obszarze Polski w trakcie ostatnich 88 lat. Dane charakteryzujące pionowe ruchy skorupy pochodzą z trzech różnicowych zbiorów danych niwelacyjnych zgromadzonych w następujących trzech okresach czasu:

- 1926 - 1937 i 1952 - 1958 [12]
- 1947 - 1960 i 1974 - 1979 [12],
- 1974 - 1979 i 1997 - 2003 [6,12].

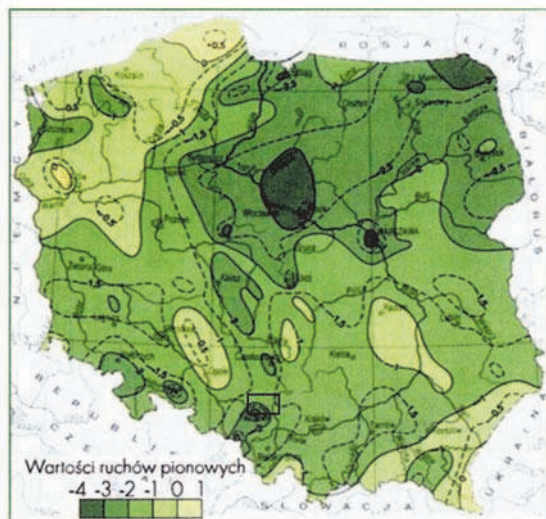
Z badań tych wynika, że tereny Polski generalnie ulegają stałemu obniżaniu w czasie. Prędkość pionowych ruchów skorupy na obszarze Polski zmieniała się w okresie ostatnich 56 lat w granicach od 0 do -5 mm/rok. O ile w zbiorze danych charakteryzujących okres lat 1947-1979 były na obszarze Polski nieliczne rejon, które ulegały niewielkiemu wypię-



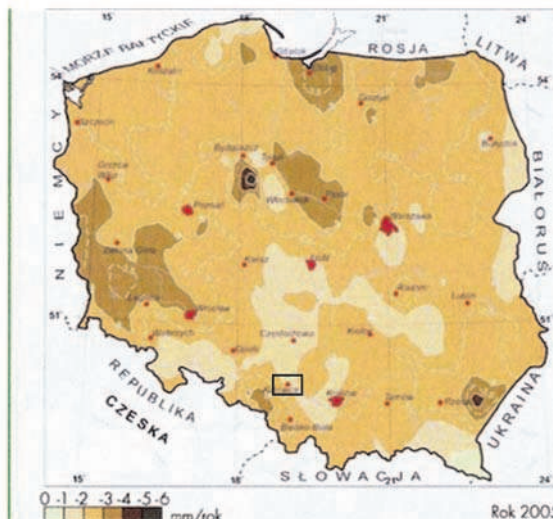
Rys. 4. Rozmieszczenie punktów monitoringowej sieci grawimetrycznej GIG na tle obszarów górniczych czynnych i zlikwidowanych kopalń węgla w północnej części GZW (1 - punkt obserwacyjny, 2 - granica obszaru górniczego czynnej kopalni węgla, 3 - granica obszaru górniczego kopalni zlikwidowanej, 4 - obszar odwzorowania pola siły ciężkości)

Fig. 4. Arrangement of gravimetric monitor network points GIG in the background of active mining areas and closed coal mines in the northern part of USCBA (1 – observation point, 2 – border of the mining area of an active coal mine, 3 – border of the mining area of a closed mine, 4 – area of mapping of the gravity field)

a)



b)



Rys. 5. Prędkości ruchów pionowych skorupy ziemskiej w obszarze monitorowania na tle obszaru Polski w interwałach lat a) 1947-1979 i b) 1974-2003

Fig. 5. Speed of vertical movements of the earth crust in the area of ongoing monitoring within the scope of Polish borders between 1947-1979 (a) and 1974-2003 (b)

trzeniu rzędu + 1/mm/rok (rys. 5 a), to już w późniejszym okresie czasu (od 1974 roku) obszar Polski ulegał jedynie obniżaniu (rys. 5 b). Z przytoczonych danych wynika, że w obszarze Górnego Śląska, podobnie jak i na terenie całej Polski, skorupa ziemska ulega stałemu obniżaniu od roku 1974. Prędkość obniżania zmienia się od – 2 do – 3 mm/rok.

W obszarze opisanych w artykule badań w okresie 8 lat mogły więc nastąpić obniżenia punktów sieci grawimetrycznej w przedziale od 18 do 24 mm. Odkształceń tego rzędu nie można wiązać z wpływami eksploatacji podziemnej, gdyż mogą być one związane z ewolucją skorupy ziemskiej w obrębie górnośląskiego basenu węglowego.

3. Ruchy pionowe terenu w obszarze przeprowadzonych badań

W okresie 8 lat, który dzieli serie pomiarów grawimetrycznych w obszarze badań nastąpiły przemieszczenia pionowe punktów sieci grawimetrycznej. Wizualizuje je interpolowana metodą krigingu (siatka 2x2 km) mapa przedstawiona na rys. 6. Odwzorowanie to obarczone jest pewnym błędem wynikającym z porównywania danych otrzymanych różnymi technikami pomiarowymi. W roku 2003 pomiary wykonywano metodą niwelacji technicznej, przyrównując wysokość punktów grawimetrycznych do wysokości punktów II klasy osnowy wysokościowej Śląska. W roku 2011 pomiary wykonywano techniką GPS. Obniżenia punktów sieci na obszarach górniczych czynnych kopalń w analizowanym okresie zmieniały się od 0.2 do 3.2 m. Zjawiska te należy wiązać z osiadaniami terenu pod wpływem dokonanych eksploatacji. Obniżenia punktów sieci na terenach zlikwidowanych kopalń zmieniały się w granicach od 0 do 0.2 m. Dane te pozwalają określić przedział prędkości obniżenia powierzchni terenów pogórnich od 0 do 25 mm/rok. Wartość z górnej granicy przedziału jest ok. 10-krotnie większa od wartości prędkości obniżenia skorupy ziemskiej w obszarze GZW wykazanej pomiarami geodezyjnymi [6,12].

Jedynym obszarem zlikwidowanej kopalni, na którym zarejestrowano relatywnie większe obniżenia był północno-zachodni fragment obszaru KWK „Siemianowice”. W rejonie tym obniżenie punktu sieci wyniosło 0.8 m (pkt. nr 14). W wymienionym rejonie po likwidacji kopalni „Siemianowice” przez krótki czas funkcjonował Zakład Górniczy „Rozalia”, który do roku 1999 prowadził eksploatację. Być może więc

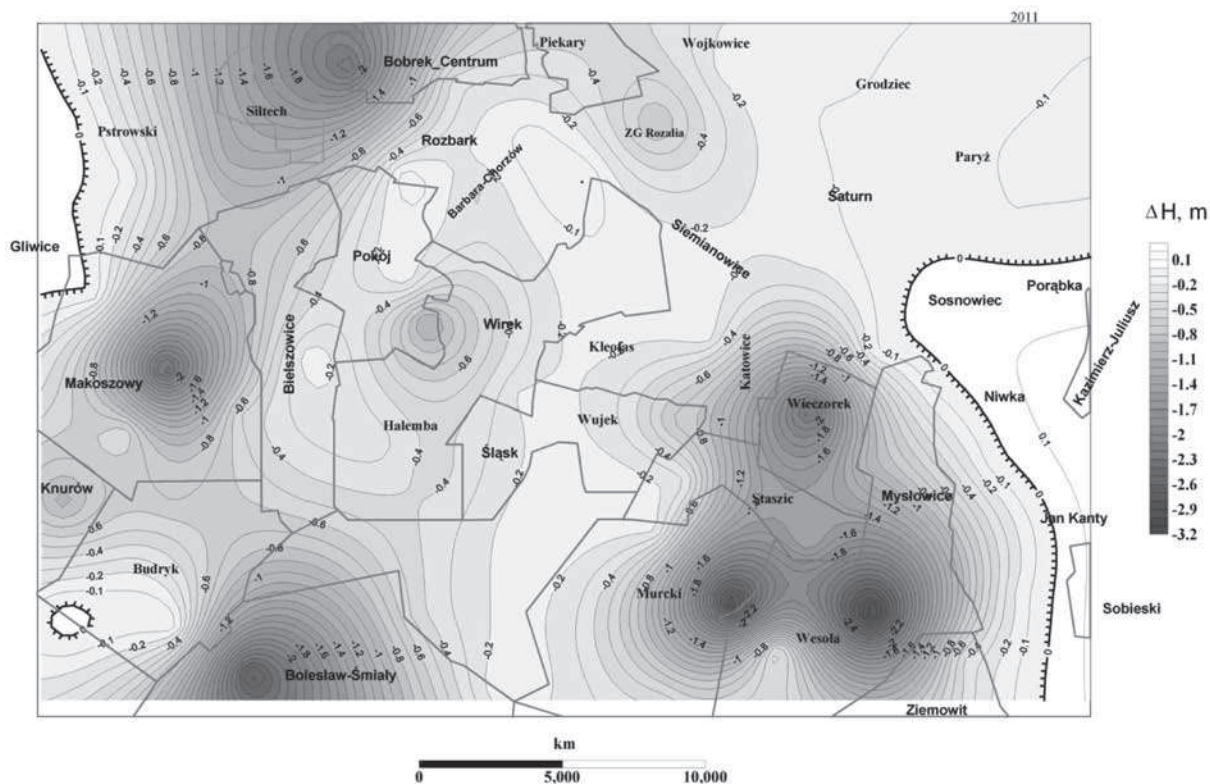
obniżenie to należy wiązać z reszkowymi wpływami tej eksploatacji na powierzchnię.

4. Zmiany wartości absolutnych składowej pionowej siły ciężkości

Interpolowana metodą krigingu w siatce 2 x 2 km różnicowa mapa zmian składowej pionowej natężenia siły ciężkości pomiędzy rokiem 2011 i 2003 przedstawiona jest na rys. 7. Na mapie kolorami wyróżniono rejonów wzrostów i spadków wartości składowej pionowej natężenia siły ciężkości. Wartości te zmieniają się w przedziale od -4.0 do 4.5 mGala (-0.0040 do 0.0045 cm/s²). Rejonów wzrostów wartości składowej pionowej siły ciężkości wyróżniono odcieniami koloru czerwonego. Rejonów spadków wartości wyróżniono odcieniami koloru zielonego.

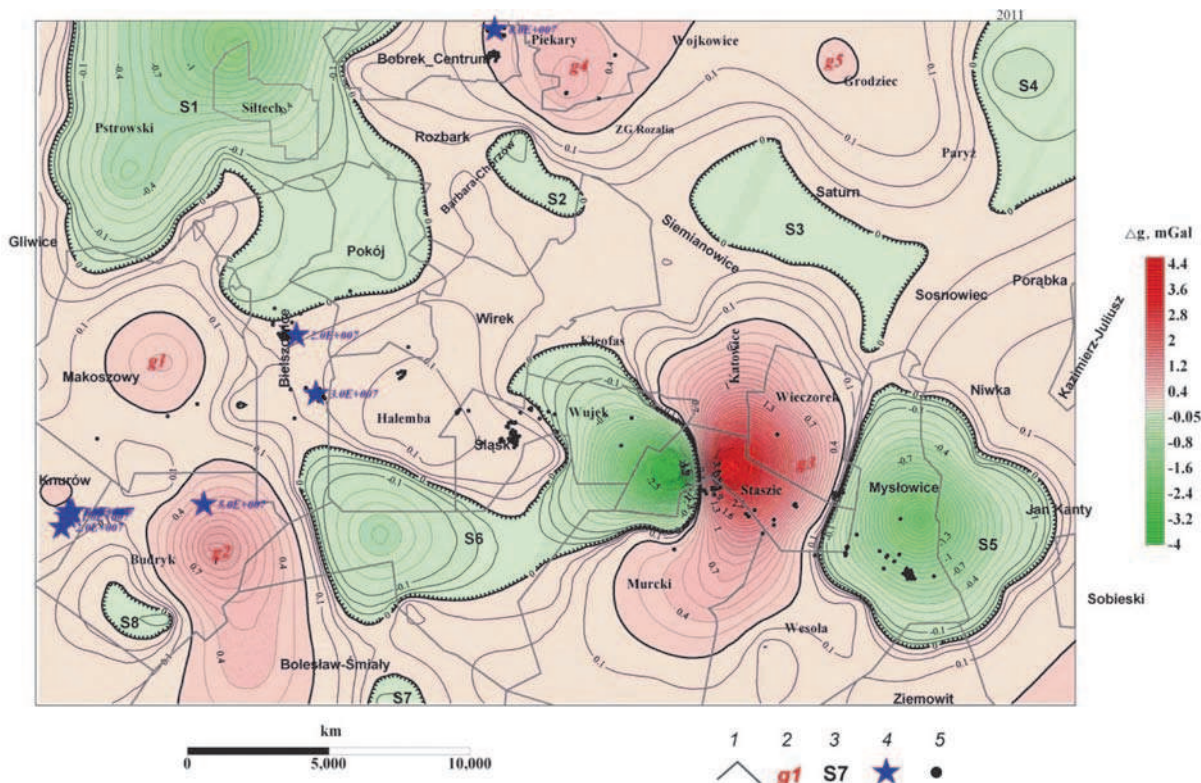
Rejonów, w których obserwuje się spadek natężenia siły ciężkości jest 8. W pozostałym obszarze obserwuje się przyrost wartości składowej pionowej siły ciężkości. Maksymalne przyrosty siły ciężkości (>0.2 mGala) obserwuje się na terenach kopalń „Makoszowy”, „Budryk-Bolesław Smiały”, „Wieczorek”, „Staszic”, „Wesoła”, ZG „Piekary” oraz na terenie zlikwidowanej kopalni „Grodziec”.

W przedstawionym odwzorowaniu, sumaryczna powierzchnia rejonów wzrostów i spadków siły ciężkości jest odmienna. Wyraźnie większa jest powierzchnia obszarów przyrostu siły ciężkości. W procentowym podziale odniesionym do powierzchni odwzorowania odpowiednie proporcje są 70% i 30% (wzrosty, spadki). W aspekcie oceny geomechanicznej górotworu w obrębie terenu badań przedstawione

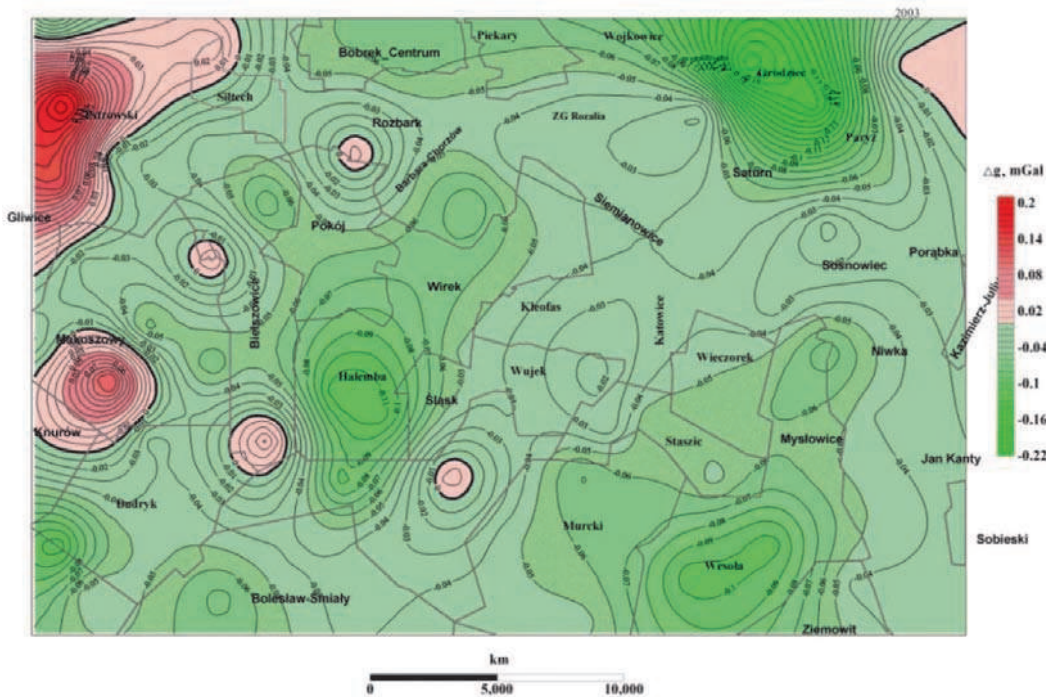


Rys. 6. Odkształcenia pionowe punktów sieci grawimetrycznej w okresie od 2003 do 2011 roku. Granice obszarów górniczych czynnych kopalń oznaczono poligonami

Fig. 6. Vertical deformations of the points of the gravimetric network between 2003 and 2011. Borders of mining areas of active mines are marked with testing grounds



Rys. 7. Zmiany składowej pionowej natężenia siły ciężkości g w latach 2003 i 2011 na tle obszarów górniczych czynnych kopalń (1 - granica obszaru górniczego, 2 - anomalia dodatnia absolutnej wartości siły ciężkości, 3 - anomalia ujemna absolutnej wartości siły ciężkości, 4 - epicentrum wstrząsu o energii $>10^7$ J, 5 - epicentrum wstrząsu o energii $<10^7$ J)
 Fig. 7. Changes of vertical component of gravity force g intensity (apparent gravity) between 2003 and 2011 in the background of mining areas of active mines (1 – border of the mining area, 2 – positive anomaly of the absolute value of gravity force, 3 – negative anomaly of the absolute value of gravity force, 4 – epicenter of a tremor of energy $> 10^7$ J, 5 – epicenter of a tremor of energy $< 10^7$ J)



Rys. 8. Zmiany różnicowe pola składowej pionowej natężenia siły ciężkości g w latach 2002 – 2003 na tle obszarów górniczych czynnych kopalń
 Fig. 8. Differential changes in the field of vertical component of gravity force g intensity between 2002 and 2003 in the background of mining areas of the active mines

odzworowanie pola może wskazywać na stan przejściowej nierównowagi regionu. Największe pod względem powierzchni zmiany są widoczne na terenach prowadzonej eksploatacji. Tereny te uległy odkształceniom pionowym (osiadały) w okresie od 2003 do 2011 r. (rys. 6). Mniejsze pod względem powierzchni rejonów zmian widoczne są na obszarach zlikwidowanych kopalń „Wojkowice” i „Grodziec”. Rejonów anomalii różnicowych siły ciężkości rozmieszczone są nieregularnie na badanym terenie. Największe pod względem amplitudy anomalie widoczne są w części południowo-wschodniej, na terenach górniczych kopalń „Staszic”, „Murcki”, „Wesoła”, „Wieczorek”. Obszar anomalny tworzą trzy rejonów rozciągające się równoleżnikowo. W środkowym rejonie obserwowany jest wzrost siły ciężkości (+). W pozostałych dwóch rejonach (s5 i s6) widoczne są spadki wartości siły ciężkości (-). Anomalie o podobnej amplitudzie zarejestrowano również w części północno-zachodniej terenu badań na obszarze górniczym kopalni „Bobrek-Centrum” i terenie przyległym do niego od zachodu (s1). W obszarze tym obserwuje się znaczne spadki natężenia siły ciężkości. W obrazie mapy wyróżnić należy jeszcze trzy rejonów o relatywnie znacznej amplitudzie przyrostu siły ciężkości. Centra tych anomalii są zlokalizowane na obszarach górniczych kopalń „Budryk”, „Makoszowy” i „Piekary”. Pozostałe widoczne na mapie anomalie mają niewielką powierzchnię i jednopunktowy charakter.

Charakter i amplituda zmian siły ciężkości, które nastąpiły w badanym obszarze w okresie 8 lat (2003-2011) uwidacznia się, gdy porówna się mapę z rys. 6 z mapą różnicowych anomalii pola siły ciężkości z okresu 1 roku (rys. 8). Pod względem amplitudy zmiany te są największe w północnej części obszaru monitorowanego. Zwraca uwagę zmiana znaku z „-” (lata 2002-2003) na „+”, (lata 2003-2011) największej z anomalii różnicowych, rejestrowanej w północno-wschodniej części badanego obszaru (w obszarach zlikwidowanych kopalń „Grodziec” i „Wojkowice”). Genezę tej anomalii w roku 2003 wiązano z osiadaniami terenu i odkształceniami objętościowymi wewnątrz górotworu odwodnionego drenażem górniczym.

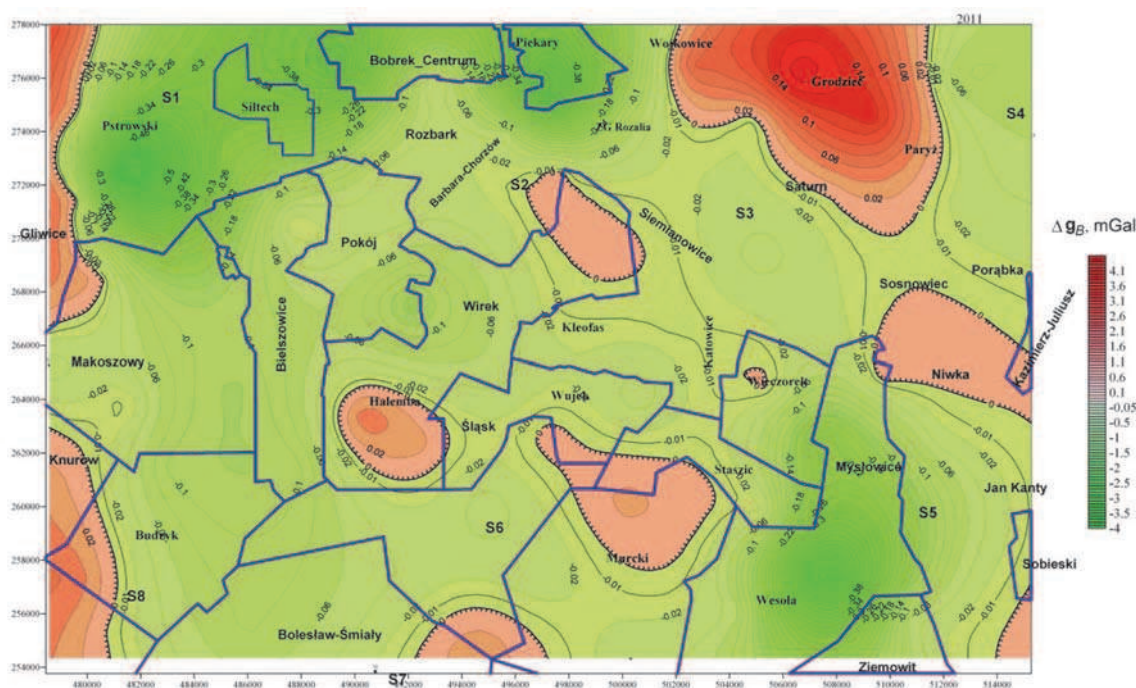
Zmiana znaku na „+” wskazuje, że w rejonie tym nastąpił przyrost gęstości objętościowej górotworu spowodowany najprawdopodobniej wypełnieniem zrobów i pustek pogórnich wodą (podniesieniem poziomu wód podziemnych). Potwierdzają to dane z obserwacji hydrogeologicznych tego rejonu. Poziom wód podziemnych podniósł się od rzędnej -100 m n.p.m. w roku 2003 do rzędnej 192 m n.p.m. (różnica 292 m). Druga ze znacznych amplitudowa anomalii różnicowych w okresie 2002-2003 zlokalizowana była na części obszaru górniczego zlikwidowanej kopalni „Pstrowski”. W okresie pomiędzy latami 2003 i 2011 anomalia różnicowa zmieniła znak z „+” na „-”.

5. Zmiany składowej pionowej siły ciężkości w redukcji Bouguera

Mapa zmian składowej pionowej natężenia siły ciężkości w redukcji Bouguera Δg_B pomiędzy rokiem 2003 i 2011 przedstawiona jest na rys. 9. Jakościowe zmiany, podobnie jak w przypadku wartości siły ciężkości g , charakteryzuje przebieg izolinii anomalii różnicowych oraz ich znak (+ i -). W skali barw przyporządkowanej wartościom na obu mapach kolor zielony odpowiada rejonom, w których anomalia różnicowa ma znak ujemny (w tych obszarach nastąpiło obniżenie wartości natężenia składowej pionowej siły ciężkości w redukcji Bouguera). Odcieniami koloru czerwonego wyróżniono rejonów, w których nastąpił wzrost wartości natężenia składowej pionowej siły ciężkości. Na obu mapach izolinie o wartości zero wyróżniono grubością i deseniem.

Ilościowe zmiany charakteryzuje przedział zmian wartości natężenia składowej pionowej siły ciężkości w redukcji Bouguera, które dla poszczególnych map są następujące:

- anomalia różnicowa pomiędzy latami 2003-2002 (przedział zmian): $-0,2 \div 0,2$ mGal,
- anomalia różnicowa pomiędzy latami 2003 i 2011 (przedział zmian): $-0,7 \div 0,2$ mGal.



Rys. 9. Zmiany różnicowe pola anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera (Δg_B) w latach 2003 i 2011 na tle obszarów górniczych czynnych kopalń

Fig. 9. Differential changes in the field of gravity force anomaly in Bouguer reduction (Δg_B) between 2003 and 2011 in the background of mining areas of the active mines

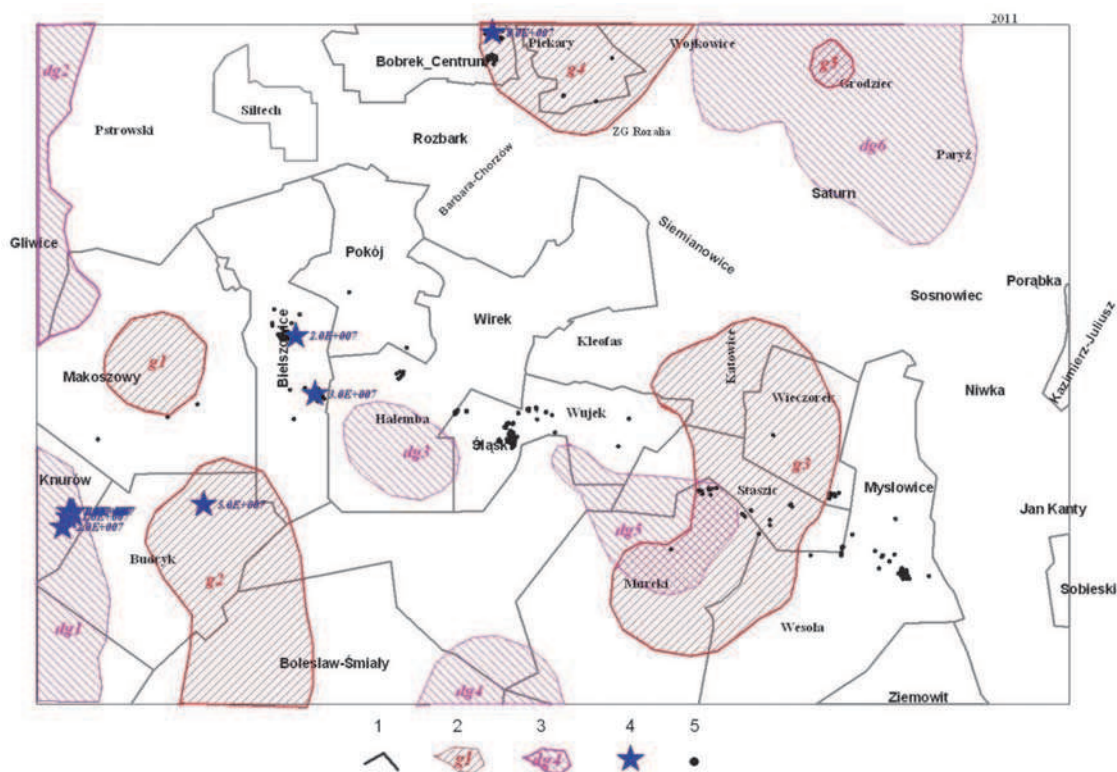
Amplituda przyrostów wartości siły ciężkości nie uległa zmianie, pomimo że anomalie różnicowe obliczono dla różnych przedziałów czasu. Dużej zmianie natomiast uległa amplituda obniżenia siły ciężkości. Po części jest ona spowodowana przemieszczeniami powierzchni, gdyż rejon obniżenia siły ciężkości są zlokalizowane obecnie głównie w obszarach czynnych kopalń. Po części jednak zmiany te wywołane są przeobrażeniami gęstościowymi w górotworze na terenach zlikwidowanych kopalń. W obszarach górniczych tych kopalń zmiany są relatywnie mniejsze aniżeli w obszarach czynnych kopalń, ale na tyle duże, że nie można ich uznać za błędy pomiarowe czy też artefakty powstałe w procesie przetwarzania danych. W analizie map zwraca uwagę, że podobnie jak w przypadku map obrazujących rozkład anomalii różnicowych g (wartości absolutnych), największe pod względem amplitudy anomalie widoczne są w rejonach, w których w ostatnich latach wystąpiły nie do końca zrozumiałe pod względem genezy przypadki ruchów górotworu (Bytom - Karb, Katowice - Murck, wzgórze Wandy).

6. Ocena wpływu zmian pola siły ciężkości na środowisko

Wyniki badań wskazują, że w północnej części zagłębia węglowego pomiędzy rokiem 2003 i 2011 zaszły duże zmiany w analizowanych rozkładach pól siły ciężkości. Zmiany te trudno jednoznacznie zinterpretować, gdyż istnieje słabe podobieństwo rozkładu absolutnych wartości składowej pionowej siły ciężkości g i rozkładu wartości składowej pionowej siły ciężkości w redukcji Bouguera δg_{Br} . Z analiz teoretycznych

wynika, że rozkład pola anomalii czasowych δg_{Br} powinien powielać rozkład osiadań terenu. Generalnie obserwuje się to w zarejestrowanym obrazie anomalii różnicowych. Z odwzorowania ruchów pionowych punktów siatki grawimetrycznej wynika, że prawie cały teren badany uległ obniżeniu. Obniżenia punktów były największe na terenach czynnych kopalń. Mniejsze wartości obniżenia zarejestrowano na terenach kopalń zlikwidowanych i terenach, gdzie nie było nigdy eksploatacji (np. pole rezerwowe pomiędzy kopalniami „Bolesław-Smiały” i „Śląsk”). Na terenach tych osiadań punktów były rzędu 10 – 20 cm. Zgromadzone dane wskazują, że w obszarze badań wystąpiły również wypiętrzenia do 10 cm (tereny zlikwidowanych kopalń „Jan Kanty”, „Sosnowiec Niwka”, „Porąbka” oraz zachodniej części kopalni „Pstrowski” i czynnej kopalni „Budryk”). Dane te wymagają weryfikacji gdyż mogą być wynikiem użycia różnych technik pomiaru wysokości w poszczególnych seriach pomiarowych. Wartość 10 cm można przyjąć jako estymatę maksymalnego błędów dla zbioru różnic wysokości punktów grawimetrycznych z lat 2002 i 2011. Niezależnie jednak od interpretacji wypiętrzeń zebrane dane wskazują, że zasięg wpływów prowadzonych w analizowanym okresie eksploatacji w czynnych kopalniach był większy, aniżeli się to powszechnie przyjmuje. Trudno bowiem zakładać, że obserwowane ruchy powierzchni na terenach zlikwidowanych kopalń są spowodowane jedynie dawną eksploatacją górnictw (choćby takiej możliwości nie można zupełnie wykluczyć).

Przyjmując, że obniżenia wartości anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera są jedynie pochodną osiadania powierzchni, istotne w aspekcie prognozowania zagrożeń



Rys. 10 Zbiorcza mapa dodatnich czasowych anomalii grawimetrycznych i ognisk wstrząsów sejsmicznych zarejestrowanych w 2011 roku w obszarze badań (1 - granica czynnego obszaru górniczego, 2 - dodatnia anomalia czasowa absolutnej wartości składowej pionowej siły ciężkości $g_t > 0,2$ mGala, 3 - dodatnia anomalia czasowa wartości składowej pionowej siły ciężkości w redukcji Bouguera δg_{Br} , 4 - epicentrum wstrząsu o energii $>10^7$ J, 5 - epicentrum wstrząsu o energii $<10^7$ J)

Fig. 10. Collective map of positive temporal gravimetric anomalies and focal points of seismic tremors registered in 2011 in the studied area (1 – border of active mining area, 2 – positive temporal anomaly of the absolute value of the vertical component of gravity force $g_t > 0,2$ mGal, 3 – positive temporal anomaly of the value of vertical component of gravity force in Bouguer reduction δg_{Br} , 4 – epicenter of tremor of energy $>10^7$ J, 5 – epicenter of tremor of energy $<10^7$ J)

naturalnych stają się rejon, w których wartości siły ciężkości wzrastają. W rejonach takich powodowane eksploatacją odkształcenia rozkładają się nieregularnie w nadległych jej partiach górotworu. Powoduje to zróżnicowanie gęstości objętościowej górotworu w układzie przestrzennym. Położenie takich rejonów w monitorowanym obszarze uwidoczniło na rys. 10. Ponieważ wartości absolutne składowej siły ciężkości wzrosły w okresie badań na większości powierzchni obszaru, na mapie wyróżniono jedynie centra rejonów, w których wartości te przyrosły o więcej niż 0,2 mGale (oznaczone na rys.10 symbolami od g1 do g5). W rejonach tych nastąpił relatywnie największy przyrost wartości naprężeń w górotworze (przy maksymalnym w centralnej części obszaru górniczego kopalni „Staszic”, gdzie wartość składowej pionowej siły ciężkości wzrosła o 4,5 mGala). Drugim elementem wyróżnionym na mapie są rejon wzrostów wartości składowej pionowej siły ciężkości w redukcji Bouguera (oznaczone na rys. 10 symbolami dg).

Rejon anomalnych wzrostów siły ciężkości g i dg pokrywają się częściowo jedynie w północnej części obszaru górniczego kopalni „Murcki” i w obszarze zlikwidowanej kopalni „Grodziec”. Na zbiorczej mapie dodatnich anomalii grawimetrycznych uwidoczniło również położenie epicentrow wstrząsów sejsmicznych, które zarejestrowano w 2011 roku w obszarze badań, w rozdzielaniu na wstrząsy słabe ($<10^7$ J) i silne ($>10^7$ J) energetycznie. Lokalizacja ognisk wstrząsów słabych nie wykazuje związku z polami czasowych zmian siły ciężkości. Natomiast wstrząsy silne wystąpiły jedynie w obszarach, w których zarejestrowano przyrost wartości absolutnych składowej pionowej siły ciężkości (rys. 7). Ich epicentra zlokalizowane są w strefie o kierunku SW-NE. Rozciągłość strefy zbliżona jest do przebiegu zachodniej granicy niecki Bytomskiej i siodła Głównego oraz powielającej ten kierunek strefy zaburzenia Orłowskiego. Oś symetrii strefy pokrywa się z linią łączącą trzy centra dodatnich anomalii widoczne na mapie zmian różnicowych g z lat 2002-2003 (rys. 8). Biegnie ona od granicy pomiędzy kopalniami „Nurów-Szczygłowice”, poprzez tereny czynnych kopalń „Makoszowy”, „Bielszowice”, „Pokój” w obszar zlikwidowanej kopalni „Rozbark” i dalej na teren kopalni „Bobrek-Centrum”. W obrazie mapy z 2011 wymienione dodatnie anomalie siły ciężkości już się nie widaczniają. Można to przypisać efektowi wystąpienia silnych energetycznie wstrząsów sejsmicznych, po których zmienił się rozkład masy w górotworze budującym strefę.

Tylko dwa z wyróżnionych na mapie różnicowej z roku 2011 rejonów anomalnych położone są na terenach zlikwidowanych kopalń (dg6 i g5 – kopalnie „Wojkowice”, „Grodziec” i „Paryż”). Genezę zmian pola siły ciężkości w tych rejonach należy wiązać ze zmianami zawodnienia górotworu. W obszarze zlikwidowanych kopalń „Wojkowice”, „Grodziec” i „Paryż” następuje proces odtworzenia się naturalnego zwierciadła wód podziemnych spowodowany wyłączeniem systemów drenażu górniczego. Powoduje to przyrost gęstości objętościowej górotworu na dużym obszarze. Przy analizie związku czasowych zmian pola siły ciężkości z zawodnieniem górotworu należy zwrócić uwagę, że proces odwrotny, jakim jest wznowienie drenażu, powoduje odwrócenie znaku anomalii grawimetrycznej (z dodatniej na ujemną). Proces taki zachodzi na dawnym obszarze górniczym kopalni „Pstrowski”. W części tego obszaru powstał nowy zakład górniczy o nazwie SILTECH, który wznowił proces odwadniania górotworu oraz eksploatację złoża węgla kamiennego. W rejonie tym w okresie pomiędzy latami 2002 i 2011 nastąpiło znaczne obniżenie wartości siły ciężkości zarówno w zbiorze danych g , jak i dg (rys.7 i rys.9). Obniżenie to jest spowodowane sumarycznym wynikiem odkształceń powierzchni oraz odwadniania górotworu.

7. Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wynika, że regionalne pole grawitacji na terenie objętym monitoringiem grawimetrycznym ulega zmianom w czasie, zarówno w obszarach, czynnych, jak i zlikwidowanych kopalń oraz w obszarach, gdzie nie było eksploatacji górniczej. Zmianom ulega zarówno kształt pola, jak i jego natężenie. Czasowe anomalie pola przyjmują znaki dodatnie i ujemne. Największe pod względem natężenia zmiany następują na terenach czynnych kopalń. Oscylacje obserwowane na terenach zlikwidowanych kopalń są relatywnie mniejsze, ale znacznie przekraczające wartość błędu ich określenia. Obserwowane zmiany pola siły ciężkości niezależnie czy są rozpatrywane w zbiorze danych natężenia siły ciężkości g (absolutna wartość przyspieszenia ziemskiego) czy też natężenia pola siły ciężkości w redukcji Bouguera dg (wartość przyspieszenia ziemskiego zredukowana do poziomu geoidy) wskazują, że w przypowierzchniowych warstwach geologicznych zachodzą przeobrażenia masy (objętościowe i postaciowe), które powodują zmiany ukształtowanego procesami geologicznymi rozkładu naprężeń w górotworze w skali regionalnej. W szczególności widać to na terenie zlikwidowanej i zatapianej obecnie kopalni „Grodziec”, gdzie w analizowanym okresie czasu nastąpiło odwrócenie znaku silnej anomalii pola siły ciężkości (z „-” na „+”). Zmiany g przekładają się wprost na wartość sił działających w ośrodku geologicznym i tym samym wpływają na zróżnicowanie naprężeń pionowych w rejonach eksploatacji podziemnej. Ma to niewątpliwie wpływ na poziom zagrożeń naturalnych w kopalniach podziemnych (w szczególności wstrząsy i inne zdarzenia dynamiczne) oraz zjawiska obserwowane na powierzchni terenów górniczych (deformacje).

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że monitoring grawimetryczny może być skuteczną metodą śledzenia procesów zachodzących na terenach górniczych i pogórniczych w skali regionalnej. Procesy te często są niezauważalne w skali obszaru pojedynczej kopalni. Dane z monitoringu grawimetrycznego pozwalają na ocenę interakcji wpływów pojedynczych kopalń oraz długoterminowych skutków eksploatacji podziemnej na środowisko regionu, a w szczególności identyfikację rejonów o potencjalnym zagrożeniu zjawiskami geodynamicznymi.

Niniejsza publikacja została wykonana w ramach prac własnych Głównego Instytutu Górniczego w Katowicach ze środków finansowych przyznanych na działalność statutową.

Literatura

1. Fajkiewicz Z.: Grawimetria górnicza. Wyd. „Śląsk”, Katowice 1980.
2. Fajkiewicz Z., Szuster J., Graca K., Radomiński J.: Prognozowanie grawimetryczne możliwości powstawania w wyniku ekspansji pustek, deformacji nieciąglych powierzchni terenu pod szlakiem kolejowym w obszarze górniczym KWK Mysłowice. „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górniczym” 1997, 9,37(9-14).
3. Fajkiewicz Z.: Grawimetria stosowana. Wydawnictwa AGH. Kraków 2007.
4. Goszcz A.: Wpływ naprężeń tektonicznych na niektóre własności skał i warunki górnicze w północno-wschodniej części Górnosląskiego Zagłębia Węglowego (GZW). „Zeszyty Naukowe AGH” 1980, nr 27.
5. Kotyrbła A., Balicki A., Kortas Ł.: Zmiany regionalnego pola grawitacji w północnej części Górnosląskiego Zagłębia Węglowego w latach 2002-2003. „Przegląd Geologiczny” 2005, t. 53, nr 4.
6. Kowalczyk K.: Cały kraj się obsuwa. „Geodeta. Magazyn Geo-

- informatyczny” 2006, nr 8 (135).
7. *Lyness D.*: The gravimetric detection of mining subsidence. *Geophysical Prospecting*, 33, 1985 s.567-576
 8. *Marcak H.*: Geomechaniczna interpretacja struktury danych geofizycznych, w szczególności sejsmologicznych, gromadzonych dla potrzeb oceny hazardu sejsmicznego. „Przegląd Górniczy” 2010, nr 6 (1051).
 9. *Marks L., Ber A., Gogolek W.* (red). Mapa geologiczna Polski w skali 1:500000. PIG. Warszawa 2005.
 10. *Szczerbowski Z.*: Deformacje powierzchni a zmiany siły ciężkości-relacje w warunkach eksploatowanego górotworu. Biblioteka Eksploatacji Podziemnej. IGSMiE PAN, Kraków 2003.
 11. *Stec K.*: Baza danych o wstrząsach górniczych Górnośląskiej Regionalnej Stacji Sejsmologicznej GIG. Katowice 2012 (niepublikowana).
 12. *Wyrzykowski T.*: Mapa prędkości współczesnych pionowych ruchów skorupy ziemskiej na obszarze Polski. Skala 1:2 500 000. Instytut Geodezji i Kartografii. Warszawa 1985.

Szanowni Czytelnicy!
Przypominamy o wznowieniu
prenumeraty „Przeglądu Górniczego”

Informujemy też, że od 2009 roku w grudniowym zeszycie P.G. zamieszczamy listę naszych prenumeratorów.