



Analiza modelowa efektów mikrograwimetrycznych zarejestrowanych nad zlikwidowanymi szymbami górnicyymi

Model analysis of microgravimetric effects registered at the closed mine shaft

Dr inż. Łukasz Kortas*)

Treść: Artykuł jest kontynuacją i rozwinięciem badań autora prowadzonych w latach 2008-2012. Publikacja zawiera interpretację anomalii grawimetrycznych w rejonie zlikwidowanych szymbów górnicyymi z wykorzystaniem modelowania i analizy odwrotnej. Do przeprowadzenia badań wybrano zlikwidowany szymb „Wschodni” i „Władysław”. Analiza zarejestrowanych pomiarami anomalii polegała na przeprowadzeniu badań modelowych w sposób zmierzający do znalezienia jak najlepszych dopasowań wymodelowanego efektu grawitacyjnego do wyników pomiarów. Dopasowanie dla szymbu „Wschodniego” okazało się mniej zadowalające, głównie z uwagi na nietrafny wybór poligonu pomiarowego. Wyniki modelowania dla szymbu „Władysław” były bliskie danym z pomiarów. Wskazuje to na przydatność przedstawionej w artykule metody dla interpretacji danych grawimetrycznych. W końcowej części pracy podaje się wynikające z niej zalecenia praktyczne przy poszukiwaniu pustki poszybowej metodą grawimetryczną.

Abstract: This paper is a continuation and development of the author's tests conducted in 2008-2012 (Kortas, 2008, 2012). It includes an interpretation of gravimetric anomalies in the area of the closed mine shafts with modeling and reverse analysis. The closed "Wschodni" shaft and "Władysław" shaft were used in the research. The analysis of the registered anomalies used model research in order to find the best possible matches of the modeled gravity effect to the measurements' results. Matching in case of "Wschodni" shaft was less satisfactory, mainly because of the incorrect selection of traverse. The results of modeling in the case of "Władysław" shaft were close to the measuring data. It indicates the usability of the presented method in the interpretation of gravimetric data. The last part of this paper presents the resulting recommendations during exploration of the post-shaft void by use of gravimetric method.

Słowa kluczowe:

szymb, grawimetria, pomiary, modelowanie grawimetryczne

Key words:

shafts, gravimetry, measurements, gravimetric modeling

1. Wprowadzenie

Metoda grawimetryczna z uwagi na wysoką czułość na kontrast gęstościowy w górotworze jest jedną z najskuteczniejszych metod geofizycznych wykrywania pustek pogórnicyymi. Wyniki prowadzonych przez różne zespoły badań są omawiane i cytowane w licznych publikacjach i podręcznikach akademickich [3, 4, 5, 6, 2, 7]. Rezultaty niektórych badań grawimetrycznych i mikrograwimetrycznych prowadzonych w Laboratorium Geofizyki Inżynierskiej GIG, w tym badań autora, przedstawione zostały w specjalistycznych periodykach naukowych [1, 10, 8, 9].

Praktyczne zastosowania metody grawimetrycznej do lokalizacji płytko zalegających pustek pogórnicyymi były przedmiotem prac przeprowadzonych w latach 2001 – 2013 przez Laboratorium Geofizyki Inżynierskiej GIG. Obejmuje to w szczególności określenie zmian regionalnego pola grawitacji w obszarze GZW pod wpływem podziemnej eksploatacji

złóż, warunków bezpieczeństwa w rejonie projektowanej autostrady A1, określenie możliwości wystąpienia nieciągłych deformacji powierzchni oraz efektywności podsadzania pustek i górotworu dla oceny przydatności terenów do zabudowy. Innym wykorzystaniem tej metody była identyfikacja dawnych wyrobisk kopalni węgla brunatnego w Gostycynie na Kujawach [10].

Metoda mikrograwimetryczna daje szczególnie dobre wyniki przy lokalizowaniu pod powierzchnią terenu obiektów pogórnicyymi niewypełnionych medium podsadzkowym i znajdujących się na niewielkich (do 50 m) głębokościach, takich jak: chodniki, sztolnie, upadowe, komory itp. Na rewitalizowanych terenach pogórnicyymi szczególnie istotna staje się poprawna lokalizacja i rozpoznanie stanu zlikwidowanych szymbów, szybków, nadsiewłomów i innych wyrobisk pionowych, które miały połączenie z powierzchnią. Lokalizacja starych, na ogół płytko położonych wyrobisk stwarza problemy w ich poprawnym usytuowaniu na współczesnych mapach i w konsekwencji w ich odszukaniu w terenie. Stare wyrobiska i zroby są nie zawsze nanoszone na współczesne mapy, sporządzane często w innych układach współrzędnych. Dlatego

*) Główny Instytut Górnictwa, Katowice

ustalenie położenia szybów na tej drodze nie jest wiarygodne i wymaga niezależnego sprawdzenia.

Z uwagi na fakt współzależności wielu czynników w zmierzonym efekcie grawitacyjnym, interpretacja wyników pomiarów grawimetrycznych wykonanych na terenach o nieznanym dokładnej lokalizacji wyrobisk pionowych jest na ogół trudna i pozwala zwykle jedynie na przybliżone określenie miejsca występowania, rzadziej - stanu wyrobiska. Wyniki pomiarów w takich warunkach są w pewnym stopniu zadowalające tylko dla jakościowego powiązania zagrożeń powierzchni, wywołanych obecnością ewentualnej pustki w szybie z zamierzeniem dalszego użytkowania terenu. Jednakże, jak pokazują rezultaty poprzednich prac autora [8, 9], możliwe jest uzyskanie pewnego uściślenia lokalizacji obiektu wywołującego anomalie poprzez powiązanie efektu grawimetrycznego z parametrami geometrycznymi i fizycznym, obiektu zaburzającego i jego otoczenia. Nie znając parametrów ciała zaburzającego, uzyskać to można w trybie analizy odwrotnej z wykorzystaniem modelowania.

W poprzednich pracach autor [9] podał założenia teoretyczne takiej metody postępowania. Ustalone zostały również pewne zależności funkcyjne pomiędzy mierzonym na powierzchni efektem grawitacyjnym a parametrami ciała zaburzającego. Celem bieżących badań prowadzonych przez autora jest weryfikacja możliwości prowadzenia owej analizy odwrotnej w toku badań modelowych, poprzez porównanie krzywych zmian anomalii grawimetrycznych z wynikami pomiarów w terenie. W tej pracy uwagę skupiono na zastosowaniu tej metody do identyfikacji położenia i szybów górniczych. Podjęte zadanie skierowane było na określenie metody postępowania przy mikrogravimetrycznej lokalizacji szybów, a nie rozwiązanie techniczne pracy poszukiwawczej i dostarczenie parametrów konkretnego wyrobiska.

Ze względu na dostępne w GIG dokumentacje, do realizacji celu pracy wybrano teren szybu „Wschodni” ZGH Orzeł Biały w Bytomiu, a także wokół szybu „Władysław” zlikwidowanej KWK „Jadwiga” w Zabrze. Obserwacje mikrogravimetryczne na wymienionych poligonach wykonane zostały przez autora za pomocą grawimetru CG-5 Autograv produkcji kanadyjskiej firmy Scintrex, będącego na wyposażeniu Laboratorium Geofizyki Inżynierskiej GIG.

Obliczenia modelowe przeprowadzono metodą numeryczną wykorzystującą twierdzenie Gaussa-Ostrogradzkiego o strumieniu pola wektorowego, która jest szczegółowo opisana w pracy [9]. W prezentowanych przykładach wykorzystano program komputerowy ModGrav o specjalnie dostosowanym algorytmie obliczeń do modelowania szybów wg opisanej metody.

2. Metodyka prowadzenia badań

2.1. Sposób wykonania pomiarów

Grawimetr CG-5 Autograv to zautomatyzowany instrument, oparty na mikroprocesorze. Odczyty w przyrządzie w sposób ciągły uzyskuje się z uśrednienia serii pomiarów w jednosekundowych próbkach. Wyniki, bezpośrednio w jednostkach mGal, prezentowane są na wyświetlaczu ciekłokrystalicznym. Dane pomiarowe zapisywane są w pamięci stałej przyrządu. W celu dalszego przetwarzania przesyłane są na komputer PC. Instrument ten charakteryzuje się bardzo małym, a zarazem liniowym dryfem. Zainstalowane w grawimetrze CG-5 oprogramowanie umożliwia wyliczenie i uwzględnienie w trakcie wykonywania odczytów poprawki na pływy ziemskie (luni-solarnej). Przyrząd ten umożliwia

pomiary z dokładnością i powtarzalnością wyników do $\pm 0,001$ mGal.

Pomiary na poszczególnych stanowiskach przeprowadzono metodą punktów pośrednich. Obserwacje przebiegały wg schematu: 100,1,2,3,...,n, 100 gdzie: 100 - punkt bazowy a 1,2,3,...,n - punkty rozproszone. W oparciu o punkt bazowy na stanowiskach szczegółowych wykonano obserwacje wypełniające. Dowiązania ciągów pozwoliły wyeliminować krótkookresowe dryfty zera instrumentu. Średnio i długookresowe zmiany miejsca zera grawimetru, spowodowane głównie składową pionową siłą lunisolarnych, eliminowane były w czasie pomiarów. Zainstalowane w grawimetrze CG-5 oprogramowanie umożliwiało wyliczenie, zgodnie z algorytmem Longmana, i uwzględnienie w trakcie wykonywania odczytów poprawek na pływy ziemskie. Poprawki te mogą osiągać wartość $\pm 0,04$ mGal/h, a w ciągu dnia mogą zmieniać się nawet o $\pm 0,3$ mGal.

Zgodnie z przyjętą metodyką pomiary na jednym punkcie wykonywano do momentu powtórzenia się identycznego odczytu z dokładnością do 0,005 mGal. Takie postępowanie zapewnia wysoką jakość i dokładność wykonania pomiarów mikrogravimetrycznych. Po zarejestrowaniu danych w terenie i zgraniu ich na komputer stacjonarny dokonano wyłonienia właściwych wartości z pomiarów po jednej dla każdego z punktów. Odrzucono pomiary błędne i słabszej jakości, kierując się głównie odchyleniem standardowym pojedynczego pomiaru uśrednionego z serii około 22 sekundowych odczytów. Ten etap pracy dotyczący pomiarów w grawimetrii jest najbardziej żmudną częścią zadania i równocześnie wymagającym dużego zaangażowania interpretatora. Proces ten bardzo trudno zautomatyzować z uwagi na wartość czynników branych pod uwagę w trakcie akceptacji lub odrzucenia wyniku.

W wykonanych badaniach nie było konieczności wykonania pomiarów potrzebnych do obliczenia poprawek topograficznych siły ciężkości ze względu na generalnie płaską powierzchnię badanego terenu. W celu zredukowania mierzonych wartości do poziomu fizycznego Ziemi w trakcie prac dokonywano pomiaru wysokości statywu, na którym ustawiany był przyrząd pomiarowy.

W celu określenia dokładności pomiarów na 10% punktów pomiarowych stanowiskach obserwacje grawimetryczne wykonano dwukrotnie. Na podstawie wartości uzyskanych z pomiarów powtórzonych obliczony został średni błąd pojedynczego pomiaru, który wyniósł $\pm 0,004$ mGal na obu poligonach badań. Stosunkowo niska wartość błędu wskazuje na wysoką precyzję zastosowanego instrumentu i potwierdza bardzo wysoką dokładność przeprowadzonych pomiarów.

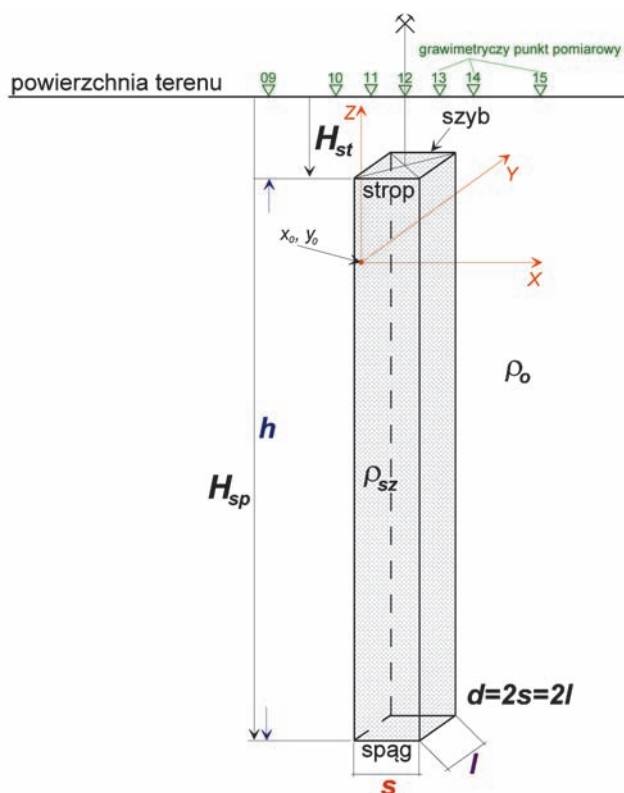
W ramach prac obliczeniowych wyliczone zostały względne wartości siły ciężkości dla wszystkich wypełniających punktów pomiarowych. Obliczenia wykonano w oparciu o przyjętą w punkcie podstawowym (bazowym) lokalną wartość siły ciężkości. Następnie do otrzymanych danych terenowych zaaplikowano odpowiednie poprawki i obliczono wartości anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera.

Należy dodać, że uzyskiwane przez wielu badaczy rozkłady siły ciężkości nad poszukiwanymi szybami lub w ich sąsiedztwie chociaż są rozkładami typowymi, to wyłonienie użytecznych anomalii nie jest wcale oczywiste. Ich cechą charakterystyczną jest występowanie wielkoobszarowych zaburzeń, również od ciał o wyższej gęstości niż otoczenie. Dodatkowo uzyskany rozkład anomalii grawimetrycznych ujawnia swe maksima w przedziale wartości bliskim zakresowi błędów pomiarowych, na które metoda jest wyjątkowo czuła. Obrazuje to złożoność i trudność interpretacji wyników badań mikrogravimetrycznych, a przede wszystkim jej jednoznaczność.

2.2. Metoda analizy wyników

Na potrzeby tej pracy odpowiednio przetworzono program *ModGrav*, wykorzystany uprzednio (2008-2012) do obliczania efektu grawitacyjnego generowanego przez model pustki o zmiennych cechach fizycznych i geometrycznych. Zasadnicze formuły i przetworzenia algorytmu programu przedstawiono w [9]. Przygotowanie zadań do serii modeli obejmowało wprowadzenie danych wejściowych, określenie geometrii prostopadłościennego wyrobiska szybowego, jego położenia i uproszczonych warunków fizycznych w modelu szybu i jego otoczeniu. Parametry i zmienne wykorzystane w modelowaniu przedstawiono na rys. 1. W tej pracy szyb odwzorowywano prostopadłościannem, o bokach s , l , h . Zdefiniowanie innych parametrów, jak np. wymiary siatki obliczeniowej i in., wykonanie obliczeń i zapis serii wyników był analogiczny jak w pracy [9]. Wynikiem obliczeń programu *ModGrav* są następujące deskryptory anomalii grawitacyjnej: rozkład anomalii $A(x,y)$ oraz największa wartość efektu grawitacyjnego A_{ext} (w mGal).

W ramach zadań przygotowawczych w warunkach odpowiednich do dalszych analiz potwierdzono, że istotne znaczenie dla rozkładów $A(x,y)$ oraz A_{ext} ma głębokość spągu szybu, ale otrzymana zależność A_{ext} od H_{sp} ma charakter krzywej z asymptotą, bo głębokości większe od około 50 m nieznacznie wpływają na zmianę wartości anomalii. Istotniejszy wpływ ma położenie stropu H_{st} szybu. Wpływ średnicy d szybu na wartość anomalii rośnie z wymiarem średnicy i jest funkcją potęgową. Jest też liniowo wprost proporcjonalny do różnicy gęstości $\Delta\rho$ wypełnienia szybu i jego otoczenia. Wpływ murowanej czy betonowej obudowy szybowej ma charakter anomalii o znaku dodatnim, a wynik oddziaływania wypełnionego szybu z obudową jest superpozycją wpływów tych dwóch ośrodków.



Rys. 1. Parametry i zmienne wykorzystywane w modelowaniu programem *ModGrav*

Fig. 1. Parameters and variables used in modeling in the *Mod-Grav* program

3. Wyniki pomiarów grawimetrycznych

W tym rozdziale dla wybranych dwóch poligonów szybu „Wschodniego” i szybu „Władysław” przedstawiono odrębnie: opis dostępnych danych o badanych szybach, ich warunki geologiczno-górnice oraz sposób przeprowadzenia pomiarów grawimetrycznych. Po przetworzeniu danych terenowych przez wprowadzenie poprawek i redukcji przedstawiono także analizę map anomalii grawimetrycznych w redukcji Bouguera.

3.1. Szyb „Wschodni”

Jako poligon główny do badań wybrano „Szyb Wschodni” (w przeszłości ‘Gerhard’) o niepotwierdzonym położeniu, należący w przeszłości do ZGH „Orzeł Biały” (obecnie ZG „Piekary”). Szyb ten zlokalizowany jest ok. 1,5 km na północny wschód od centrum miasta Bytomia i ok. 2 km na południe od centrum Piekar Śląskich, w obrębie ogródków działkowych przy ul. Kamińskiej po wschodniej stronie DK 911.

Szyb leży na terenach dawnej eksploatacji rud cynku i ołowiu oraz żelaza (żelaziak brunatny), położonych na północ od miasta Chorzów. Eksploatację wspomnianych surowców prowadzono tam w okresie od połowy XIX do końca XX wieku w ławie górnej i dolnej na głębokościach około 55-80 i 70-90 m. Szyb leży w granicach czynnego obszaru górniczego „Rozbark III” i „Piekary Śl. II”, gdzie obecnie eksploatację prowadzi ZG „Piekary”, należący do Kompanii Węglowej S.A.

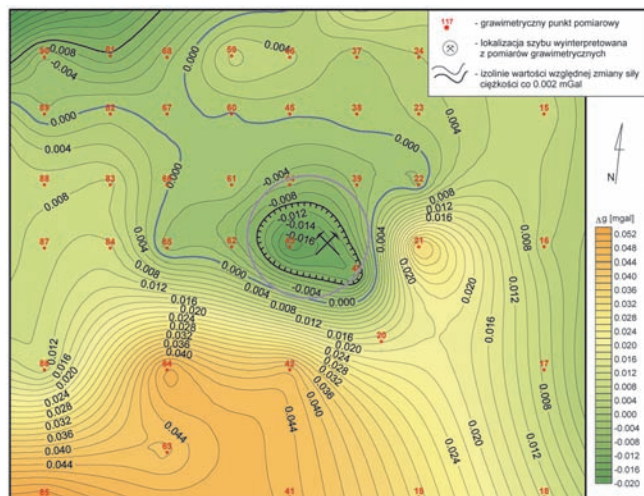
Porównanie różnych map obszaru poligonu badań obrazujących zasięg robót górniczych (rejony eksploatacji, chodniki eksploatacyjne, transportowe i wentylacyjne) w złożu rudnym wskazuje, że obszar eksploatacji jest dobrze udokumentowany. Położenie tych samych wyrobisk na różnych mapach pokrywa się z niewielkim błędem rzędu 5 m. Zdecydowanie gorzej jest z udokumentowaniem wyrobisk pionowych (szyby, szybiki). Szyb „Wschodni” uwidocznił się na wszystkich mapach górnictwa rudnego prowadzonego do 1910 roku. Jego zasięg to w przybliżeniu ława górna. Na starszych mapach nosi on nazwę „Gerhard”. Na jednej z archiwalnych map zamieszczono przy nim napis „zlikwidowany”. Brak jednak danych odnośnie sposobu likwidacji i roku jej wykonania. Na kolejnej mapie pochodzącej z ZGH „Orzeł Biały” przy szybie widnieje opis: „Szyb Wschodni gł. 107,6 m zasypany w 09.1983 decyzją OUG w Sosnowcu”. Na innej mapie pojawia się dodatkowo notatka: „Szyb zasypany na długości 25,8 m od dna rzupia”. Zapisy te zawierają fragmentaryczną, ale niemal jedyną informację o parametrach szybu.

W końcu kwietnia 2012 r. na ww. poligonie wykonano prace przygotowawcze i pomiary geodezyjne, a w maju pomiary grawimetryczne. Pomiary wykonywano bezpośrednio nad szybem i w jego bliskim sąsiedztwie. Punkty pomiarowe wyznaczono w regularnej szczegółowej siatce 5x5 m, z zagęszczeniem do 2.5x2.5 m w najbliższej okolicy spodziewanego usytuowania szybu. Zaprojektowana siatka pomiarowa obejmowała łącznie 137 punktów ponumerowanych od 1 – 137 oraz punkt bazowy 100.

Po wykonaniu pomiarów terenowych i wstępnym przetworzeniu otrzymanych danych zaaplikowano odpowiednie poprawki do danych pomiarowych. W efekcie otrzymano względne wartości siły ciężkości w tzw. redukcji Bouguera. Do przedstawiania tutaj wybrano fragment otrzymanej mapy anomalii w redukcji Bouguera będący wycinkiem całej mapy z jej centralno-południowej części (rys. 2).

W obrazie anomalii w redukcji Bouguera uzyskanym na poligonie badawczym dominuje anomalia ujemna zlokalizowana wokół punktu 43, nieco na południe od środka siatki pomiarowej. Inne mniejsze anomalie na mapie o amplitudzie nieprzekraczającej +/- 0,020 mGal wywołane są

przypuszczalnie zmianami gęstości utworów w najbardziej przy powierzchni warstwie. Przyczynami tego mogą być dzikie wysypiska śmieci w rejonie ogródków działkowych, składowiska odpadów, skały pływnej, licznych skarp oraz przeprowadzona częściowo na przedmiotowej działce rekultywacja terenu pogórniczego. Dodatnie anomalie w południowej części terenu związane są z obecnością w tym miejscu skarpy, a izolinie zmian siły ciężkości naśladują tu rzeźbę terenu.



Rys. 2. Mapa anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera – szyb „Wschodni”

Fig. 2. Map of anomalies of the gravity force in Bouguer reduction – “Wschodni” shaft

Obszar omawianej anomalii grawimetrycznej ma powierzchnię kilkunastu metrów kwadratowych, a średnica izolinii obniżonych wartości siły ciężkości wynosi około 5 m. Amplituda zaburzenia osiąga wartość około $-0,040$ względem otoczenia, a wartość najmniejsza w centrum anomalii przekracza $-0,020$ mGal. Zarejestrowana anomalia, dane archiwalne oraz informacje od właścicieli działek pozwalają na domniemanie, iż to zaburzenie wywołane jest obecnością w podłożu szybu „Wschodni”. W tym rejonie ława występuje na głębokości 74,0 m, natomiast ława dolna na głębokości 87,0 m.

Maksymalna (niewielka) wartość anomalii oraz informacje z map górniczych (notatka: „Szyb Wschodni gł. 107,6 m zasypany w 09.1983 decyzją OUG w Sosnowcu”) wskazują na to, że szyb „Wschodni” został w dużej części zlikwidowany i nie stanowi zagrożenia dla powierzchni. Zarejestrowana anomalia świadczy najprawdopodobniej o częściowym rozluźnieniu materiału wypełniającego szyb (spadek gęstości) na stosunkowo niewielkiej głębokości (do 20 m). Zasypany szyb działa tu jako swojego rodzaju dren, więc dodatkowym czynnikiem powodującym w sąsiedztwie rozluźnienie jest migrująca w jego stronę woda.

Otrzymane wyniki spełniają jedynie częściowe założenia postawione w pracy odnośnie poligonu badawczego. Stwierdzono obecność rozluźnienia warstw budujących podłoże w odległości ok. 11 m od spodziewanej lokalizacji szybu. Biorąc pod uwagę niedokładność map i danych archiwalnych w odniesieniu do inwentaryzacji wyrobisk pionowych błąd wyznaczenia położenia szybu metodą mikrogravimetryczną można uznać za niewielki. Niestety, zarówno otoczenie, jaki i nieregularność i niewielka wartość amplitudy zaburzenia, jakie szyb wywołuje, będą znacznie utrudniały proces dopasowania odpowiednich parametrów ciała zaburzającego do otrzymanego rozkładu anomalii rzeczywistych na drodze modelowania.

3.2. Szyb „Władysław”

Z archiwalnych materiałów wynika, że szyb został wykonany w 1871 roku przez Augusta Borsiga - właściciela kopalni Hedwigswunsch (Jadwiga). Początkowo szyb miał obudowę drewnianą i zmienny przekrój w profilu głębokościowym. W okresie późniejszym najprawdopodobniej obudowa szybu została wzmocniona. Rura szybowa przecina strefę uskoko- wą i z tego powodu charakteryzowała ją duże zawodnienie. Ostatecznie szyb uzyskał średnicę 5 metrów i został zgłębniony do poziomu 618,86 m. Pełnił funkcję wdechową.

Przed likwidacją szybu całkowity dopływ naturalny wody wynosił 1110 l/min. W zdecydowanej części pochodził on ze starych wyrobisk poziomych udostępniających pokłady węgla 501, 503, 505 i 510. Dopływu wód zza obudowy szacowano na 23 l/m. Pochodziły one głównie z odcinka, w którym rura szybowa przechodzi przez utwory czwartorzędowe. W bezpośrednim otoczeniu szybu eksploatacji węgla nie prowadzono.

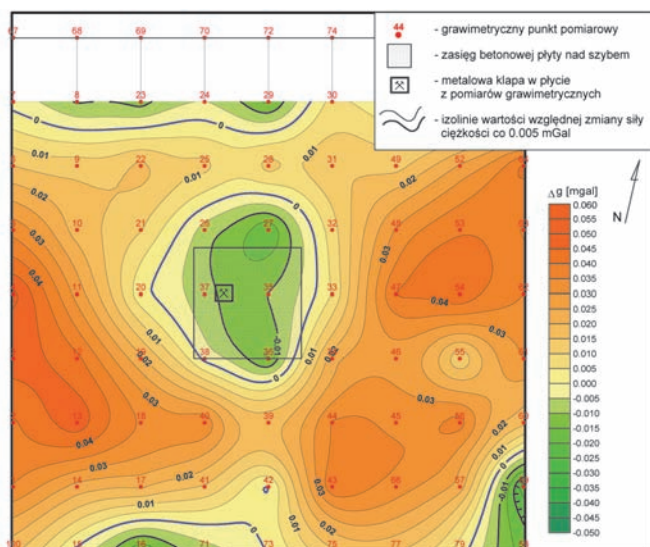
W przekroju geologicznym rury szybowej zalegają grunty nasypowe oraz utwory czwartorzędowe, triasu i karbonu. Miąższość nasypów wynosi 5 m. Poniżej występuje seria piaszczystych utworów czwartorzędowych z 2-metrowej grubości wkładką glin w spągu. Miąższość utworów czwartorzędowych to ok. 50 m. Pod nimi do głębokości 74,5 m zalegają utwory triasu wykształcone w postaci piaskowców z wkładkami ilów. Głębiej w przekroju szybu zalega seria utworów karbonu, należąca pod względem stratygraficznym do warstw siódolowych. W jest stropie stwierdzono obecność warstwy łupków ilastych o grubości ok. 10 m. Głębiej w przekroju dominują piaskowce. Najpłycej zalegającym pokładem węgla w rejonie szybu jest pokład 501, którego spąg stwierdzono na głębokości ok. 110 metrów.

W dokumentacji techniczno-ekonomicznej powiązań wodnych w szybie „Władysław” i na powierzchni pola „Biskupice” (PPHU Posta, Zabrze, grudzień 1995) przedstawiono koncepcję likwidacji szybu przez zasypanie go materiałem inertnym (kamień popłuczkowy – piaskowiec lub tłuczeń o średnicy 40-80 mm) z pozyskaniem dopływającej wody przez zastosowanie pompy z napływem na poziomie 380 przy szybie „Staszic” i pompowaniem szymbem „Staszic” do Zakładu Przerobczego (tzw. wariant 5). Koncepcja ta uzyskała korzystną opinię Zespołu ds. zagrożeń wodnych KWK „Pstrowski” w dniu 30 listopada 1995 roku (protokół nr 11a/95), co pozwala założyć, iż została ona zrealizowana. Szyb nadal więc pełni funkcję drenażową dla wód podziemnych.

W rejonie szybu punkty pomiarowe wyznaczone zostały w regularnej szczegółowej siatce pomiarowej 5x5 m, z zachowaniem stałego kroku pomiarowego wynoszącego 5 m. Zaprojektowana siatka pomiarowa obejmowała łącznie 81 punktów ponumerowanych od 1 do 80 oraz punkt bazowy - 100.

Wynikiem wykonanych pomiarów oraz prac obliczeniowych jest mapa anomalii grawimetrycznych w redukcji Bouguera przedstawiona na rys. 3. Obrazuje ona rozkład pola siły ciężkości w obszarze objętym pomiarami.

W przedstawionym odwzorowaniu wartości siły ciężkości zmieniają się od $-0,05$ do $0,05$ mGala. Rejon szybu zaznacza się jako obszar, w którym wartości siły ciężkości są obniżone. Obszar ten ma kształt zbliżony do elipsy, której dłuższa oś rozciąga się na kierunku północ-południe. Osie elipsy mają długości 8 i 10 m. W centrum anomalii wartość siły ciężkości jest obniżona o ok. $0,03 - 0,06$ mGala względem otoczenia. Efekt ten należy wiązać z obecnością szybu oraz ponad 200-letnim drenażem wód poziomu czwartorzędowego. Najprawdopodobniej w jego wyniku nastąpiło lokalne wymycie drobniejszych frakcji z warstw piaszczystych w rejonie



Rys. 3. Mapa anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera – szyb „Władysław”
 Fig. 3. Map of anomalies of the gravity force in Bouguer reduction – “Władysław” shaft

rury szybowej. Powoduje to, że w określonej pomiarach grawimetrycznymi strefie, przypowierzchniowe partie grun-
 tów czwartorzędowych charakteryzują się mniejszą gęstością
 objętościową aniżeli grunty zalegające w dalszej odległości
 od szybu. Rozkład pola siły ciężkości nie wskazuje wprost
 na możliwość istnienia płytko zalegających pustek, które
 stwarzałyby zagrożenie powierzchni terenu przyszybowego
 deformacjami.

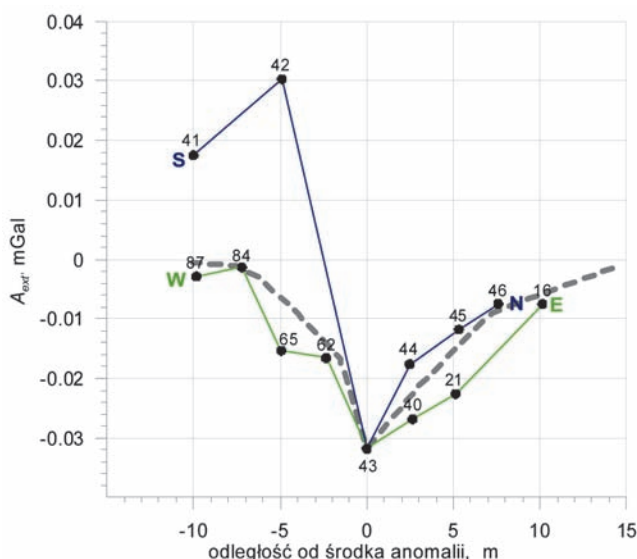
4. Interpretacja anomalii grawimetrycznych w rejonie zlikwidowanych szybów poprzez modelowanie z zastosowaniem analizy odwrotnej

4.1. Szyb „Wschodni”

Wyniki pomiarów grawimetrycznych, oprócz powierzchni-
 niowych rozkładów anomalii w redukcji Bouguera pokazanych
 na rys. 2 i 3 przedstawić można na profilach, wykorzystanych
 tu do analizy odwrotnej. Kierunki linii profilowych wynikały
 z rozmieszczenia punktów pomiarowych w przyjętym lo-
 kalnym układzie współrzędnych XY, w którym współrzędne
 w środku układu były równe 0. Środek układu pokrywał się
 z punktem pomiarowym 43, gdzie wartość anomalii była
 maksymalna. Linia X (W-E) przechodziła przez punkty 87-
 84-65-62-43-40-21-16, a linia Y (S-N) przez punkty 41-42-
 43-44-45-46.

Na rys. 4 wniesiono wartość względną siły ciężkości
 w punktach pomiarowych oznaczonych symbolem i podanym
 numerze zgodnym z nr. na mapie. Punkty połączone łamaną
 linią zieloną dla kierunku X oraz linią niebieską dla kierunku
 Y. Szarą linią przerywaną wniesiono również wstępnie oczekiwany
 rozkład anomalii uśredniony dla obu kierunków, jaki
 poszukiwano w toku modelowania.

Cykl modelowań skierowany był na dopasowanie A_{ext} nad
 środkiem szybu oraz punktu, który sytuuje się w pobliżu jego
 krawędzi, czyli nad brzegiem szybu o wartości $1/2 A_{ext}$. Przy
 doborze parametrów używanych w modelowaniu kierowano
 się wynikami z serii badań wstępnych wspomnianych w omó-
 wieniu metody modelowania. Podstawowa trudność wynikała
 z wyboru wymiarów szybu (średnica), położenia stropu i spą-



Rys. 4. Zmiany względnej wartości siły ciężkości na profi-
 lach wzdłuż osi X (zielony) i Y (niebieski) dla Szybu
 „Wschodni”
 Fig. 4. Changes of the relative value of gravity force of the pro-
 files along X (green) and Y (blue) axes for “Wschodni” shaft

gu szybu oraz doboru odpowiedniej różnicy gęstości pomiędzy
 wypełnieniem szybu a jego otoczeniem. W wyniku tych prac
 potwierdziło się, że przyjęcie spągu na głębokościach przekra-
 czających 50 m nie zmieniało praktycznie wartość anomalii
 w jej ekstremum, a przyrost wartości siły ciężkości w strefie
 brzegowej anomalii był pomijalny. Stwierdzono również,
 że istotne znaczenie na przyrost A_{ext} ma malejąca głębokość
 posadowienia stropu szybu. Uzmiennianie średnicy szybu
 znacząco wpływało na położenie punktu odpowiadającego
 $1/2 A_{ext}$. Poszerzenie wymiarów szybu pozwalało zbliżać się
 do wyniku pomiarów terenowych. Powodowało to jednak
 niezgodne z realiami technicznymi wymiary szybu. Efekt ten
 – dokumentowany pomiarami grawimetrycznymi mógł być
 wynikiem rozluźnień poza granicami szybu, co do których nie
 dysponowano żadnymi danymi. Stosunkowo łatwym elemen-
 tem modelowania było określenie wpływu różnicy gęstości,
 która jak wiadomo jest wprost proporcjonalna do wartości
 mierzonej względnej wartości siły ciężkości.

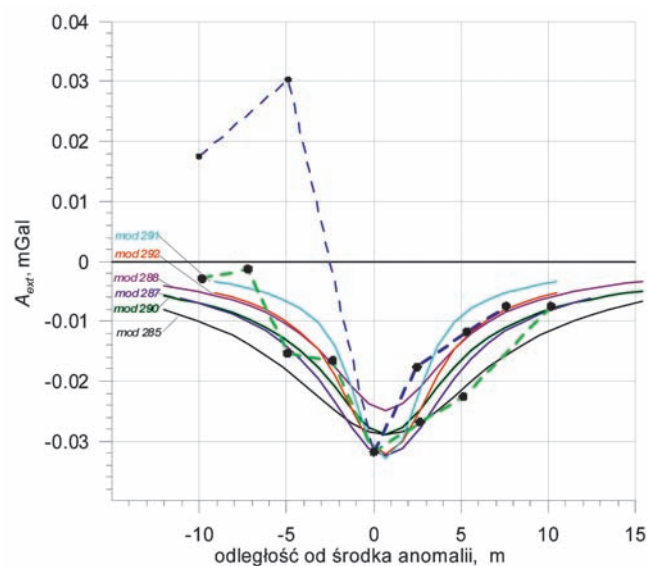
Reasumując, w modelowaniu jednak nie uzyskano wystar-
 czająco jednoznacznego dopasowania modelu do wyników
 pomiarów. Na rys. 5 przedstawiono przykładowy zestaw
 wymodelowanych krzywych. Wstępne parametry szybów
 przyjęte w tych symulacjach podane są w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry przykładowych symulacji wykonanych dla szybu „Wschodniego”

Table 1. Parameters of the exemplary simulations conducted for “Wschodni” shaft

Nr	ρ_{sz} kg·m ⁻³	ρ_o kg·m ⁻³	d, m	H _{st} , m	H _{sp} , m
292	300	2600	3,5	2	40
290	10	2600	3,7	3	100
288	10	2600	3,5	3	40
285	10	2600	5	5	40

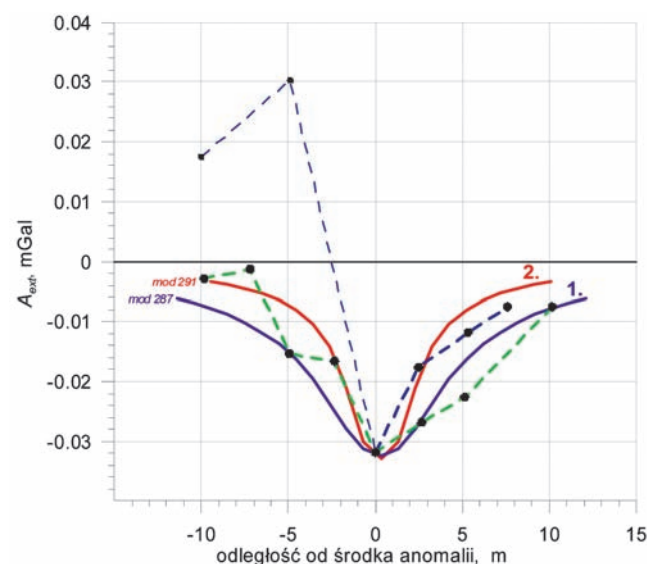
Porównanie odchyłek rozkładów modelowych A_{ext} od wy-
 ników pomiarów i parametrów modelu z możliwym stanem
 szybu i jego otoczenia doprowadziło do wyłonienia dwóch
 krzywych, które nie odchyłyły się od wartości pomierzo-
 nych o więcej niż $\pm 0,004$ mGal, a zadane parametry mogły



Rys. 5. Zestawienie przykładowych krzywych otrzymanych w toku modelowania z profilami pomiarowymi – Szyb „Wschodni”

Fig. 5. Summary of the exemplary curves obtained in the course of modeling with measuring profiles – “Wschodni” shaft

charakteryzować warunki zlikwidowanego szybu. Rozkłady te pokazano na rys. 6, a przyjęte parametry modelowe zestawiono w tabeli 2.



Rys. 6. Zestawienie najlepszych dopasowań otrzymanych w modelowaniu z profilami pomiarowymi – Szyb „Wschodni”

Fig. 6. Summary of the best matches obtained in the course of modeling with measuring profiles – “Wschodni” shaft

Wykres wynikowy (1) w prawej części nie pokrywa się z łamanymi uzyskanymi z pomiarów, co wskazuje na to, że szyb może mieć większy wymiar w kierunku łamanej dla orientacji W-E (zielony). Zwiększenie rozmiaru dotyczyć może zarówno samego szybu, jak i strefy rozluźnień w jego sąsiedztwie. Podobna sytuacja ma miejsce dla łamanej S-N (niebieski) po lewej stronie wykresu. Tu wyniki pomiarów powodują znaczne zawężenie w przebiegu łamanej.

Obecność punktów z profilu S-N po lewej stronie wykresu o wartościach znacznie wyższych niż dla tych na profilu W-E może wskazywać na oddziaływanie dodatkowych mas (np. infrastruktury podziemnej), zaburzających pole siły ciężkości w tym miejscu. Wtedy dopasowanie krzywych modelowych po tej stronie wykresu nie jest zbieżne z łamaną S-N (niebieską), ale raczej z W-E (zieloną), co znacznie utrudnia optymalny dobór krzywej modelowej.

Tablica 2. Parametry przyjęte w modelowaniu szybu „Wschodni” o najlepszym dopasowaniu

Table 2. Parameters of the best matching assumed in modeling of the “Wschodni” shaft

Nr	ρ_{sz} kg·m ⁻³	ρ_o kg·m ⁻³	d, m	H _{st} , m	H _{sp} , m
287	10	2600	4,0	3,0	40
291	1110	2600	3,5	1,0	40

Patrząc na dane w tabeli 2 widoczne jest, że zasadnicze znaczenie w modelowaniu miało przyjęcie wysokości górnego posadowienia szybu, uzgodnienie różnicy gęstości pomiędzy szybem a otoczeniem oraz dopasowanie średnicy szybu. Najlepszą zgodność dla tych krzywych uzyskano dla średnicy $d_1=4,0$ m i $d_2=3,5$ m. Znaczna różnica gęstości może wskazywać na fakt, że szyb albo jest nie w pełni zlikwidowany albo zasypany jest materiałem o gęstości znacznie zaniżonej względem otoczenia. Takie stwierdzenie wymagałoby jednak powtórzenia pomiarów z odpowiednim usytuowaniem i zagęszczeniem siatki pomiarowej.

Główną korzyścią z przeprowadzonych modelowań jest zdobyte doświadczenie w poszukiwaniu (wyznaczaniu) zbliżonego do pomiarów wyniku modelowania z wykorzystaniem danych z kwerendy warunków geologiczno-górnich. Wynikające stąd wnioski przedstawione zostaną w końcowej części opracowania.

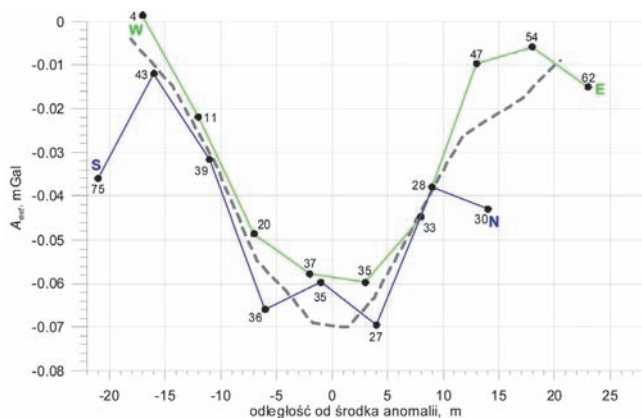
4.2. Szyb „Władysław”

Ze względu na niepewność lokalizacji szybu „Wschodniego”, sposobu pomiaru i trudności w interpretacji wyników na tym poligonie badań, zdecydowano się na przeprowadzenie dodatkowej próby modelowania z wykorzystaniem wyników pomiarów przedstawionych w punkcie 3.1 na szybie „Władysław”. Dane o lokalizacji szybu uzyskano na podstawie dostępnych materiałów archiwalnych. Opis sposobu wykonania pomiarów był analogiczny do szybu „Wschodniego” (punkt 4.1). Rejon szybu położony jest w terenie niewykazującym znacznych deniwelacji terenu.

Opis procesu analizy odwrotnej dla tego przypadku był podobny do opisanego w punkcie 4.1 dla szybu „Wschodniego” i nie będzie tu przytaczany. Ograniczono się tylko do pokazania rozkładu anomalii uśrednionego na podstawie wyników pomiarów na kierunkach X i Y oraz końcowego wyniku analizy. Na rys. 7 przedstawione są zmiany względnej wartości siły ciężkości wzdłuż profili pomiarowych na kierunkach X i Y. Linia zieloną zaznaczono profil o kierunku W-E (wzdłuż osi X), a niebieską S-N, wzdłuż osi Y. Środek układu pokrywał się z punktem pomiarowym 35, gdzie wartość anomalii dla jednego z kierunków była maksymalna. Linia X przechodziła przez punkty 4-11-20-37-35-33-47-54-62, a linia Y przez punkty 75-43-39-36-35-27-28-30. Szarą linią przerywaną zaznaczono wstępnie oczekiwany rozkład anomalii.

Wyniki pomiarów ujawniają znaczną amplitudę anomalii (znaczna wartość ekstremum anomalii) zarejestrowaną nad szybem „Władysław”. W pobliżu ekstremum pojawia się charakterystyczne wypłaszczenie krzywej profilowej (kierunek

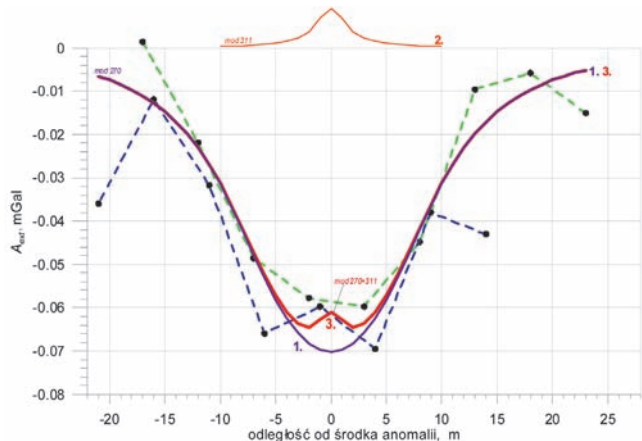
zielony). W tym miejscu dla prostopadłego kierunku pojawia się nawet lokalny wzrost wartości siły ciężkości. W okolicach centrum wartości siły ciężkości i kształt krzywych jest zbliżony. Tak wyznaczona krzywa ma regularny kształt (linia szara przerywana), podobny do profili uzyskanych w trybie badań modelowych z zachowaniem symetrii osiowej. Ułatwiło to znacznie poszukiwanie odpowiedniego dopasowania. Krzywą, która w toku modelowania uzyskała najlepsze dopasowanie do wyników pomiarów na obu kierunkach przedstawiono na rys. 8 i oznaczono nr. 1. Jednakże w pobliżu punktu ekstremum anomalii modelowa krzywa (1) uzyskuje znacznie większą amplitudę (brak wypłaszczenia). Z tego względu dodatkowo poszukiwano krzywej o anomalii dodatniej (2), której superpozycja z krzywą (1) doprowadziłaby do lepszej zgodności krzywej modelowej z wynikami pomiarów. Uzyskany rezultat ilustruje rozkład A_{ext} na krzywej (3).



Rys. 7. Zmiany względnej wartości siły ciężkości na profilach wzdłuż osi X (zielony) i Y (niebieski) dla Szybu „Władysław”

Fig. 7. Changes in the relative value of gravity force on the profiles along X (green) and Y (blue) axes for “Władysław” shaft

Wynik modelowania (3) wskazywać może na występowanie wokół szybu strefy rozluźnień, która w znaczącym zakresie poszerza obszar objęty anomalią. W szybie występuje wypełnienie (reprezentowane przez krzywą 2) o gęstości bliskiej $3000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Można stwierdzić, że prawdopodobnie od czasu podsadzenia szybu nastąpiło rozmycie wypełnienia w jego górnym, przypowierzchniowym odcinku.



Rys. 8. Zestawienie najlepszych dopasowań otrzymanych w modelowaniu z profilami pomiarowymi – Szyb „Władysław”

Fig. 8. Summary of the best matches obtained in the course of modeling with measuring profiles – “Władysław” shaft

Modelowany przebieg krzywej A_{ext} może być w dużej mierze zakłócony występowaniem dodatnich wartości siły ciężkości, co może wskazywać na występowanie masywnej podziemnej infrastruktury nieznanego pochodzenia. Uwzględnienie tego w modelu grawimetrycznym zmieniłoby obraz efektu od szybu. Dodać należy także, że wskazuje na to wysoka wartość dodatnia A_{ext} określona na podstawie uzyskanej z pomiarów wartości ekstremalnej i w otoczeniu szybu o promieniu 10-15m. W takich przypadkach siatka pomiarowa powinna być zagęszczona do odcinków od 1-2,5 m. Parametry modelowania zestawiono w tabeli 3.

Tablica 3. Parametry szypów w symulacjach dla szybu „Władysław”

Table 3. Parameters of shafts in simulations conducted for “Władysław” shaft

Nr	ρ_{sz} , $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	ρ_o , $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	d, m	H_{st} , m	H_{sp} , m
1. 270	660	2200	14	5	14
2. 311	3000	2200	2	1	14
271	870	2200	16	5	14
272	1100	2200	18	5	14
275	10	3000	8	5	14
265	1200	2210	20	5	14

5. Podsumowanie i zalecania

Praca stanowiła próbę zastosowania metod numerycznego modelowania z wykorzystaniem analizy odwrotnej dla identyfikacji warunków w obrębie zlikwidowanych szypów. Pomiar i badania własne dotyczyły szybu „Wschodniego” położonego na terenie eksploatacji rudnej Kopalni ZGH „Orzeł Biały”. Dodatkowo opracowane zostały także wyniki pomiarów dla szybu „Władysław” na terenie koksowni „Jadwiga” w Zabrze.

Sporządzone mapy rozkładu względnych wartości siły ciężkości wskazywały na występowanie anomalii w pobliżu miejsca usytuowania szybu określonego na podstawie dokumentacyjnych materiałów archiwalnych. Dane pomiarowe zostały odpowiednio przetworzone z uwzględnieniem poprawek stosowanych w grawimetrii. Przetworzenie to polegało na wyłonieniu anomalii z danych pomiarowych z uwzględnieniem redukcji Bouguera i sprowadzeniu wyników do „układu anomalii”, tj. do warunków symetrii osiowej 2D, w postaci odpowiednich profili. Z poprawionych danych wykorzystano dwa charakterystyczne, wzajemnie prostopadłe profile, przechodzące przez środek anomalii, które zostały wykorzystane do poszukiwania parametrów krzywych pozyskiwanych na drodze modelowania.

Metoda analizy poprzez modelowanie polegała na uzmiennieniu parametrów modelowego szybu, takich jak: gęstość w szybie i w jego otoczeniu, średnica szybu, położenie stropu i spągu szybu i badaniu wpływu ich zmiany na wartość największą anomalii (A_{ext}) oraz na jej rozkłady ($A_{ext}(x)$ i $A_{ext}(y)$) przy oddalaniu się od osi szybu. Modelowanie dostosowane do uśrednionego profilu przeprowadzono zmodyfikowanym dla szypów programem *Modgrav*.

Jako wyniku modelowania poszukiwano najlepszego dopasowania krzywej modelowej do łamanej uśredniającej wyniki pomiarów terenowych (punkt 4). W tym celu wykonano wiele symulacji efektu grawitacyjnego, które potwierdziły w warunkach szybu „Wschodniego” i „Władysław” rezultaty badań modelowych:

- wprost proporcjonalność A_{ext} , $A_{ext}(x)$ i $A_{ext}(y)$ do różnicy gęstości,
- zależność A_{ext} w przybliżeniu od założonego kwadratu średnicy szybu,

- słabą zależność A_{ext} od głębokości szybu przekraczających 50 m,
- silną zależność A_{ext} od położenia stropu szybu,
- występowanie $\frac{1}{2} A_{ext}$ w pobliżu krawędzi szybu.

Wyniki dopasowań oraz związane z nimi parametry przedstawiono na rys. 4-6 dla szybu „Wschodniego” i 7-8 dla szybu „Władysław” oraz odpowiednio w tabelach 1-3.

Analiza danych pomiarowych i parametrów modeli wskazuje na niejednoznaczność wyniku, co przejawia się tym, że różne wartości wymiarów szybu i gęstości wypełnienia prowadzą do uzyskania podobnych wartości A_{ext} i podobnego rozkładu anomalii (zbliżony kształt krzywych). Niejednoznaczność ta wynika z jednej strony z dokładności pomiaru, ale także z niewielkiej amplitudy anomalii siły ciężkości. Zdaniem autora niejednoznaczność tę w wielu przypadkach można by wyeliminować, modyfikując sposób wykonywania pomiarów i uściślając dane techniczne o szybie. Dotyczy to informacji o wymiarach szybu, obudowie i sposobie likwidacji oraz warunkach hydrogeologicznych.

Poszerzenie zasad modelowania polegało na próbie zastosowania zasady superpozycji wpływów obszarów w obrębie badanej anomalii, np. od wypełnionego szybu, które charakteryzują się zróżnicowanymi gęstościami i różną lokalizacją. Przykładem tego było takie postępowanie dla interpretacji efektu grawimetrycznego w rejonie szybu „Władysław”, gdzie wystąpiło charakterystyczne wypłaszczenie krzywych w pobliżu centrum anomalii. Wyniki ilustruje rys. 8, wskazując na możliwości superpozycji wymodelowanych efektów grawimetrycznych, pochodzących od różnych struktur czy różnych części szybu (różne wypełnienie, obudowa i zróżnicowane otoczenie).

Rezultaty modelowania, które miały pełnić rolę wzorcowych (główny poligon), nie pokrywają się w zadowalający sposób z wynikami pomiarów. W świetle przeprowadzonej analizy należy stwierdzić, że powodem tego był nietrafny wybór poligonu badań. Znacznie skuteczniejsze dla wypracowania metody modelowania efektu grawitacyjnego nad szybami byłoby przeprowadzenie pomiarów grawimetrycznych na obiekcie usytuowanym w słabo zaburzonym podłożu. Szyb taki ze względów metodycznych powinien być pustką, a jego położenie powinno być ściśle określone. Znane powinny być także wymiary, grubość i rodzaj obudowy oraz zapewniona jej szczelność (brak przepływów). Na takim obiekcie rozmieszczenie punktów pomiarowych powinno być takie, aby w pobliżu środka szybu (w obrębie jego średnicy) zagęszczenie punktów było największe i powinno maleć wraz z odległością od środka szybu na zewnątrz jego średnicy. Dla prawidłowego przeprowadzenia testowania metody potrzebne jest duże zagęszczenie punktów nad pustką – ze względu na największą zmienność wartości anomalii w tym przedziale.

Po spełnieniu sformułowanego postulatu wyniki wzorcowego testowania metody mogłyby być dopiero zastosowane do znacznie trudniejszego zadania, jakim jest wykorzystanie wypracowanej metody do określania lokalizacji zlikwidowanych szybów i ich parametrów geometrycznych oraz ich wypełnienia. Poprawa efektywności identyfikacji wyrobisk pionowych metodą grawimetryczną, zdaniem autora, wymaga przeprowadzenia takich wzorcowych badań w przyszłości.

Biorąc pod uwagę wyniki tej pracy, sformułować można następujące zalecenia praktyczne dla sposobu poszukiwania pustki poszybowej.

Zalecenia

Podstawowym zaleceniem jest stosowanie analizy wstępnej dla właściwego doboru długości kroku siatki pomiarowej poprzez:

- zebranie kompletu danych archiwalnych o badanym szybie, takich jak: średnica, obudowa, sposób likwidacji, wypełnienie, infrastruktura i dokładna lokalizacja,
- skonstruowanie modelu wpływów szybu na powierzchnię w wariancie „szyb podsadzony” (anomalii dodatnia) i „szyb niezlikwidowany” (anomalii ujemna). Jeżeli $\frac{1}{2} A_{ext} > 2 |\mu|$ (średniego błęd pomiarów wraz z błędami poprawek), czyli $A_{ext} > 4|\mu|$ (np. dla $\mu = \pm 0,004$ mGal), możliwe jest wykrycie przy s_0 anomalii $A_{ext} = -4|\mu| = -0,016$ mGal (s_0 to szerokość krzywej dzwonowej po odległości od osi szybu dla $\frac{1}{2} A_{ext}$),
- jeżeli celem badań jest tylko zlokalizowanie szybu, wystarczające jest wykrycie anomalii o znaku dodatnim lub ujemnym w zależności od stanu szybu; $\text{krok} = s_0$,
- jeżeli spodziewana anomalii ma mniejszą amplitudę lub celem badań jest ocena stanu szybu i jego parametrów, krok siatki badawczej należy zmniejszać tak, że: $s_0 \rightarrow s_1 = s_0/2$ itd. (zagęszczanie siatki),
- po trafieniu na anomalię pomiaru należy uzupełnić, aby otrzymać pewniejsze krzywe,
- w szczególnych przypadkach wskazane może okazać się wykonanie powtórnych pomiarów podstawowych i zagęszczających w celu eliminacji ewentualnych błędów pomiarowych.

Równie istotne jest dokładne wytyczenie miejsca usytuowania szybu w terenie w przypadku dostępności danych archiwalnych i geodezyjnych, również poprzez zastosowanie lokalizatorów GPS wysokiej dokładności oraz określenie wielkości błędu takiego wytyczenia (metoda geodezyjna, błędy map archiwalnych).

Zaleceniem wynikającym z rezultatów tej pracy jest sugestia przeprowadzenia wstępnej interpretacji pomiarów grawimetrycznych prowadzonych nad szybem już w trakcie ich wykonywania. Realizacja tego postulatu wymaga stosowania programów bieżącej analizy danych, które mogą zostać opracowane przez dalsze wykorzystanie informatyki wspomagającej interpretację pomiarów grawimetrycznych.

Wytyczne te są dodatkowym – istotnym rezultatem pracy, a ich stosowanie może prowadzić do uzyskania korzystniejszych efektów w trakcie prowadzenia analizy odwrotnej.

Wyniki badań prezentowane w tej publikacji są rezultatem prac badawczych realizowanych przez autora w ramach działalności statutowej GIG (symbol: 11120322-124) w latach 2012-2013.

Literatura

1. Balicki A., Kortas Ł., Kotyrba A.: Zmiany regionalnego pola siły ciężkości w północnej części GZW w latach 2002-2003, „Przeгляд Geologiczny” 2005, vol. 53, nr 4, s. 299-305.
2. Dubiński J., Pilecki Z.: Badania geofizyczne w kopalniach, Wydawnictwo IGSM PAN, Kraków 2001, s. 377-404.
3. Fajkiewicz Z.: Zarys geofizyki stosowanej, cz. 2, praca zbiorowa, Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa, Katowice 1972.
4. Fajkiewicz Z.: Grawimetria poszukiawcza, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1973.
5. Fajkiewicz Z.: Mikrograwimetria górnicza, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1980.
6. Fajkiewicz Z.: Grawimetria stosowana, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2007.
7. Fajkiewicz Z., Ostrowski C.: „Mikrograwimetria – metoda służąca do wykrywania deformacji nieciągłych terenów górniczych „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie” 2010, nr 4, s. 10-16.
8. Kortas Ł.: Badania modelowe efektu grawitacyjnego generowanego

- przez wysady solne, w: Ruch górotworu w rejonie wysadów solnych, red. G. Kortas, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków 2008, s. 85-98, 236.
9. *Kortas L.*: Modelowanie efektu grawitacyjnego generowanego przez pustki poeksploatacyjne o zmiennych parametrach, „Przeгляд Górnicy” 2012, nr 6, s. 9-20.
10. *Kotyba A., Kortas L., Frolik A., Siwek S.*: Zagrożenia zapadliskowe na terenach dawnych podziemnych kopalń węgla brunatnego w rejonie Pily-Młyna (województwo kujawsko-pomorskie), „Przeгляд Górnicy” 2012, nr 7, s. 58-66.
-
-

***Zwiększajmy prenumeratę
najstarszego – czołowego miesięcznika
Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Górnictwa!***

Liczba zamawianych egzemplarzy określa zaangażowanie jednostki gospodarczej w procesie podnoszenia kwalifikacji swoich kadr!