

JERZY STEIN,

ALEKSANDER STOPIŃSKI,

KONSTANTY CZEPULIS

Uniwersytet Warszawski

METODY MIKROGRAWIMETRYCZNE W PROBLEMATYCE EKSPLOATACJI ZŁOŻ SIARKI

UKD 550.832.1:[622.366.11:622.277.6].003.1

Wyraźny rozwój geofizycznych metod badawczych, który obserwujemy od wielu lat, pozwala na znaczne rozszerzenie problematyki geologicznej, jaką można rozwiązać za pomocą różnych dziedzin geofizyki. Postęp w dziedzinie badań geofizycznych wyraża się przez wprowadzanie zupełnie nowych metod badawczych lub przez udoskonalanie technik pomiarowych i interpretacyjnych w tradycyjnych metodach geofizycznych.

Wyrazem postępu w grawimetrycznej metodzie badawczej jest produkowanie coraz to bardziej precyzyjnych instrumentów pomiarowych, pozwalających mierzyć bardzo małe wartości anomalii grawimetrycznych. Wysokoczule i lekkie instrumenty pomiarowe pozwalają wprowadzać w dziedzinie badań grawimetrycznych nowe techniki pomiarowe, jak na przykład połowy pomiar pionowego gradientu przyspieszenia siły ciężkości (3, 4) lub umożliwiając prze-

prorowadzenie specjalnych, precyzyjnych pomiarów anomalii Δg , wykonywanych na stosunkowo niewielkich obszarach.

Ten ostatni rodzaj pomiarów, wprowadzony w Polsce po raz pierwszy przez Z. Fajkiewicza (1, 2) nosi nazwę pomiarów mikrograwimetrycznych. Pomiar te służą do badania lub lokalizowania bardzo małych wielkości anomalii siły ciężkości, niewiele przekraczających dokładność pracy grawimetru. Anomalie grawimetryczne tej wielkości powstają wskutek drobnych i płytkich zaburzeń tektonicznych lub innych zjawisk geologicznych. Mogą być również wywołane działalnością człowieka.

Do tej pory mikrograwimetria wykorzystywana jest głównie dla potrzeb podziemnego górnictwa węglowego — gdzie z powierzchni terenu lub wyrobisk górniczych lokalizuje strefy tektoniczne lub bada erozyjną powierzchnię karbonu. Mikrograwimetria służy również potrzebom budownictwa na terenach zagłębi węglowych. W tym ostatnim przypadku — lokalizuje się za pomocą badań mikrograwimetrycznych stare, zapomniane wyrobiska górnicze będące zagrożeniem dla budowli ziemnych.

W artykule przedstawione zostaną niektóre wyniki prac prowadzonych dla potrzeb otworowego górnictwa siarkowego. Szczegółowe wyniki tych prac zostały już częściowo opublikowane lub znajdują się w druku (8, 9, 10, 11).

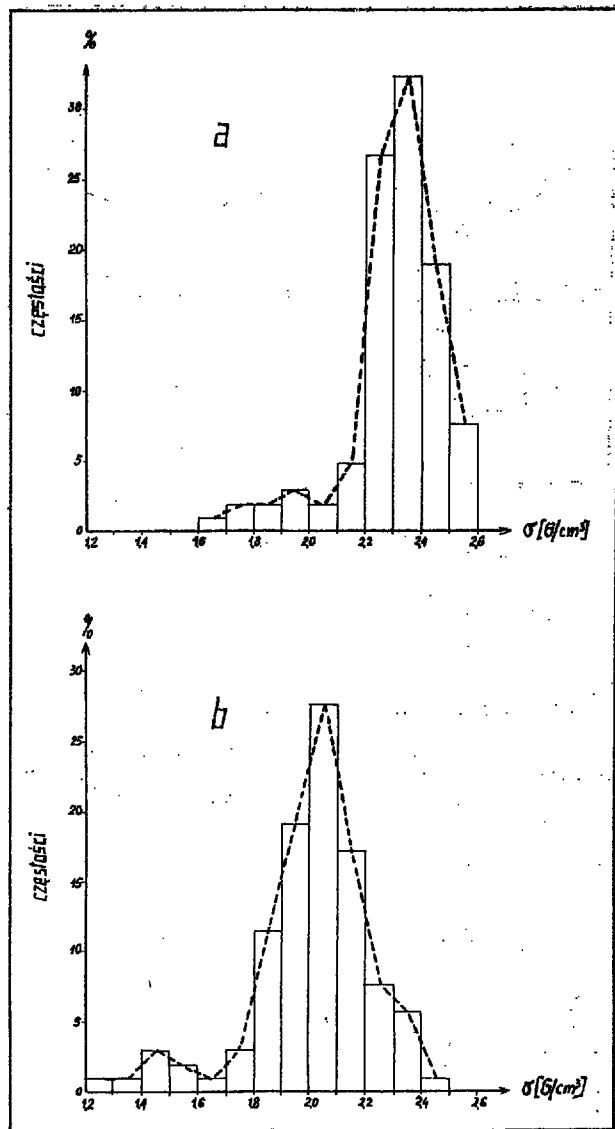
Jednym z wielu bardzo istotnych problemów, stojących przed otworowym górnictwem siarkowym, jest problem określania rejonów szczypania siarki przez pojedynczy otwór lub grupę otworów. Nieznajomość dróg i zasięgu krążenia gorących wód technologicznych w złożu, a tym samym nieznajomość rejonów szczypania siarki jest między innymi powodem stosunkowo niskiego stopnia szczypania siarki ze złoża. Należało w związku z tym opracować szybką i taną metodę powierzchniową, za pomocą której można zlokalizować miejsca szczypane i nieszczypane, a tym samym wyznaczyć miejsca do ponownej eksploatacji, w celu możliwie pełnego wykorzystania siarki w złożu.

Różny stopień szczypania siarki ze złoża jest wywołany przede wszystkim bardzo zmiennym wykształceniem teksturalnym i strukturalnym pogipsowych utworów siarkonośnych. Wykształcenie litologiczne utworów siarkonośnych ukierunkowuje przepływ wód technologicznych wytapiających siarkę. Duża zmienność litologiczna w poziomie i pionie, węglanowych i węglanowo-ilastych utworów serii złożowej uniemożliwia jakakolwiek kontrolę rejonów przenikania gorących wód technologicznych.

Pomiary mikrograwimetryczne przeprowadzone zostały na terenach dwóch otworowych kopalni siarki — w Grzybowie i Jeziórku. W rejonie kopalni Grzybów najstarszymi utworami są osady eokambru (5, 6, 7), stanowiące podłoże osadów mezozoicznych (triasu i jury) oraz miocenu. Osady miocenu leżą w okolicy kopalni bezpośrednio, z luką stratygraficzną i dyskordancją kątową, na utworach triasowo-jurajskich.

Na obszarze kopalni Jeziórko, w podłożu osadów miocenijskich występują, ogólnie biorąc, osady najstarszego kambriu. Przed transgresją miocenijską powierzchnia utworów kambryjskich uległa zerodowaniu i penplenizacji. Na podłożu staropaleozoicznym osady miocenu leżą niezgodnie z dużą luką i dyskordancją kątową.

Osady miocenijskie na obu obszarach wykształcone są na ogół bardzo podobnie. Pewne różnice fałdalne występują tylko w utworach starszych od osadów chemicznych. W skład osadów chemicznych wchodzi wapień pogipsowy — osiarkowane i płonne oraz gipsy. Wapnie wykazują duże zróżnicowanie zarówno pod względem zawartości węglanu wapnia, spoiwości, procentowej zawartości siarki i sposobu rozmieszczenia jej w skale. Gipsy obserwuje się głównie w rejonie kopalni Grzybów, gdzie przechodzą one poziomo w różnorodne typy litologiczne utworów pogipsowych. Nad osadami chemicznymi le-



Ryc. 1. Histogram ciężaru objętościowego rudy siarkowej przed wytopem (a) oraz po wytopie siarki w suszarce (b).

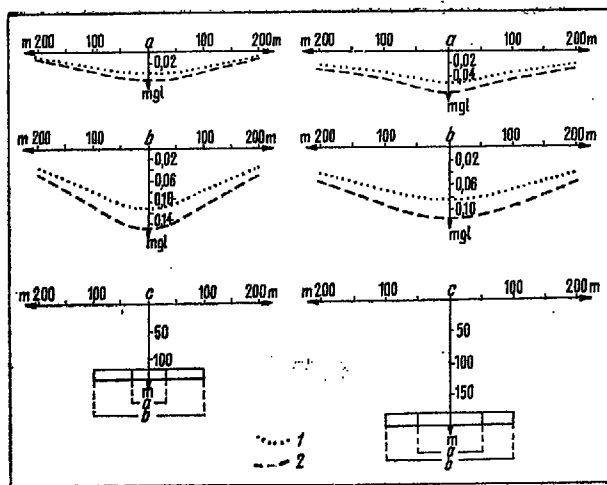
Fig. 1. Histogram of volume weight of sulphur deposit (a) before and (b) after liquating sulphur in desiccator.

żą margliste warstwy pektenowe oraz ilły sarmatu ilastego.

Podstawą zastosowania badań mikrograwimetrycznych dla potrzeb otworowego górnictwa siarkowego jest przede wszystkim ubytek mas siarki następujący w wyniku jej wytopu oraz częściowo ubytek mas wywołany rozmyciem i rozpuszczeniem podatnych na te procesy fragmentów serii złożowej, wskutek działalności gorących wód technologicznych nagrzewających złożo.

Wszystkie te czynniki wpływają na zróżnicowanie wartości ciężaru objętościowego w obrębie utworów serii złożowej, co determinuje rozkład anomalii grawimetrycznych. Miejsca maksymalnego wpływu eksploatacji, na które składają się wszystkie możliwe ubytki mas w złożu, będą charakteryzowały się wyraźnie mniejszymi wartościami ciężaru objętościowego w porównaniu do obszarów nie naruszonych wpływami eksploatacji.

W celu otrzymania odpowiedzi odnośnie do wielkości względnych, ujemnych anomalii grawimetrycz-



Ryc. 2. Teoretyczne krzywe Δg nad modelami ciał dwuwymiarowych o przekroju prostokątnym.

a, b — krzywe Δg dla modeli o różnej szerokości, c — przekroje przez modele; 1 — krzywa Δg przy $\Delta\sigma = 0,3 \text{ G/cm}^3$; 2 — krzywa Δg przy $\Delta\sigma = 0,4 \text{ G/cm}^3$.

Fig. 2. Theoretical Δg curves above models of two-dimensional bodies of rectangular cross-section.

a, b — Δg curves for models of different width, c — cross-sections of models; 1 — Δg curve when $\Delta\sigma$ equals 0.3 G/cm^3 , 2 — Δg curve when $\Delta\sigma$ equals 0.4 G/cm^3 .

nych, które będzie można otrzymać w wyniku eksploatacji, wykonano obliczenia teoretyczne. Chodziło mianowicie o stwierdzenie, czy ubytek masy złoża, wywołany procesami eksploatacyjnymi odzwiercudza się w postaci mierzalnego efektu grawitacyjnego. W obliczeniach tych przyjęto modele teoretyczne, którym przypisano założone lub znane parametry geologiczne i eksploatacyjne omawianych złóż siarki. Z uwagi na zróżnicowanie wielkości wpływu eksploatacji w złożu oraz na różne charakterystyki geologiczne do obliczeń przyjęto różne warianty modelowe.

Zmiany ciężaru objętościowego przyjęto w zakresie od $0,2$ do $0,4 \text{ G/cm}^3$, przy jednoczesnym uwzględnieniu wypęnienia pustek i por wodną złożową i technologiczną. Zakres zmian ciężaru objętościowego skał serii złożowej po wytopieniu z nich siarki określono drogą badań laboratoryjnych — ryc. 1. Przyjęte do obliczeń zmiany ciężaru objętościowego wskutek wytopu siarki dają się pewnie korelować z ogólną procentową zawartością siarki w złożu (11). Należy tu zwrócić uwagę, że większość parametrów geologicznych przyjętych do obliczeń jest wielkościami pewnymi, ze względu na dobre rozpoznanie geologiczne badanego rejonu.

W obliczeniach przyjęto modele krążka poziomego i poziomego prostopadłościowego o przekroju prostokątnym. Krążek poziomy z uwagi na swój kształt wydaje się być najbardziej odpowiednim modelem teoretycznym obrazującym szczyt rejonu złoża za pomocą jednego otworu lub grupy otworów. W wyniku obliczeń dla krążka uzyskano wartości anomalii grawimetrycznych w zakresie od $0,05$ do $0,1 \text{ mg}$ dla różnych pól górniczych. Wartości te przekraczają od $2,5$ do 5 razy dokładność pracy współczesnego grawimetru.

Niektóre wyniki obliczeń wykonanych dla różnych wariantów poziomego prostopadłościowego przedstawia ryc. 2. Przyjęcie takiego kształtu strefy wyeksploatowanej w obrębie pola górniczego można wytłumaczyć eksploatacją prowadzoną często za pomocą wydłużonego rzędu otworów. W takim przy-

padku, dany rząd otworów eksploatacyjnych może spowodować spadek ciężaru objętościowego w pewnym pasie serii złożowej. W obliczeniach tych przyjęto różne szerokości prostopadłościowego, mające odwzorować różne zasięgi szczytowania siarki. Modele te umieszczono na głębokościach odpowiadających ekstremalnym głębokościom zalegania serii złożowej (120 i 180 m). Obliczenia wykonano dla dwóch zmian ciężaru objętościowego, to jest $0,3$ i $0,4 \text{ G/cm}^3$.

W wyniku obliczeń uzyskano szereg krzywych teoretycznych, które orientują w zakresie wielkości anomalii powstałych wskutek wytopu siarki, w różnych co do wielkości partiach serii złożowej. W przypadku zalegania serii złożowej na głębokości 120 m , realne do interpretacji anomalie Δg można uzyskać przy szerokości prostopadłościowego wynoszącej 50 m , w przypadku głębokości stropu serii złożowej wynoszącej 180 m , szerokość ta wynosi 80 m .

Z obliczeń teoretycznych wynika, że mimo dużych zmian ciężaru objętościowego, a tym samym całkowitego szczytowania siarki, należy się liczyć z otrzymaniem małych wartości anomalii Δg . Należało więc zastosować specjalną metodę prac polowych i obliczeniowych, która gwarantuje dużą dokładność prac. Podczas prac polowych na terenach kopalni siarki średni kwadratowy błąd pojedynczego pomiaru był niejednokrotnie niższy $0,02 \text{ mg}$.

Badania grawimetryczne prowadzono dwoma systemami: pomiarów dwukrotnych i jednokrotnych. Metoda pomiarów dwukrotnych polega na wykonaniu w obrębie pola górniczego prac terenowych w dwóch terminach. W pierwszym terminie wykonuje się pomiary na terenach przyszłej eksploatacji, w drugim terminie wykonuje się pomiary na tym samym terenie po całkowitym zakończeniu eksploatacji.

Uzyskane w wyniku prac drugiego etapu mapy anomalii grawimetrycznych powinny się charakteryzować w miejscach dużego ubytku masy złoża względnie ujemnymi anomaliami w stosunku do wartości anomalii przed eksploatacją. W tym systemie pomiarów, poprzez porównanie map anomalii Δg uzyskanych przed i po zakończeniu eksploatacji, eliminuje się ewentualne anomalie wywołane czynnikami geologicznymi, których efekty grawitacyjne powinny się powtórzyć na obu mapach, a które nas w tych rozważaniach nie interesują.

Pomiary jednokrotne polegały na wykonaniu prac terenowych na wyeksploatowanych partiach złoża. Pomiary wstępne — przedeksploatacyjne były niemożliwe do wykonania na tych obszarach ze względu na wcześniejsze rozpoczęcie eksploatacji. Z uwagi na niewyeliminowanie czynników geologicznych w tym systemie pomiarów podczas prac interpretacyjnych przeprowadzono dokładną analizę geofizyczno-geologiczną, polegającą na obliczeniu efektów grawitacyjnych, które ewentualnie mogą pochodzić od różnych czynników geologicznych. Chodzi tu głównie o wpływ zróżnicowanej morfologii stropu serii złożowej, przy istniejącym, wyraźnym kontraście gęstościowym między serią złożową a nadkładem, który wynosi $+0,3 \text{ G/cm}^3$. W wyniku obliczeń okazało się, że wpływ ten w rejonie badanych pól górniczych jest minimalny i nie rzutuje w sposób istotny na pomierzone wartości Δg . Ponadto podczas interpretacji zanalizowano wyniki badań uzyskanych w rejonach jeszcze nieeksploatowanych, a bezpośrednio sąsiadujących z obszarem badań. Analiza ta wykazała, że obserwowane względne anomalie ujemne na obszarach pól górniczych są wywołane procesami eksploatacyjnymi.

Uzyskane w wyniku prac terenowych mapy anomalii Bouguera stały się podstawą interpretacji geofizyczno-geologicznej. Przykładowo niektóre z tych map przedstawiają ryc. 3 i 4a. Rycina 3 przedstawia mapy anomalii Bouguera wykonane na polu górniczym „T” w jednej z kopalni siarki, w dwukrotnym

Ryc. 3. Mapy anomalii Bouguera pola górniczego „T”.

a — przed eksploatacją siarki, b — po zakończeniu eksploatacji siarki; 1 — otwór eksploatacyjny, 2 — izolinie Δg w mgl.

Fig. 3. Bouguer anomaly map for mining field „T”.

a — before sulphur exploitation, b — after closing sulphur exploitation, 1 — exploitational borehole, 2 — Δg isolines in mgl.

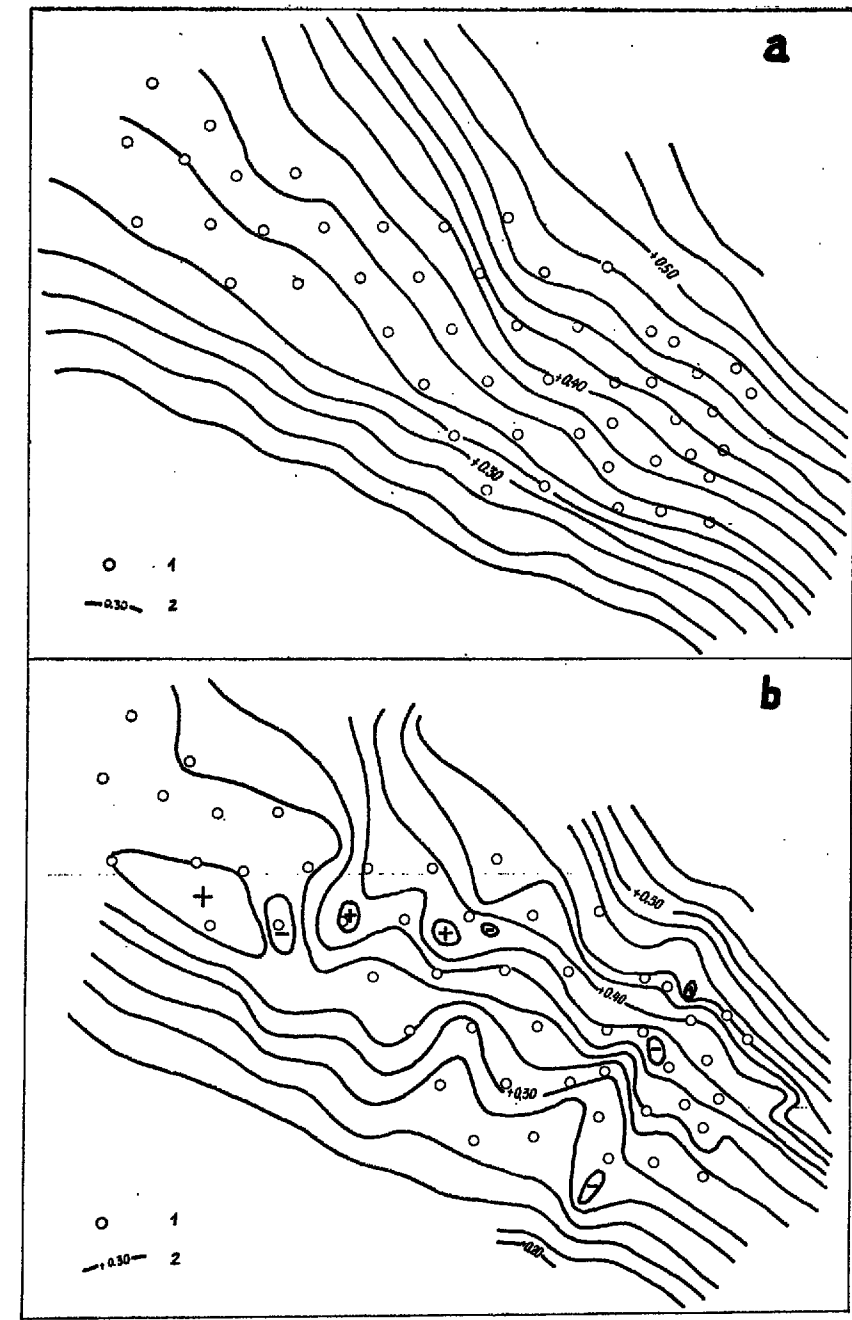
gradientu, analityczną metodą krakowianową i metodą graficzno-analityczną — Griffina.

Mapy anomalii lokalnych uzyskane w wyniku wyeliminowania pola regionalnego (dla przykładu jedną z takich map przedstawia ryc. 4b) różnymi sposobami porównywano ze sobą i rejonów, w których powtarzają się względne, ujemne anomalie przyjmowano jako miejsce szcerpane. W wyniku tej analizy opracowano szkice sytuacyjne rejonów o dużym lub małym szcerpaniu siarki. Szkice takie przedstawiono na ryc. 5 i 7.

Jako kryterium określające zasięg dużego szcerpania siarki (dużego wpływu eksploatacji) przyjęto powtarzający się na mapach anomalii lokalnych w danym rejonie obszar względnych, ujemnych anomalii powyżej 0,04 mgl. Obszary o względnych anomaliach ujemnych w zakresie 0,0—0,4 mgl przyjęto jako rejonów o prawdopodobnie małym szcerpaniu siarki. Wartość amplitudy względnej, ujemnej anomalii powyżej 0,04 mgl, charakteryzującej rejonów szcerpane, przyjęto na podstawie teoretycznych obliczeń modelowych, porównania map anomalii lokalnych z wydobywaniem siarki w poszczególnych rejonach złoża oraz na podstawie otworów kontrolnych, odwierconych po zakończeniu eksploatacji.

Analizując szkice sytuacyjne, opracowane na podstawie badań mikrogravimetrycznych dla poszczególnych pól górniczych, można łatwo zauważyć, że rejonów szcerpane obejmują swym zasięgiem stosunkowo mały obszar tych pól (ryc. 5, 7, 8). Znacznie większe obszary pól górniczych, jak widać z tych rycin, uległy prawdopodobnie małym zmianom w wyniku prowadzonej eksploatacji lub też nie zostały w ogóle naruszone.

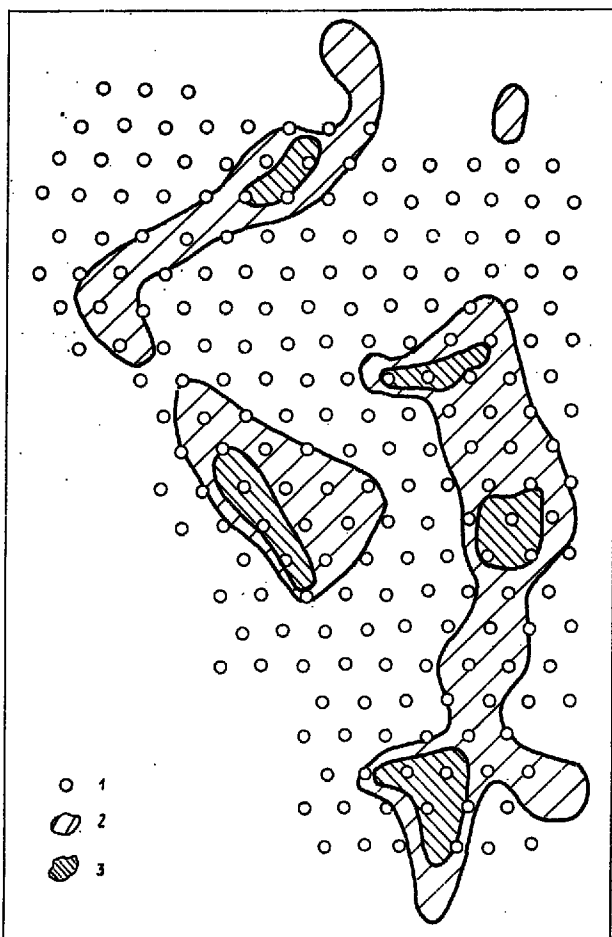
Za tego rodzaju interpretacją przemawiają oprócz danych eksploatacyjnych porównania wartości anomalii pomierzonych z anomaliami obliczonymi teoretycznie oraz wyniki otworów kontrolnych odwierconych na wyeksploatowanych partiach pól górniczych. Na przykład na polu „X” w Grzybowie (ryc. 5) otwory kontrolne 1, 2, 4, które jak widać usytuowane zostały w miejscach małych zmian serii złożowej (według badań mikrogravimetrycznych) posiadały rdzenie w niewielkim stopniu, i to jedynie z partii stropowych złoża, naruszone procesami eksploatacyjnymi. Inne otwory kontrolne z tego pola, a mianowicie 3, 5, 6, 7, również potwierdzają wyniki badań



cyklu pomiarowym. Na ryc. 3a widoczne są anomalie Δg , uzyskane przed rozpoczęciem eksploatacji. W spokojnym przebiegu anomalii widać wyraźnie tło regionalne, anomalie lokalne są bardzo słabo zaznaczone. Wyniki pomiarów po eksploatacji wykonanych na tym polu przedstawia ryc. 3b. Widać wyraźnie zaburzenie pierwotnego układu izoliny Δg wywołane procesami eksploatacji.

Urozmaicony przebieg izoliny anomalii Δg z wyraźnie zaznaczającymi się anomalią lokalnymi widać na mapie anomalii Bouguera w jednokrotnym systemie pomiarów na polu górnicznym „X” — ryc. 4a. I w tym przypadku zaburzenia lokalne wywołane są procesami eksploatacyjnymi.

Na wszystkich tych mapach widoczne jest pole regionalne, na którego tle nakładają się efekty form głęcej leżących. Celem wyznaczenia rejonów szcerpanych wyodrębniono z map anomalii Bouguera pole regionalne i dalej na poszczególnych mapach wyznaczano anomalie lokalne. Rozkład anomalii regionalnych wyznaczano w poszczególnych rejonach kilkoma sposobami, a mianowicie: metodą średniego



Ryc. 7. Szcik sytuacyjny rejonów wpływu eksploatacji siarki na polu górniczym „Y”.

1 — otwór eksploatacyjny, 2 — rejon małego wpływu eksploatacji, 3 — rejon dużego wpływu eksploatacji.

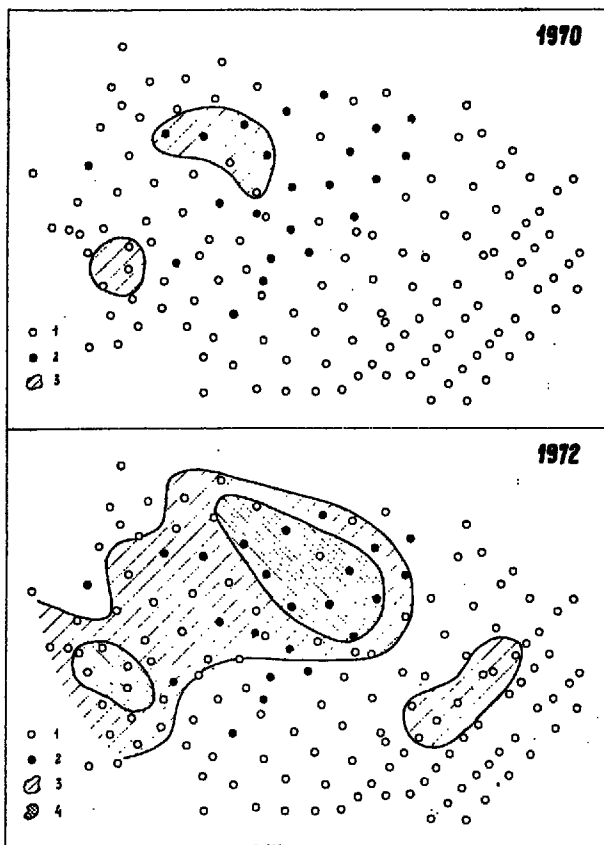
Fig. 7. Localization sketch of areas influenced by sulphur exploitation in the mining field „Y”.

1 — exploitational borehole, 2 — areas weakly influenced by the exploitation, 3 — areas highly influenced by the exploitation.

W tym miejscu należy zaznaczyć, że na przykład prawie cały rejon pola „X” jest w tej chwili ponownie odwiercany i eksploatowany, w celu pełniejszego wykorzystania zasobów.

Ciekawym przyczynkiem w wykorzystaniu wyników badań grawimetrycznych dla otworowego górnictwa siarkowego są rezultaty, jakie otrzymano na jednym z pól górniczych Grzybowa. Rycina 8a przedstawia zasięgi stosunkowo małych wartości względnych anomalii ujemnych świadczących o bardzo małym szcerpaniu siarki z tego pola w 1970 r. Ponowne włączenie tego pola do eksploatacji poprzez odwiercenie dodatkowych otworów (zaznaczonych na rycinie) pozwoliło znacznie podnieść wykorzystanie zasobów, co pozostało w związku ze znacznym zwiększeniem się strefy względnych, ujemnych anomalii i wzrostu ich wartości w 1972 r. Wyniki tych prac są przykładem wpływu procesów eksploatacyjnych na wartości i zmianę zasięgu anomalii grawimetrycznych.

Lokalizacja rejonów szcerpanych i nieszczerpanych w otworowym górnictwie siarkowym ma istotne znaczenie nie tylko w zagadnieniu podniesienia efektywności eksploatacji, lecz również w problemie ochrony środowiska geologicznego złóż siarki. W wy-



Ryc. 8. Szcik sytuacyjny rejonów wpływu eksploatacji siarki na polu górniczym „Z”.

1 — otwór eksploatacyjny, 2 — dodatkowy otwór eksploatacyjny, 3 — rejon małego wpływu eksploatacji, 4 — rejon dużego wpływu eksploatacji.

Fig. 8. Localization sketch of areas influenced by sulphur exploitation in the mining field „Z”.

1 — exploitational borehole, 2 — supplementary exploitational borehole, 3 — areas weakly influenced by the exploitation, 4 — areas highly influenced by the exploitation.

ku tłoczenia do złóż wód technologicznych zmienione zostają warunki hydrochemiczne wód złożowych. Powoduje to zachwianie pierwotnego reżimu i równowagi środowiska chemicznego, konserwującego złóż siarki. Zmiany te mogą doprowadzić do znacznych strat siarki w pozostawionych i niewyekspluatowanych partiach złóż, w rejestrowanych przez nas okresach czasu. W związku z tym istotne znaczenie ma fakt powtórnego włączenia do eksploatacji tych partii złóż, które charakteryzują się niezbyt wysokim stopniem wykorzystania zasobów. Rejony, jakie należałoby reeksploatować mogą być zlokalizowane badaniami mikrograwimetrycznymi.

W zakończeniu należy nadmienić, że w chwili obecnej na terenach otworowych kopalń siarki prowadzone są prace mikrograwimetryczne nad ich zastosowaniem do lokalizacji uskoków w serii złożowej. Strefy dyslokacyjne przebiegające w pobliżu frontu wydobywczego powodują często bezproduktywne ucieczki gorących wód technologicznych, znacznie obniżając efektywność eksploatacji. Jak wykazały dotychczasowe prace badania mikrograwimetryczne pozwalają dokładnie lokalizować te strefy, a tym samym pozwalają na przeprowadzenie specjalnych prac zabezpieczających. Wyniki prac mikrograwimetrycznych nad badaniem tektoniki złóż siarki zostaną przedstawione w oddzielnym opracowaniu.

LITERATURA

1. Fajkiewicz Z., Duda W. — Próba zastosowania pomiarów mikrogravimetrycznych dla potrzeb górnictwa węglowego. *Tech. Poszuk.* 1964, z. 9.
2. Fajkiewicz Z. — Efektywność mikrogravimetrii powierzchniowej w wykrywaniu uskoków w obrębie pola górniczego kopalni węgla kamiennego „Z”. *Ibidem* 1970, z. 34.
3. Fajkiewicz Z., Duda W., Śliz J. — Pomiar gradientu pionowego siły ciężkości dla celów poszukiwań płytko leżących struktur geologicznych i badania budowy górotworu. *Prz. geol.* 1972, nr 2.
4. Fajkiewicz Z. — Pustki poeksploatacyjne i odkształcenia objętościowe górotworu w świetle pomiaru gradientu pionowego siły ciężkości i jej mikroanomali. *Prz. gór.* 1972, nr 10.
5. Pawłowska K. — Syntetyczny profil litostratigraficzny osadów miocenu na obszarze między Chmielnikiem i Tarnobrzegiem. *Przewodnik XXXVIII Zjazdu PTG*, 1965.
6. Pawłowski S. — Mapa geologiczna okolic Solca — Dobrowa — Grzybowa. 1962.
7. Pawłowski S. — Zarys budowy geologicznej okolic Chmielnika — Tarnobrzega. *Przewodnik XXXVIII Zjazdu PTG*, 1965.
8. Stein J. — Zmiana warunków inżyniersko-geologicznych wywołanych eksploatacją otworową na terenach Kopalni Siarki „Jeziórko” w świetle badań mikrogravimetrycznych. *Praca oddana do druku w Biul. geol. Wydz. Geol. UW.*
9. Stopiński A., Stein J., Czepulis K. — Zastosowanie pomiarów mikrogravimetrycznych dla potrzeb otworowej eksploatacji siarki. *Kwart. geol.*, 1970, nr 4.
10. Stopiński A., Stein J. — Mikrogravimetria jako podstawowa metoda określenia rejonów wydobywania siarki metodą otworową. *Praca w druku w Biul. geol. Wydz. Geol. UW*, 1973.
11. Stopiński A. — Zmiany w środowisku geologicznym na skutek otworowej metody eksploatacji złoża siarki „Grzybów” w świetle badań mikrogravimetrycznych. *Praca w druku w Biul. Inst. Geol.* 1973.

SUMMARY

The paper deals with theoretical premises and results of application of microgravimetric surveys in hot-water sulphur mining. The surveys appeared useful in more accurate delineating exploited areas of sulphur deposits, and thus in increasing effectiveness of this method of sulphur-deposit exploitation. Moreover, these surveys appeared to be of remarkable importance for protection of sulphur deposits.

РЕЗЮМЕ

В статье представлены теоретические основы и результаты применения микрогравиметрии для целей скважинной разработки залежей серы. Этим методом можно определять районы истощенной залежи и, таким образом, повышать эффективность разработки серы скважинным методом. Кроме того, рассматриваемые исследования играют важную роль в области охраны залежей серы.