

Krzysztof Mąkowski

WPLYW WARUNKÓW ŚRODOWISKA KOPALNI ODKRYWKOWEJ NA DOKŁADNOŚĆ OKREŚLENIA
ODLEGŁOŚCI ZENITALNEJ I WSPÓLRZĘDNEJ WYSOKOŚCIOWEJ
W SIECI PRZESTRZENNEJ*THE INFLUENCE OF OPEN PIT ENVIRONMENT ON ACCURACY OF DETERMINING
OF ZENITH DISTANCES AND VERTICAL COORDINATES OF SPATIAL NETWORK POINTSKatedra Geodezji i Fotogrametrii
Department of Geodesy and Photogrammetry

WPROWADZENIE

Jednym z podstawowych zadań geodezji jest określenie przestrzennego położenia punktów. Stosowane w dotychczasowej praktyce geodezyjnej tradycyjne techniki pomiarowe rozdzielają proces pozyskiwania współrzędnych punktów. Oddzielnie wyznacza się współrzędne poziome - X , Y i współrzędne wysokościowe H lub Z .

W terenach płaskich dwuetapowość w pozyskiwaniu współrzędnych metodami tradycyjnymi nie budzi zastrzeżeń, bowiem dokładność ich uwarunkowana jest głównie użytym sprzętem pomiarowym /dalmierz, teodolit, niwelator/. Trudności technologiczne w uzyskiwaniu wysokich dokładności określania wysokości H punktów w terenach górskich lub o dużych sztucznie wytworzonych deniwelacjach /np. kopalnie odkrywkowe/ skłoniły do poszukiwań nowych konstrukcji sieci geodezyjnych. Wynikiem rozważań jest koncepcja lokalnej sieci przestrzennej umożliwiającej uzyskiwanie wysokich dokładności /prawie jednakowych/ wszystkich trzech współrzędnych X , Y , Z / H /.

Określanie współrzędnych punktów w przestrzeni trójwymiarowej przy wykorzystaniu sieci przestrzennych jest zagadnieniem stosunkowo nowym. W literaturze znalazło ono swe odbicie głównie w omawianiu zagadnień związanych z określeniem współrzędnych punktów w układach geocentrycznych [5, 7, 8]. Klasyczne rozwiązanie sieci odbywa się przy zastosowaniu naziemnych obserwacji geodezyjnych i astronomicznych w powiązaniu z elipsoidą odniesienia. W praktycznych zastosowaniach inżynierskich korzystniejsze jest stosowanie lokalnych układów topocentrycznych [3, 4, 7].

Elementami konstrukcyjnymi tej sieci są kąty poziome, kąty pionowe /odległości zenitalne/ oraz odległości przestrzenne. Sieci przestrzenne jako osnowy uniwersalne mogą być stosowane równocześnie do wszystkich za-

* Skróć pracy doktorskiej:

Promotor: doc. dr hab. inż. Stefan Cacoń - AR Wrocław

Recenzenci: doc. dr hab. inż. Ewa Krzywicka-Blum - AR Wrocław

doc. dr hab. inż. Władysław Dąbrowski - ART Olsztyn

dań geodezyjnych, których istotą jest określanie współrzędnych przestrzennych punktów. Jednym z najważniejszych warunków, jakie winny spełniać osnowy wielofunkcyjne, jest dostosowanie dokładności wykonywanych pomiarów do wymagań zalecanych w pracach o największej precyzji.

Znane są różne koncepcje sieci przestrzennych [3, 5, 7, 8]. Jedną z nich wdrożono, przy współudziale autora, na kilku obiektach w Polsce Centralnej i Południowo-Zachodniej [4].

We wszystkich przypadkach największy /obok odchylenia pionu/ problem w realizacji pomiarów sieci przestrzennych stwarzała refrakcja pionowa. Zjawisko refrakcji, pomimo iż badane jest od ubiegłego wieku, nadal pozostaje problemem otwartym.

W opracowaniu niniejszym przedstawia się własne sposoby określania refrakcji pionowej /bazujące głównie na statystycznej metodzie regresji wielokrotnej/ jako poprawki do odległości zenitalnej, stanowiącej element konstrukcyjny sieci przestrzennej. Przedstawia się ocenę własnych i innych /znanych z literatury/ sposobów obliczania kąta /poprawki/ refrakcji pionowej oraz ich wpływu na dokładność określenia odległości zenitalnej i współrzędnej wysokościowej H . Jako bazę do doświadczeń wykorzystano lokalną sieć przestrzenną założoną na terenie Kopalni Węgla Brunatnego "Turów".

Poprawki refrakcyjne określa się wykorzystując obserwacje testowe wykonywane na punktach o charakterystycznych, reprezentatywnych dla całej sieci celowych. Oprócz pomierzonych odległości zenitalnych uwzględnia się wpływ zaobserwowanych lokalnych czynników terenowych, takich jak: temperatura, ciśnienie atmosferyczne, wilgotność powietrza, zachmurzenie, siła wiatru.

W opracowaniu opisano praktyczną próbę podniesienia dokładności wyznaczenia przestrzennego położenia punktów sieci doświadczalnej KWB "Turów" poprzez zastosowanie w obliczeniach poprawionych odległości zenitalnych wprowadzanych do rozwiązania sieci w ujęciu wariantowym.

REFRAKcja PIONOWA I JEJ WPŁYW NA POMIARY ODLEGŁOŚCI ZENITALNYCH

Zjawisko refrakcji można najkrócej zdefiniować jako odchylenie biegu promieni świetlnych od prostoliniowości podczas ich przejścia z jednego ośrodka do drugiego. Wartość kąta odchylenia zależy od struktury ośrodka oraz długości fali promienia świetlnego. Niejednorodny rozkład gęstości powietrza w niższych warstwach atmosfery jest podstawowym źródłem błędów pomiarów geodezyjnych, wynikających ze zjawiska refrakcji. Błędy te są zarówno systematycznego, jak i przypadkowego charakteru. Systematyczne błędy wynikają z faktu zmienności gęstości powietrza wraz ze wzrostem wysokości, a przypadkowe - z występujących często turbulentnych ruchów powietrza. W praktyce zjawisko refrakcji ma największy wpływ na pomiar odległości zenitalnych. Zasadniczą trudnością przy eliminacji tego zjawiska jest wyznaczenie wpływu czynników przypadkowych na zmiany gęstości powietrza w niższych /do ok. 30 m/, niestabilnych jego warstwach. Wszystkie, zarówno systematyczne, jak i przypadkowe, czynniki wpływające na zmiany gęstości

powietrza można ogólnie podzielić na czynniki opisujące stan atmosfery oraz czynniki określające środowisko pomiarów /sytuację terenową/.

Do czynników opisujących stan atmosfery zalicza się: ciśnienie atmosferyczne, temperaturę powietrza, pionowy gradient temperatury, zachmurzenie oraz wpływ wiatru. Do czynników charakteryzujących środowisko pomiarów zalicza się: długość linii celowania, różnicę wysokości między stanowiskiem a celem, bezwzględną wysokość położenia punktów, wysokość przebiegu celowej nad terenem, kąt nachylenia celowej w odniesieniu do spadku terenu oraz rodzaj i charakter powierzchni podścielającej.

W praktyce problem refrakcji pionowej sprowadza się do określenia poprawki /kąta/ lub współczynnika refrakcji. Wielkości te wyznacza się kilkoma metodami, które ogólnie można podzielić na cztery grupy:

- 1/ wyznaczanie współczynnika refrakcji na podstawie pomiarów parametrów opisujących stan atmosfery;
- 2/ określanie współczynnika refrakcji bezpośrednio z mierzonych obserwacji geodezyjnych:
 - a/ na podstawie pomiarów odległości zenitalnych oraz odległości przestrzennych i przewyższeń geometrycznej niwelacji precyzyjnej,
 - b/ na podstawie pomiarów odległości zenitalnych obserwowanych na obu końcach mierzonej celowej;
- 3/ obliczanie współczynnika refrakcji jako niewiadomej w trakcie wyrównywania sieci geodezyjnych;
- 4/ wyznaczanie współczynnika refrakcji na podstawie dyspersji światła.

Szersze omówienie wpływu przedstawionych powyżej czynników kształtujących wielkość refrakcji pionowej oraz opis poszczególnych metod jej wyznaczenia znajduje się w rozprawie doktorskiej autora niniejszego opracowania [9].

Każda z metod wyznaczenia współczynnika refrakcji ma swoje zalety i wady, pozwalają one na określenie tego współczynnika w czterech różnych wariantach:

- dla całej sieci,
- oddzielnie dla każdego stanowiska,
- oddzielnie dla każdej celowej,
- oddzielnie dla każdej obserwacji jednostronnej.

Znakomita większość autorów ogranicza swe prace tylko do trzech pierwszych wariantów wyznaczenia współczynnika refrakcji. Takie postępowanie może być prawidłowe tylko w przypadku, gdy ogólnie rozumiane warunki obserwacji są jednakowe dla całej sieci bądź też na poszczególnych jej stanowiskach, czy celowych. W terenach o dużym zróżnicowaniu warunków obserwacji stosowanie trzech pierwszych wyżej wymienionych wariantów może spowodować wprowadzanie do obliczeń błędnych poprawek refrakcyjnych. Tak wprowadzane poprawki nie tylko nie poprawią, mogą nawet pogorszyć rezultaty wyrównania sieci. Przykładem dużego zróżnicowania terenowych warunków obserwacji są kopalnie odkrywkowe. Na tego rodzaju obiektach znaczna część punktów usytuowana jest na krawędziach wykopu odkrywki lub na krawędziach skarp zwalowych. W takich przypadkach warunki celowania na poszczególnych kierunkach

danego stanowiska mogą być bardzo różne, będą też niejednokrotnie inne na końcach danej celowej. Dlatego też, prowadząc prace pomiarowe na tego typu obiektach, stosować należy takie metody obserwacji i opracowania materiału polowego, aby można było określić na ich podstawie poprawki refrakcyjne dla poszczególnych obserwacji jednostronnych.

Metodą pozwalającą na osiągnięcie tego celu jest m.in. metoda regresji wielokrotnej zastosowana przez autora opracowania. Istotną cechą tej metody jest to, że w procesie przygotowawczym, przy wykonywaniu pomiarów oraz przy ustalaniu równań regresji wielokrotnej, można brać pod uwagę wszystkie przedstawione powyżej czynniki charakteryzujące warunki obserwacji.

CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU BADAWCZEGO ORAZ ZASADY REALIZACJI SIECI PRZESTRZENNEJ "TURÓW"

Kopalnia Węgla Brunatnego "Turów" znajduje się w południowo-zachodniej części Polski, na terenie Obniżenia Żytawsko-Zgorzeleckiego i obejmuje obszar ok. 60 km. Stanowią ją dwie odkrywki, Turów I, Turów II /obecnie ze sobą połączone/, zwałowiska wewnętrzne i zewnętrzne oraz szereg obiektów towarzyszących, zlokalizowanych na terenach przyległych /rys. 1/.

Teren kopalni charakteryzuje się znacznymi deniwelacjami naturalnymi i sztucznymi. Wysokości terenu naturalnego zawierają się w przedziale 230-425 m n.p.m. Sztucznie ukształtowane odkrywki pokładów węgla oraz zwałowiska zewnętrzne osiągają wysokość minimalną 105 i maksymalną 405 m n.p.m.

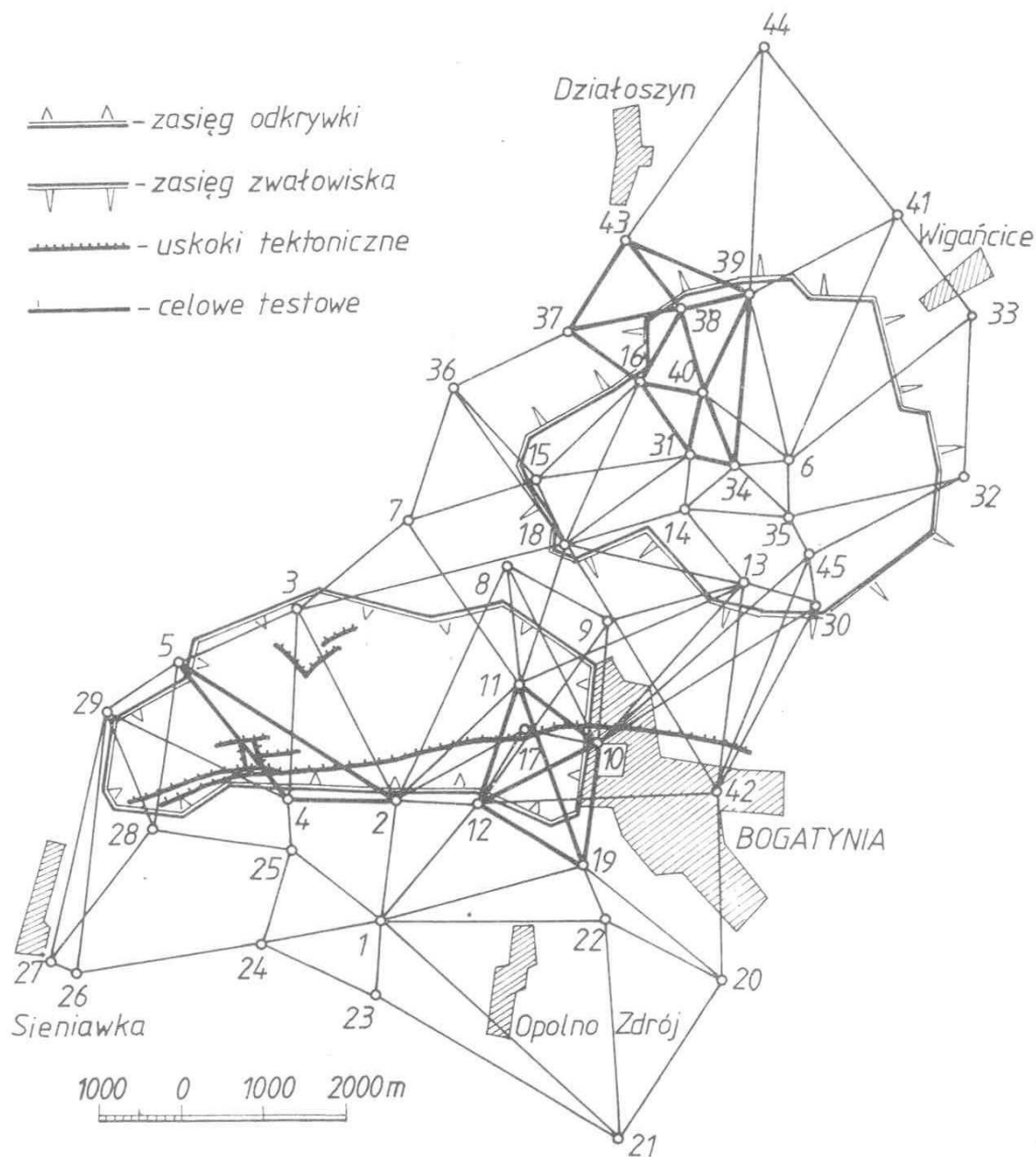
Na obiekcie znajdują się niewielkie obszary lasów, część zwałowisk jest zrekultywowana i porośnięta drzewami oraz krzewami.

Na terenie kopalni występuje duże nasycenie różnych urządzeń inżynierskich, takich jak:

- urządzenia technologiczne kopalni /koparki, zwałowarki, taśmociągi/,
- obiekty i urządzenia towarzyszące elektrowni "Turów",
- stacje przekaźnikowe i energetyczne linie przesyłowe wysokiego napięcia oraz inne budowle trwałe.

Dla terenu kopalni charakterystyczne są sztucznie ukształtowane formy powierzchniowe - ostro zakończone, wysokie skarpy odkrywek i zwałowisk o dużych nachyleniach zboczy dochodzących do 40%. Cały teren cechuje duża skala trudności dla realizacji wszelkich prac geodezyjnych.

Przy projektowaniu lokalizacji punktów sieci przestrzennej uwzględniona została budowa geologiczna i tektoniczna obiektu. Stabilne rejony wychodni granitu i bazaltu pozwoliły na lokalizację punktów /20,32,36/ mających istotne znaczenie dla badania deformacji górotworu. Przy usytuowaniu kilku punktów wzięto pod uwagę przebieg stwierdzonych uskoku tektonicznych. Sześć punktów zastabilizowano na krawędzi odkrywek, dwa w spągu odkrywek, a dziesięć na krawędziach oraz wierzchołkach zwałowisk zewnętrznych /rys. 1/.



Rys. 1. Szkic sieci przestrzennej "Turów"

- zasięg odkrywki
- zasięg zwałowiska
- uskoki tektoniczne
- celowe testowe

Fig. 1. "Turów" spatial network

- a range of opencost
- a range of mound
- tectonik jump
- testing sight lines

Stabilizację punktów sieci wykonano słupami betonowymi z głowicami do wymuszonego centrowania. Każdy punkt sieci posiada dwa znaki /repery/. wysokościowe: górny /boleć/, w głowicy znaku, służący do pomiaru wysokości instrumentu i tarczy celowniczej, oraz dolny, stanowiący punkt geometrycznej niwelacji precyzyjnej.

Pomiary kątów poziomych i odległości zenitalnych wykonano teodolitem Wild T-3, metoda kierunkową w czterech seriach. Obserwacje wykonano przy użyciu tarcz celowniczych specjalnie skonstruowanych /przez autora/ dla pomiarów w sieciach przestrzennych. Wysokości osi celowej instrumentu oraz tarczy celowniczej w stosunku do górnego reperu mierzono przymiarem liniowym z dokładnością 0,5 mm. Łącznie pomierzono 222 kąty poziome oraz 223 odległości zenitalne. Jednocześnie z pomiarami kątowymi dokonywano obserwacji wielkości opisujących stan atmosfery.

Obserwacje odległości przestrzennych wykonano tachymetrem elektrooptycznym Zeissa EOT 2000 /odległości do 2 km/ oraz dalmierzem elektrooptycznym AGA - Geodimetr 14 /odległości powyżej 2 km/. Pomierzono 157 odległości, wykonując każdą obserwację co najmniej sześciokrotnie. Oba dalmierze testowano na tej samej bazie doświadczalnej.

Na 45 punktów sieci przestrzennej "Turów" 36 punktów objęto pomiarem geometrycznej niwelacji precyzyjnej o dokładności odpowiadającej II klasie. Pomiary wykonano niwelatorem Ni 007 i wyrównano metodą pośredniczącą, na komputerze Odra 1204, przy pomocy programu WSN. Wyrównania dokonano z przyjęciem wysokości punktu - 11, stanowiącego równocześnie punkt centralny sieci przestrzennej. Wysokości punktów z niwelacji precyzyjnej, oprócz zastosowania ich do porównywania z wysokościami tych punktów uzyskanymi w procesie wyrównania sieci przestrzennej, posłużyły do obliczenia prawdziwych odległości zenitalnych. Obliczenia tych odległości dokonano w oparciu

o wzór:

$$z_{ik}^p = \arccos \frac{\cos \gamma_{ik} \cdot \Delta H_{ik}}{D} + \frac{1}{2} \gamma_{ik}, \quad /1/$$

gdzie:

- z_{ik}^p - prawdziwa odległość zenitalna,
- ΔH_{ik} - przewyższenie otrzymane z obliczeń niwelacji precyzyjnej,
- D_{ik} - odległość przestrzenna,
- γ_{ik} - kąt środkowy.

Łączna ilość obliczonych prawdziwych kątów zenitalnych wynosi 118.

Przed wyrównaniem sieci przestrzennej dokonano analizy dokładności materiału polowego.

Średni błąd kąta poziomego dla całej sieci obliczono na podstawie wzoru:

$$m_{\alpha} = \pm \sqrt{\frac{[f_{\alpha} f_{\alpha}]}{m n}} \quad /2/$$

gdzie:

- f_{α} - wartość niezamknięcia figury,
- m - ilość figur,
- n - ilość kątów w figurze.

Wynosi on: $m_{\alpha} = \pm 3,2^{cc}$ /do procesu wagowania przyjęto $m_{\alpha}^w = \pm 3,0^{cc}$ /

Ocenę dokładności pomiaru odległości zenitalnych dokonano w oparciu o własny program "BŁĄD" opracowany w języku Basic na mikrokomputer ZX - Spektrum. Analizowane odległości zredukowano wg wzoru:

$$z'_{ik} = z_{ik} - \Delta z_{ik} + r_{ik} - \frac{\delta'_{ik}}{2} \quad /3/$$

gdzie:

r_{ik} - poprawka refrakcyjna obliczona dla danego wariantu rozwiązania sieci

W wyniku działania programu uzyskano następujące parametry dokładnościowe:

- błąd średni odległości zenitalnej obliczony /dla 118 obserwacji/ na podstawie błędów prawdziwych ze wzoru:

$$M_z = \pm \sqrt{\frac{[\epsilon_z \epsilon_z]}{2}} \quad /4/$$

gdzie:

$\epsilon_z = z_{ik}^p - z'_{ik}$ - błąd prawdziwy,

- błąd średni obliczany /dla wszystkich 220 obserwacji/ na podstawie odchylek sum odległości zenitalnych ξ'_z mierzonych na obu końcach celowej:

$$m_z = \pm \frac{[\xi'_z \xi'_z]}{2n} \quad /5/$$

gdzie:

$\xi'_z = z'_{ik} + z'_{ki} - 200^g$

Wyniki obliczeń wielkości M_z i m_z zamieszczono w tab. 1 przedstawionej w dalszej części opracowania. Na ich podstawie określono wielkości m_z^w /zawarte w granicach $5^{cc} - 15^{cc}$ /, które przyjęto w procesie wagowania obliczeń.

Błędy średnie pomiaru odległości przestrzennych obliczono a priori na podstawie błędów standardowych podanych przez producentów dalmierzy:

dla EOT 2000 - $m_D = 5 \text{ mm} + 5 \text{ mm/km}$,

dla Geodimetru 14 - $m_D = 5 \text{ mm} + 3 \text{ mm/km}$.

Wartości tych błędów średnich - m_D^w , przyjęte w procesie wagowania, zawierają się w granicach 0,006 m - 0,015 m.

Obliczenia sieci przestrzennej zrealizowano wg koncepcji S. Caconia, przedstawionej w opracowaniu [3] na maszynie cyfrowej ODRA 1204 w oparciu o programy WSP-M i BSP. Orientacji przestrzennego układu X, Y, H dokonano na punkcie 11, przyjmując jako kierunek nawiązania kierunek 11 - 7. Należy zaznaczyć, że punkt 11 ma centralne położenie w stosunku do całej sieci, a także /co ma istotne znaczenie w procesie badania deformacji/ zlokalizowany jest na stabilnym wysadzie odkrywki Turów II.

Współrzędne X, Y punktów są dla wszystkich wariantów sieci przestrzennej takie same, a ich błędy średnie różnią się nieznacznie, co wynika z różnych wartości m_0 uzyskanych w poszczególnych wariantach.

OGÓLNE ZASADY REALIZACJI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

Dla określania wpływu czynników determinujących zmiany refrakcji pionowej przeprowadzono badania testowe oraz prace analityczno-obliczeniowe na wybranych fragmentach sieci przestrzennej "Turów".

Zakres prac badawczych obejmował:

- obserwacje odległości zenitalnych na wybranych celowych w różnych porach dnia i roku oraz w różnych warunkach atmosferycznych;
- rejestrację parametrów ilościowych określających te warunki atmosferyczne;
- rejestrację innych parametrów /czynników/ opisujących wpływ warunków środowiska na wartości pomierzonych odległości zenitalnych;
- opracowanie materiałów terenowych, obliczenia na EMC oraz wyznaczanie na ich podstawie kątów /poprawek/ refrakcji;
- wprowadzanie poprawek refrakcyjnych /obliczonych różnymi sposobami/ do pomierzonych odległości zenitalnych i wykonanie obliczeń sieci przestrzennej w różnych wariantach;
- analizę rezultatów obliczeń współrzędnych wysokościowych punktów sieci przestrzennej pod kątem zastosowania różnych sposobów określania poprawek refrakcyjnych.

Terenowe pomiary badawcze wykonano w trzech okresach: jesienią 1983, wiosną i latem 1985 r. Obejmowały one reprezentatywne fragmenty sieci przestrzennej.

Wyniki pomiarów testowych zestawiono w pięciu grupach danych, w zależności od okresu oraz rejonu wykonywania obserwacji badawczych. Charakterystykę poszczególnych grup przedstawiono w zestawieniu:

| Grupa pomiarów | Okres pomiarów | Rejon pomiarów /punkty sieci, na których wykonywano obserwacje/ | Ilość wykonanych obserwacji |
|----------------|---|--|-----------------------------|
| I | jesień- -październik, listopad 1983 | rejon A - teren odkrywki w pobliżu miasta Bogatynia /10, 11, 19/ | 172 |
| II | wiosna- - marzec, kwiecień 1985 | rejon A /10, 11, 19/ | 139 |
| III | wiosna- - marzec kwiecień 1985 | rejon B - teren odkrywki w pobliżu miejscowości Sieniawka /2, 4, 5/ | 81 |
| IV | lato- - lipiec, sierpień 1985 | rejon A /10, 11, 12, 19/ | 246 |
| V | lato- - lipiec, sierpień 1985 | rejon C - teren zwałowiska zewnętrznego /16, 31, 34, 37, 38, 39, 43/ | 192 |

Ogólna ilość obserwacji testowych wynosiła 830.

Badań doświadczalnych nie prowadzono w okresie zimowym. Wynika to m.in. z faktu, iż w praktyce geodezyjnej pomiary wykonuje się w czasie zimy bardzo rzadko. W tym okresie nie przewiduje się również powtórnych pomiarów sieci przestrzennej "Turów".

Pomiary odległości zenitalnych na testowych celowych wykonano teodolitem Wild T-3, w dwóch położeniach lunety, w interwałach czasowych od 15 do 30 min. w zależności od zmienności warunków atmosferycznych.

Równocześnie z pomiarem odległości zenitalnych dokonywano obserwacji warunków atmosferycznych takich jak:

- temperatura powietrza /dokładność odczytu $0,2^{\circ}\text{C}$ /,
- ciśnienie atmosferyczne /dokładność odczytu $0,2\text{ mm Hg}$ /,
- wilgotność względna powietrza /z dokładnością 1%/,
- prędkość wiatru /dokładność odczytu 1 m/s /.

Ponadto dla każdej obserwacji rejestrowane były czynniki takie, jak:

- zachmurzenie, określane w ułamku oznaczającym stopień zachmurzenia "nieba" w zakresie od 0 do $3/8$,
- położenie słońca względem celowej, określane w jednostkach umownych,
- widoczność, określana przez obserwatora subiektywnie w skali od 0 do 5.

OPRACOWANIE WYNIKÓW BADAŃ REFRAKЦИИ PIONOWEJ

Zastosowanie precyzyjnego dalmierza do pomiaru odległości powoduje, że dokładność określenia wysokości punktów w sieciach przestrzennych zależy od dokładności pomiarów odległości zenitalnych. Uzależniona jest ona w głównej mierze od szeregu czynników charakteryzujących środowisko w czasie pomiarów. Czynniki te określają bezpośrednio wielkość refrakcji pionowej. Zróżnicowany, w określonych warunkach pomiarowych, wpływ poszczególnych czynników i ich wzajemne powiązania stwarzają konieczność stosowania dynamicznych, a nie statycznych modeli zjawiska refrakcji.

Do określenia parametrów dynamicznego pola refrakcji dla opracowywanego obiektu zastosowano statystyczną metodę regresji wielokrotnej. Metoda ta, w której wykorzystuje się możliwie pełny zestaw parametrów opisujących warunki środowiska panujące podczas pomiarów, pozwala na obliczanie kątowej poprawki refrakcyjnej oddzielnie dla każdej pomierzonej odległości zenitalnej.

Oprócz metody regresji wielokrotnej zastosowano również inne sposoby określania poprawek refrakcyjnych. Stosowane analizy dotyczą obliczania współrzędnych wysokościowych punktów sieci przestrzennej "Turów" w 12 wariantach, różniących się wartościami odległości zenitalnych uwzględnionych w procesie wyrównania sieci. Różnice wynikają z zastosowania różnych sposobów określania poprawek refrakcyjnych.

Założenia przyjęte dla określenia tych poprawek w poszczególnych wariantach wyrównania sieci przestrzennej "Turów" przedstawiono w zestawieniu:

| Oznaczenie wariantu | Założenia przyjęte dla określenia kątowych poprawek refrakcyjnych |
|---------------------|--|
| 1 | Wartość kątowych poprawek refrakcyjnych równa zero |
| 2A 2B 2C | Stały współczynnik refrakcji: - dla całej sieci, przyjęty na podstawie piśmiennictwa - dla całej sieci, obliczony na podstawie testowych pomiarów odległości zenitalnych - oddzielnie dla każdego punktu sieci, obliczony na podstawie odległości zenitalnych pomierzonych w czasie obserwacji sieci |
| 3A 3B 3C | Podział sumarycznej refrakcji pionowej dla par zaobserwowanych odległości zenitalnych: - przy założeniu równości kątowych poprawek refrakcyjnych - na podstawie błędów średnich odległości zenitalnych pomierzonych na obu końcach celowej - na podstawie wysokości warstwy autokonwekcji oraz średnich wysokości celowania |
| 4A 4B 4C | Dynamiczny model refrakcji określony na podstawie równań regresji wielokrotnej: - liniowej w wersji 1 } przyjęto różne czynniki - liniowej w wersji 2 } opisujące model refrakcji - kwadratowej |
| 5A 5B | Zależność kątowej poprawki refrakcyjnej: - od średniej wysokości celowania - od średniej wysokości celowania i odległości |

Poprawione oraz wyrównane odległości zenitalne, a także obliczone współrzędne wysokościowe punktów sieci, porównywane są z wielkościami "prawdziwymi" uzyskanymi na podstawie geometrycznej niwelacji precyzyjnej.

Dla celów porównawczych rozwiązano sieć przestrzenną bez wprowadzania poprawek refrakcyjnych. Obliczenia te stanowiły 1. wariant rozwiązania sieci.

Obliczanie poprawek refrakcyjnych przy założeniu stałego współczynnika refrakcji dla całej sieci

W wariantcie 2A poprawki refrakcyjne obliczono na podstawie stałego współczynnika refrakcji wyznaczonego w oparciu o wyniki prezentowane w piśmiennictwie /p. [9]/. Obliczona średnia wartość współczynnika refrakcji, równa $k = 0,14$, posłużyła do obliczeń kątowych poprawek refrakcyjnych wg wzoru:

$$r_{ik} = k \frac{\rho^{cc}}{2R} D_{ik} \quad /6/$$

Przyjęte postępowanie, ponieważ opiera się o dane wyznaczone w różnych warunkach pomiarów, nie zawsze będzie poprawiało uzyskane rezultaty obliczeń. Bardzo często może je nawet pogarszać. Zostało ono przeprowadzone dla jego weryfikacji w warunkach KWB "Turów" oraz dla celów porównawczych.

W wariancie 2B średni współczynnik refrakcji obliczono na podstawie 830 obserwacji testowych. Współczynnik obliczony w oparciu o zależność:

$$k = \frac{2R}{D_{ik} \rho^{cc}} r_{ik}^p \quad /7/$$

gdzie:

$$r_{ik}^p = z_{ik}^p - z_{ik}'' \quad /8/$$

$$z_{ik}'' = z_{ik} + \Delta z_{ik} - \frac{\gamma_{ik}}{2} \quad /9/$$

wynosi $k = 0,09$. Stosunkowo niewielka, w porównaniu do zazwyczaj prezentowanych, wartość współczynnika refrakcji wynika z faktu, że pomiary w sieci wykonywane są z punktów naziemnych o wysokości przebiegu celowej przy stanowisku ok. 1,5 - 2,0 m. Jak wynika z piśmiennictwa, szczególne znaczenie dla przebiegu krzywej refrakcyjnej i wartości k ma konfiguracja terenu w pobliżu stanowisk obserwacyjnych. Poprawki refrakcyjne obliczono na podstawie wzoru /6/.

Obliczanie poprawek refrakcyjnych przy założeniu stałego współczynnika refrakcji oddzielnie dla każdego punktu sieci

Współczynnik refrakcji oddzielnie dla każdego punktu sieci przestrzennej wyznaczono jako średnią arytmetyczną, obliczoną na podstawie obserwacji odległości zenitalnych na wszystkich celowych pomierzonych /w czasie obserwacji sieci/ na tym punkcie - wariancie 2C.

Współczynniki dla poszczególnych celowych obliczono ze wzoru:

$$k = \frac{2R}{D_{ik} \rho^{cc}} r_{ik}' \quad /10/$$

gdzie:

$$r_{ik}' = \frac{\xi_z}{2}$$

Wartości ξ_z obliczono na podstawie wzoru:

$$\xi_z = /z_{ik} - \Delta z_{ik}/ + /z_{ki} - \Delta z_{ki}/ - 200^g - \gamma_{ik} \quad /11/$$

gdzie:

z_{ik}, z_{ki} - odległości pomierzone na końcach celowej,

$\Delta z_{ik,ki}$ - poprawki wynikające z różnicy wysokości osi celowej instrumentu i wysokości tarczy celowniczej.

Na podstawie obliczonych ze wzoru /10/ średnich wartości współczynników k dla poszczególnych punktów sieci - określono poprawki refrakcyjne dla wszystkich celowych danego punktu na podstawie wzoru /6/.

Obliczanie poprawek refrakcyjnych na podstawie sum odległości zenitalnych pomierzonych na obu końcach celowej

W wariantach 3A i 3B poprawki refrakcyjne obliczono przyjmując założenie, że wartości ξ_z obliczone na podstawie wzoru /11/ są wynikiem sumarycznych refrakcji pionowych dla poszczególnych par obserwacji, a suma pozostałych błędów występujących podczas pomiarów równa się zero:

$$\xi_z = r_{ik} + r_{ki} \quad /12/$$

Poprawki w wariacie 3A obliczono przyjmując równe ich wartości dla obu odległości zenitalnych pomierzonych na danej celowej. A więc:

$$r_{ik} = r_{ki} = \frac{\xi_z}{2} \quad /13/$$

Doświadczalnie stwierdzono [10], że wzajemny stosunek kątowych poprawek refrakcyjnych nie zawsze równa się 1 /jak w wariacie 3A/, ale jest w przybliżeniu niezmienny, tzn.:

$$\frac{r_{ik}}{r_{ki}} \approx \text{const.} \quad /14/$$

Wariant 3B opracowano stosując wzory na kątowe poprawki refrakcyjne uzyskane na podstawie badań własnych. Wykazano, że wartość iloczynu poprawek refrakcyjnych dla pary odległości zenitalnych jest zależna od wartości iloczynu zmian refrakcji występujących na obu punktach celowej. Zmiany refrakcji można przedstawić za pomocą błędu średniego, obliczonego na podstawie błędów pozornych:

$$m_{o_i} = \pm \sqrt{\frac{[1/\bar{z}_{ik} - z_{ik}^j/2]}{n-1}}; \quad m_{o_k} = \pm \sqrt{\frac{[1/\bar{z}_{ki} - z_{ki}^j/2]}{n-1}} \quad /15/$$

gdzie:

$\bar{z}_{ik}, \bar{z}_{ki}$ - średnia arytmetyczna wartość pomierzonych odległości zenitalnych na punktach I i K,

m_{o_i}, m_{o_k} - błąd średni obliczony dla punktów I i K,

n - ilość wszystkich pomiarów na danym punkcie,

j - oznaczenie kolejnego pomiaru.

Wykorzystując przedstawione powyżej założenia kątowe, poprawki refrakcyjne dla wariantu 3B obliczono wg wzorów:

$$r_{ik}^j = - \frac{m_{o_i} \cdot \xi_z^j}{m_{o_i} + m_{o_k}}; \quad r_{ki}^j = - \frac{m_{o_k} \cdot \xi_z^j}{m_{o_i} + m_{o_k}} \quad /16/$$

Obliczanie poprawek refrakcyjnych metodą regresji wielokrotnej

Istota tej metody, opisanej w pracy [1], polega na znalezieniu związków matematycznych między zmienną wynikową y /prawdziwy kąt refrakcji - r_{ik}^p / a zmiennymi objaśniającymi x_1, x_2, \dots, x_n /czynniki mające wpływ na refrakcję atmosferyczną/.

Ogólną postać równania regresji wielokrotnej można zapisać:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_px_p + e, \quad /17/$$

gdzie:

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_p$ - współczynniki regresji,
 e - błąd doświadczenia.

Obliczenia wykonano w oparciu o program "regr" [1] na emc ODRA 1204, osobno dla każdej grupy pomiarów badawczych oraz łącznie dla wszystkich obserwacji.

W wariancie 4A przyjęto zmienną wynikową $y_1 = r_{ik}^p$ oraz następujące czynniki:

- x_2 - temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
- x_3 - wilgotność [%]
- x_4 - ciśnienie [mm Hg]
- x_5 - prędkość wiatru [m/s]
- x_6 - położenie słońca względem kierunku celowej [jedn. umowna]
- x_7 - przewyższenie [m]
- x_8 - odległość [m]
- x_9 - charakterystyka profilu /określono przez średnią wysokość przebiegu celowej nad terenem - h_s [9]
- x_{10} - stopień zachmurzenia - $0 \div 10$
- x_{11} - widoczność - $0,0 \div 5,0$

Obliczenia wykonano dla poziomu istotności = 0,05 i po wyeliminowaniu czynników nieistotnych / x_3, x_6 / otrzymano równanie regresji wielokrotnej w postaci:

$$\begin{aligned} y = & -0,172,552547 + 0,106753 x_2 - 0,203700 x_4 + \\ & + 0,516289 x_5 + 0,052045 x_7 - 0,012174 x_8 + \\ & + 0,087136 x_9 - 0,653942 x_{10} - 2,640942 x_{11} \end{aligned} \quad /18/$$

Przyjmując obliczone wartości współczynników regresji zawarte w równaniu oraz wartości zmiennych objaśniających dla obserwacji wykonanych w sieci przestrzennej, obliczono kątowne poprawki refrakcyjne. Poprawione wg przedstawionych powyżej założeń odległości zenitalne posłużyły do obliczenia sieci przestrzennej.

Ocena wyników obliczeń uzyskanych przy zaproponowanym doborze czynników oraz obserwacji testowych uzasadniała konieczność przeprowadzenia weryfikacji materiału polowego oraz modyfikacji doboru czynników opisujących zjawisko refrakcji. W wyniku weryfikacji [9] wyeliminowano 180 obserwacji testowych.

w dalszych obliczeniach zastosowano dwie zmienne wynikowe:

$$y_1 = r_{ik} \text{ i } y_2 = \frac{r_{ik}}{D_{ik}} \text{ oraz następujące zmienne objaśniające:}$$

- x_3 - temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
- x_4 - wilgotność [%]
- x_5 - ciśnienie [mm Hg]
- x_6 - gęstość powietrza [g/m^3]
- x_7 - odległość [m]
- x_8 - przewyższenie [m]
- x_9 - prędkość wiatru [jedn. umowne]
- x_{10} - gradient temperatury [$^{\circ}\text{C}$]
- x_{11} - pora dnia [jedn. umowne]
- x_{12} - zachmurzenie [jedn. umowne]
- x_{13} - nachylenie celowej - jako wysokość celowej w odległości 100 m od stanowiska [m]
- x_{14} - odwrotność temperatury - $10000/t$ [$10000/^{\circ}\text{C}$]
- x_{15} - odwrotność kwadratu temperatury - $100000/t^2$ [$100000/^{\circ}\text{C}^2$]
- x_{16} - średnia wysokość przebiegu celowej nad terenem /wersja I - wysokość - h_s [m]
- x_{17} - średnia wysokość przebiegu celowej nad terenem /wersja II - wysokość - h_w [m]

Założenia przyjęte dla określenia wielkości zmiennych objaśniających oznaczonych numerami: 9, 10, 11, 12, 16 i 17 opisano w pracy [9].

Wykorzystując zweryfikowane obserwacje testowe oraz przedstawiony powyżej zestaw zmiennych objaśniających obliczono równanie regresji liniowej oraz równanie regresji kwadratowej w postaci:

$$\begin{aligned} y = & 43,959930 + 0,168734 x_3 + 0,028957 x_4 - \\ & - 0,054640 x_5 - 0,007575 x_7 + 0,036332 x_8 - \\ & - 0,087133 x_9 - 0,152421 x_{10} + 0,036332 x_{12} + \\ & + 0,002117 x_{13} - 0,198654 x_{17}; \end{aligned} \quad /19/$$

$$\begin{aligned} y_{KW} = & - 3855,435171 + 0,142638 x_4 + 10,532118 x_5 - \\ & - 0,011045 x_7 + 0,038568 x_8 - 0,743631 x_9 - \\ & - 0,169075 x_{10} + 0,590477 x_{12} - 0,012040 x_{14} - \\ & - 0,335691 x_{17} - 0,000908 x_4^2 - 0,007141 x_5^2 + \\ & + 0,000001 x_7^2 + 0,000564 x_8^2 + 0,020555 x_9^2 - \\ & - 0,000326 x_{10}^2 - 0,055074 x_{12}^2 + 0,000005 x_{14}^2 + \\ & + 0,002556 x_{17}^2 \end{aligned} \quad /20/$$

Na podstawie współczynników regresji z równań /19/ i /20/ oraz wartości zmiennych objaśniających dla obserwacji wykonanych w sieci przestrzennej - obliczono kątowne poprawki refrakcyjne oraz poprawione odległości zenitalne. Obliczenia wykonane w oparciu o równanie regresji wielokrotnej liniowej, stanowią wariant 4B, a kwadratowej - wariant 4C.

Obliczanie poprawek refrakcyjnych w oparciu o charakterystykę
przebiegu celowej nad terenem

Dla wyznaczania średniej wysokości przebiegu celowej nad terenem sporządzono profile terenowe wzdłuż celowych w skali 1:5000. Na każdym profilu pomierzono odległości celowej od terenu w kilku lub kilkunastu punktach /w zależności od długości celowej oraz ukształtowania terenu/. Średnią wysokość celowania wyznaczono dwoma sposobami. W pierwszym /wysokość - h_s / uwzględniono tylko fakt oddalania się kolejnego punktu na przekroju od stanowiska, w drugim /wysokość - h_w / również wysokość punktu nad terenem.

Wychodząc z założenia, że punkty pomiarowe rozmieszczone są na celowej z pewnym przybliżeniem równomiernie, w obliczeniach zastosowano wagi, których wartości zmniejszają się wraz z oddalaniem kolejnego punktu od stanowiska obserwacyjnego.

Odległość h_s obliczono wg wzoru:

$$h_s = \frac{\sum [h_i / n - i + 1 / 1]}{\sum / n - i + 1 / 1} \quad /21/$$

gdzie:

h_i - wysokość pomierzona na i -tym punkcie przekroju,

n - ilość punktów na danym przekroju,

i - numer kolejnego przekroju.

Przy obliczaniu wysokości h_w uwzględniono fakt, że istotny wpływ na wartości refrakcji mają te odcinki celowej, w których przebiega ona blisko terenu, a wraz ze wzrostem wysokości celowania wpływ ten maleje [6]. Przy takim założeniu wysokościami h_i nadano wagi dodatkowo w zależności od ich wartości. I tak, dla h_i od 0 do 10 m stosowano wagę $w = 3$, dla h_i od 10 do 20 m - wagę $w = 2$, a dla h_i większych od 20 m - wagę $w = 1$.

Wysokość h_w obliczono wg zależności:

$$h_w = \frac{\sum [h_i w_i / n - i + 1 / 1]}{\sum [w_i / n - i + 1 / 1]} \quad /22/$$

Obliczone średnie wysokości celowania posłużyły do określenia poziomej warstwy autokonwekcji. Jest to warstwa, dla której przebiegająca po jej górnej krawędzi celowa nie podlega wpływowi refrakcji. Grubość /wysokość/ warstwy autokonwekcji obliczono na podstawie, znanego z [6], przekształconego wzoru:

$$k = 6,637 \frac{P}{T^2} / 3,42 + \frac{dt}{dh} / \quad /23/$$

przez zastąpienie w nim trudnego do pomiaru gradientu temperatury $\frac{dt}{dh}$ wysokością przebiegu celowej, od której wielkość gradientu jest zależna. Zaproponowane wzory wynikowe mają postać:

$$r_{ik}^1 = D_{ik} A_1 \frac{P}{T^2} / H_{\alpha}^1 - h_s / ; \quad /24/$$

$$r_{ik}^2 = D_{ik} A_2 \frac{P}{T^2} / H_{\alpha}^2 - h_w / ,$$

gdzie:

$r_{ik}^{1,2}$ - prawdziwy kąt refrakcji,

$H_{\alpha}^{1,2}$ - obliczana wysokość warstwy autokonwekcji,

P - ciśnienie atmosferyczne [Pa],

T - temperatura [K],

A_1, A_2 - współczynniki proporcjonalności.

Obliczenia wysokości autokonwekcji wykonano dla 5. zbiorów danych odpowiadających grupom obserwacji badawczych. Obliczone wielkości H_{α}^i nie są równe, a ich wartości zależą od średnich wysokości celowania wg wzoru:

$$H_{\alpha}^i = 2,45 \text{ m} + 0,65 h_w \quad /26/$$

Korzystając z powyższej zależności określono wysokości autokonwekcji dla każdej celowej sieci przestrzennej. W oparciu o obliczone wartości H^i dokonano podziału odchyłki sumy pary odległości zenitalnych $/\xi_z/$, uzyskanych z pomiaru sieci, na poprawki refrakcyjne r_{ik} , r_{ki} obliczono zgodnie ze wzorami:

$$\Delta H^i = H^i - h_w^i ; \quad \Delta H^k = H^k - h_w^k ; \quad /27/$$

$$C = \frac{\xi_z^{ik}}{|\Delta H^i| + |\Delta H^k|} ; \quad /28/$$

$$r_{ik} = - C |\Delta H^i| ; \quad r_{ki} = - C |\Delta H^k| , \quad /29/$$

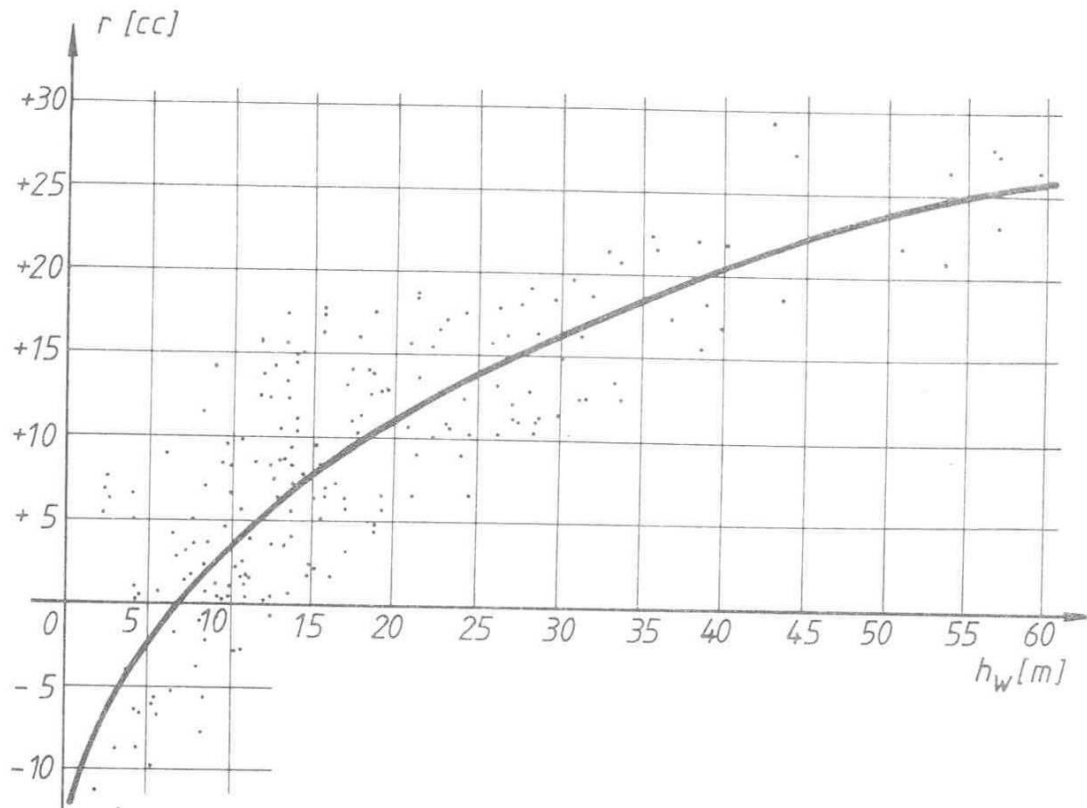
gdzie:

H^i, H^k - średnia wysokość przebiegu celowej nad /pod/ wyznaczoną warstwą autokonwekcji,

C - współczynnik proporcjonalności.

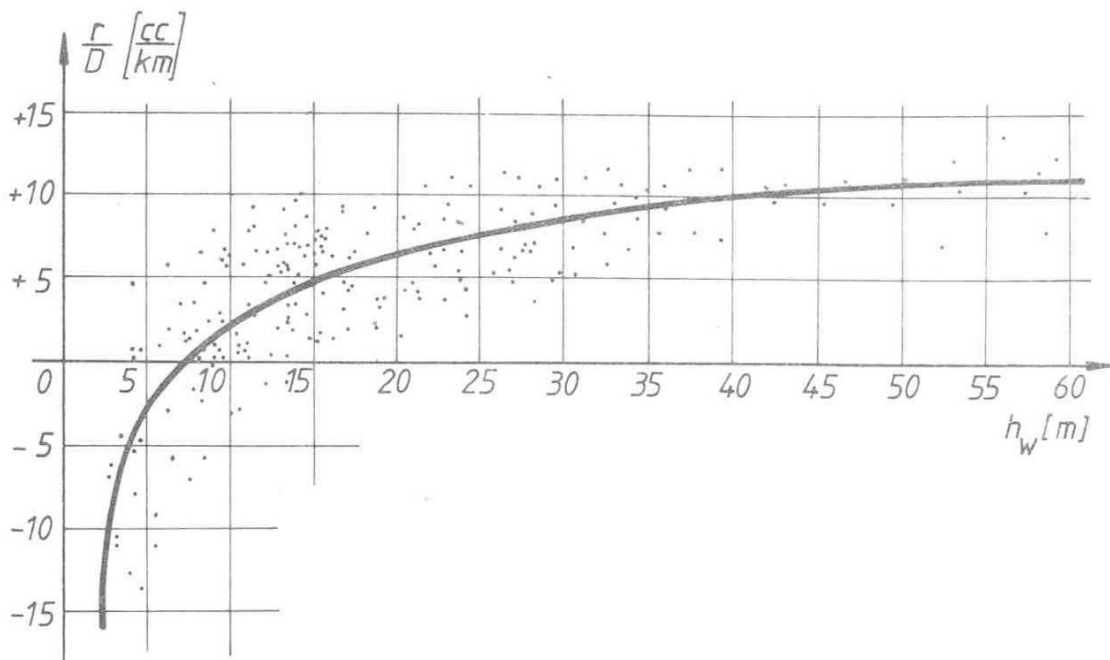
Obliczone poprawki refrakcyjne zastosowano do pomierzonych odległości zenitalnych i wykorzystano przy rozwiązaniu sieci przestrzennej - wariant 3C.

Analizując wielkości poprawek refrakcyjnych obliczonych na podstawie wzorów /29/, stwierdzono zależność tych poprawek od odpowiadających im wysokości h_w . Charakter tej zależności dla wszystkich celowych sieci przestrzennej "Turów" przedstawiono na rys. 2 i 3. Rys. 2 dotyczy poprawek r_{ik} obliczonych ze wzorów /29/, rys. 3 - poprawek r_{ik} podzielonych przez odpowiadające im długości celowych D_{ik} . Krzywe przedstawione na rys. 2 i 3 jako aproksymujące wielkości uzyskanych poprawek r_{ik} ; $\frac{r_{ik}}{D_{ik}}$ mają praktyczne znaczenie. Na ich podstawie można graficznie określić wartości poprawki refrakcyjnej dla dowolnej obserwacji, mieszczącej się w przedziale parametrów, charakteryzujących warunki środowiska pomiarów, w których wykonano obserwacje sieci.



Rys. 2. Wykres zależności kątowych poprawek refrakcji pionowej od średnich wysokości celowania

Fig. 2. Diagram of angle-refraction corrections dependency on mean heights of aiming



Rys. 3. Wykres zależności kątowych poprawek refrakcji pionowej od średnich wysokości celowania i odległości

Fig. 3. Diagram of angle-refraction corrections dependency on mean heights of aiming and distances

Określone na podstawie wykresów poprawki refrakcyjne posłużyły do poprawienia pomierzonych odległości zenitalnych, które wprowadzono do obliczeń sieci przestrzennej - warianty 5A i 5B.

ANALIZY REZULTATÓW BADAŃ

Ocena wpływu czynników środowiska na dokładność określania odległości zenitalnych

W celu porównania wyników uzyskanych z obliczenia sieci przestrzennej "Turów" w 12. wariantach - dokonano analizy odległości zenitalnych przed i po wyrównaniu sieci.

Odległości zenitalne wprowadzone do obliczeń scharakteryzowano przy pomocy następujących parametrów dokładnościowych:

- błędów średnich M_z , błędów przeciętnych Δ_z oraz błędów systematycznych Σ_z obliczanych na podstawie błędów prawdziwych:

$$M_z = \pm \sqrt{\frac{[\xi_z \xi_z]}{n}} \quad /30/$$

$$\Delta_z = \pm \frac{[|\xi_z|]}{n} ; \quad /31/$$

$$\Sigma_z = \frac{[\xi_z]}{n} \quad /32/$$

- błędów średnich m_z , błędów przeciętnych δ_z oraz błędów systematycznych σ_z obliczanych na podstawie par odległości zenitalnych:

$$m_z = \pm \sqrt{\frac{[\xi_z' \xi_z']}{2n}} \quad /33/$$

$$\delta_z = \pm \frac{[|\xi_z'|]}{n \sqrt{2}} \quad /34/$$

$$\sigma_z = \frac{[\xi_z']}{n \sqrt{2}} \quad /35/$$

Dokonano sprawdzenia występowania błędu systematycznego odległości zenitalnych dla poszczególnych wariantów rozwiązania sieci w oparciu o zależność [2]:

$$|\Sigma_z| \leq 0,25 \Delta_z ; \quad /36/$$

$$|\sigma_z| \leq 0,25 \delta_z , \quad /37/$$

Dla odległości zenitalnych wyrównanych określono następujące parametry dokładnościowe:

- błędy średnie M'_z oraz błędy przeciętne Δ'_z obliczone na podstawie błędów prawdziwych:

$$M'_z = \pm \sqrt{\frac{[\varepsilon_z \varepsilon_z]}{n}} \quad /38/$$

$$\Delta'_z = \pm \frac{[|\varepsilon_z|]}{n} \quad /39/$$

gdzie:

$$\varepsilon_z = z_{ik}^p - z_{ik}^w,$$

z_{ik}^w - odległość zenitalna wyrównana.

Zbiornicze zestawienie obliczeń przedstawionych powyżej błędów zawarto w tab. 1.

Tabela 1

Table 1

Zbiornicze wyniki analizy porównawczej odległości zenitalnych dla poszczególnych wariantów obliczeń sieci przestrzennej "Turów"
Cumulative results of verical coordinates comparison analyses for individual procedures of Spatial Network "Turów" calculating

| Oznaczenie wariantu Designation of procedure | Przed wyrównaniem Before adjustment | | | | | | Po wyrównaniu After adjustment | | | | |
|---|--|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|
| | $\pm M_z$ [cc] | Δ_z [cc] | Σ_z [cc] | $\pm m_z$ [cc] | δ_z [cc] | σ_z [cc] | $\pm M_z$ [cc] | Δ_z [cc] | $\pm m_z$ min [cc] | $\pm m_z$ max [cc] | $\pm m_z^6$ [cc] |
| 1 | 13.8 | 10.8 | +8.2 | 15.4 | 14.5 | +10.7 | 6.8 | 5.4 | 3.2 | 39.0 | 11.0 |
| 2A | 10.2 | 8.1 | -4.0 | 10.3 | 9.8 | - 7.4 | 6.2 | 5.0 | 2.2 | 24.9 | 7.2 |
| 2B | 10.4 | 8.1 | +0.1 | 9.4 | 9.2 | - 1.1 | 6.3 | 5.0 | 2.0 | 22.0 | 6.3 |
| 2C | 7.8 | 6.2 | 0.0 | 5.3 | 4.9 | + 0.5 | 6.1 | 4.9 | 1.1 | 9.3 | 3.0 |
| 3A | 6.9 | 5.6 | 0* | 0* | 0* | 0* | 6.2 | 5.0 | 1.4 | 13.9 | 4.2 |
| 3B | 8.0 | 6.3 | 0* | 0* | 0* | 0* | 6.8 | 5.2 | 1.6 | 17.3 | 5.1 |
| 3C | 6.1 | 5.0 | 0* | 0* | 0* | 0* | 5.7 | 4.4 | 1.2 | 10.6 | 3.4 |
| 4A | 10.1 | 7.9 | -1.2 | 8.5 | 8.4 | - 2.7 | 6.3 | 4.8 | 1.8 | 19.1 | 5.7 |
| 4B | 8.6 | 6.8 | +0.1 | 7.4 | 7.1 | - 1.5 | 6.2 | 4.9 | 1.6 | 15.8 | 4.8 |
| 4C | 8.1 | 6.3 | +0.6 | 7.0 | 6.6 | - 0.2 | 5.9 | 4.5 | 1.5 | 15.6 | 4.8 |
| 5A | 8.1 | 6.7 | +1.1 | 7.3 | 6.9 | + 0.5 | 5.6 | 4.3 | 1.5 | 15.5 | 4.7 |
| 5B | 8.0 | 6.0 | -0.3 | 7.4 | 7.4 | - 1.6 | 5.6 | 4.4 | 1.6 | 16.0 | 4.9 |

* - wielkość równa zero, co wynika z założeń przyjętych w danym wariantcie

- value is equal zero on the basis of the assumptions in this procedure

W tabeli przedstawiono również błędy średnie odległości zenitalnych uzyskane z wyrównania sieci przestrzennej. Dla każdego z 12. wariantów obliczeń podano minimalne, maksymalne oraz przeciętne wartości tych błędów $/m_z^{\max}, m_z^{\min}, m_z /$.

Analizując rezultaty zawarte w tabeli stwierdzić można, że korzystne wyniki uzyskano w wariantach 2C, 3A, 3C, 4C, 5A, 5B.

Założenia wykorzystane w wariantach 3A i 3C wymagają pomiarów na obu końcach celowej, w związku z tym mogą być stosowane tylko przy opracowywaniu wyników pomiarów obustronnych.

Rozwiązaniem pozwalającym na określenie poprawek refrakcyjnych dla każdej obserwacji /odległości zenitalnej/ jest metoda regresji wielokrotnej. Metoda ta, szczególnie przy zastosowaniu regresji kwadratowej, przynosi korzystne efekty dokładnościowe. Pewnym mankamentem tej metody jest to, że wymaga dużego nakładu pracy potrzebnego dla określenia równań regresji. Należy też, stosując tę metodę, dokonywać dodatkowych pomiarów parametrów określających warunki obserwacji. Jest więc ona metodą stosunkowo pracochłonną i powinna być stosowana przy pomiarach wymagających dużych precyzji wykonania, np. przy badaniach deformacji.

Szersze zastosowanie może mieć sposób określenia poprawek refrakcyjnych na podstawie wykresów przedstawionych na rys. 2 i 3 /warianty 5A i 5B/. Sposób ten może być wykorzystywany przy pomiarach jednostronnych.

Zdecydowanie gorsze rezultaty określenia odległości zenitalnej uzyskano w rozwiązaniu sieci przestrzennej, w którym nie wprowadzono poprawek refrakcyjnych /wariant 1/.

Obliczanie poprawek refrakcyjnych z przyjęciem stałego współczynnika refrakcji /wariant 2/ poprawiło wyniki w niewielkim zakresie. Wystąpiła w tym wypadku zmiana znaków błędów systematycznych $\sum z \delta z$ - obliczanych na podstawie zależności /32/ i /35/ - z dodatniego na ujemny. Fakt ten znajduje swe potwierdzenie w tym, że obliczony średni współczynnik refrakcji dla całego obiektu ma mniejszą wartość $/k = 0,09/$ od wartości współczynnika refrakcji przyjętego w tym wariancie $/k = 0,14/$.

Niekorzystna ocena dwóch pierwszych wariantów obliczeń sieci wynika też z faktu, iż odległości zenitalne wykorzystane w tych wariantach obarczone są błędem systematycznym, nie spełniają bowiem kryteriów podanych we wzorach /36/ i /37/. W pozostałych wariantach poprawione odległości zenitalne nie są obarczone błędem systematycznym, co potwierdza słuszność zastosowanych dla ich określenia sposobów określania poprawek refrakcyjnych.

Ocena dokładności określenia współrzędnej wysokościowej

Dokładność określenia współrzędnej wysokościowej - H została przeanalizowana dwoma sposobami. W pierwszym dokonano porównania wyników obliczeń współrzędnej H_t w 12. wariantach z wysokościami tych punktów uzyskanymi z precyzyjnej niwelacji geometrycznej H_g . Analizie poddano 31 z 45 punktów sieci. Drugi sposób dotyczy porównania błędów średnich określenia współrzędnej wysokościowej H_t . Ocena ta obejmuje wszystkie punkty sieci.

- Do analizy porównawczej zastosowano następujące parametry:
- błędy średnie M_H , błędy przeciętne Δ_H oraz błędy systematyczne Σ_H obliczane na podstawie błędów prawdziwych:

$$M_H = \pm \sqrt{\frac{[\varepsilon_H \varepsilon_H]}{n}} \quad /40/$$

$$\Delta_H = \pm \frac{[|\varepsilon_H|]}{n} \quad /41/$$

$$\Sigma_H = \frac{[\varepsilon_H]}{n} \quad /42/$$

gdzie:

$$\Sigma_H = H_g - H_t$$

- błędy średnie obliczone z wyrównania sieci przestrzennej /podano dla każdego wariantu minimalne - m_H^{\min} , maksymalne - m_H^{\max} oraz przeciętne - $m_H^{\bar{}}$ wartości tych błędów/.

Zbiorcze zestawienie obliczonych wielkości zawiera tab. 2.

Na podstawie wielkości wyznaczonych ze wzorów /41/ i /42/ dokonano analizy występowania błędu systematycznego określenia współrzędnej wysokościowej H_t dla poszczególnych wariantów obliczeń sieci przestrzennej wg kryterium [2]:

$$|\Sigma_H| \leq 0,25 \Delta_H \quad /43/$$

Analizując wyniki zawarte w tab. 2 można stwierdzić, że najkorzystniejsze rezultaty obliczeń współrzędnych wysokościowych - H_t uzyskano w wariantach: 2C, 3A, 3C, 4C, 5A i 5B. Można więc stwierdzić ich zbieżność z wynikami uzyskanymi dla pomierzonych i wyrównanych odległości zenitalnych. Warianty te, za wyjątkiem wariantu 2C, spełniają również kryterium określone wzorem /43/. Potwierdza to fakt wyeliminowania z obserwacji odległości zenitalnych błędów systematycznych.

Jeżeli nie uwzględnimy wariantów nie spełniających kryterium /43/ - warianty 1, 2C, 3B, 4A, 4B - wówczas różnice wartości wysokości H_t obliczone dla poszczególnych punktów sieci nie przekroczą 13 mm, przy średniej wartości skrajnych różnic 5,7 mm. Świadczy to o spójności wyników uzyskanych w pozostałych wariantach obliczeń sieci przestrzennej.

Podsumowując wyniki powyższych analiz, dla praktyki geodezyjnej polecać można sposób obliczania poprawek refrakcyjnych wg założeń zawartych w wariantach 4C, w których poprawki określono przy zastosowaniu empirycznego równania regresji wielokrotnej kwadratowej. Sposób ten, aczkolwiek pracochłonny, uwzględnia możliwie wszystkie czynniki opisujące dynamiczny charakter zjawiska refrakcji pionowej w przyziemnej warstwie atmosfery. Należy jednak zwrócić uwagę na to, by pomiary wykonywane były w tych samych porach roku, w podobnych warunkach atmosferycznych. W pracach, w których wymagane są mniejsze dokładności pomiarów, wykorzystać można założenia zastosowane w wariantach 3A, 3C, 5A i 5B.

Tabela 2

Table 2

Zbiornicze wyniki analizy porównawczej współrzędnej wysokościowej dla poszczególnych wariantów obliczeń sieci przestrzennej "Turów"

Cumulative results of zenith distances comparison analyses for individual procedures of Spatial Network "Turów" calculating

| Nr punktu Point no. | Różnice wysokości ϵ_H dla poszczególnych wariantów obliczeń w [mm] Difference of ϵ_H values for individual procedures of calculating [mm] | | | | | | | | | | | |
|------------------------|--|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| | 1 | 2A | 2B | 2C | 3A | 3B | 3C | 4A | 4B | 4C | 5A | 5B |
| 1 | + 2 | - 8 | - 7 | - 6 | - 7 | +16 | - 6 | -19 | -22 | -14 | - 4 | - 6 |
| 2 | + 9 | - 5 | - 5 | - 7 | - 5 | + 5 | - 6 | -13 | -17 | -11 | - 5 | - 7 |
| 4 | +19 | + 7 | + 7 | +10 | + 7 | +20 | + 8 | 0 | - 2 | + 2 | + 8 | + 6 |
| 5 | +30 | +19 | +19 | +10 | +19 | +32 | +18 | + 9 | +12 | +14 | +16 | +16 |
| 8 | -32 | - 9 | - 9 | -12 | - 9 | -15 | - 7 | -21 | -15 | - 7 | - 9 | - 7 |
| 9 | +15 | +20 | +21 | +16 | +21 | 0 | +19 | + 7 | +13 | +18 | +16 | +21 |
| 10 | + 3 | + 2 | + 2 | + 4 | + 2 | - 1 | + 1 | - 8 | - 8 | - 3 | 0 | + 1 |
| 12 | +15 | + 7 | + 7 | + 5 | + 7 | +13 | + 3 | - 5 | - 4 | - 2 | + 2 | + 5 |
| 15 | -16 | -18 | -17 | -12 | -18 | -18 | -18 | -33 | -29 | -15 | -19 | -16 |
| 16 | + 9 | + 8 | + 8 | +13 | + 7 | + 5 | + 7 | -18 | -13 | +10 | + 7 | + 9 |
| 19 | 0 | - 5 | - 5 | + 1 | - 5 | - 5 | - 6 | - 5 | - 7 | - 3 | - 7 | - 6 |
| 20 | +16 | +12 | +12 | + 7 | +12 | +32 | + 4 | - 7 | - 5 | + 5 | + 3 | + 7 |
| 21 | +23 | +15 | +15 | - 3 | +15 | +24 | + 4 | -30 | -25 | + 2 | + 5 | + 7 |
| 22 | + 6 | 0 | + 1 | + 5 | + 1 | - 3 | - 1 | - 5 | - 4 | 0 | - 1 | - 1 |
| 23 | +22 | +12 | +12 | +11 | +12 | +32 | +11 | - 4 | - 4 | + 5 | +11 | + 8 |
| 24 | + 7 | - 4 | - 4 | + 3 | - 4 | +17 | - 4 | -20 | -15 | - 7 | - 3 | - 5 |
| 25 | +18 | + 7 | + 7 | +13 | + 7 | +23 | + 8 | 0 | 0 | + 4 | + 8 | + 6 |
| 26 | +31 | +20 | +20 | +25 | +18 | +28 | +18 | + 6 | + 4 | +14 | +17 | +16 |
| 27 | +16 | + 5 | + 5 | +10 | + 3 | +17 | + 3 | - 8 | -10 | 0 | + 1 | 0 |
| 28 | +16 | + 5 | + 5 | 0 | + 4 | +31 | + 9 | - 5 | - 6 | - 3 | + 4 | + 3 |
| 30 | - 5 | - 7 | - 7 | - 2 | - 8 | + 6 | - 6 | -27 | -24 | - 3 | -10 | - 4 |
| 31 | -19 | -20 | -20 | -15 | -20 | -22 | -21 | -48 | -41 | -20 | -20 | -18 |
| 33 | + 3 | + 5 | + 6 | + 1 | + 9 | +16 | + 2 | - 3 | 0 | + 6 | + 5 | + 8 |
| 36 | +14 | +11 | +11 | + 9 | +10 | +18 | + 8 | - 6 | - 3 | + 7 | +10 | +11 |
| 37 | - 5 | - 8 | - 8 | - 1 | - 8 | - 2 | - 7 | -20 | -23 | - 5 | - 6 | - 4 |
| 38 | + 1 | 0 | 0 | + 9 | 0 | 0 | + 1 | -18 | -17 | + 5 | + 2 | + 4 |
| 39 | - 9 | -11 | -10 | - 5 | -10 | -11 | - 7 | -26 | -27 | - 8 | - 9 | - 6 |
| 40 | - 9 | - 9 | - 9 | - 2 | -10 | -10 | - 8 | -33 | -27 | - 4 | - 9 | - 6 |
| 41 | -14 | -16 | -14 | -13 | -13 | -22 | -12 | -25 | -22 | - 9 | -12 | -10 |
| 43 | + 8 | + 7 | + 7 | +15 | + 7 | + 7 | + 8 | -10 | -12 | +10 | + 9 | +11 |
| 44 | +22 | +21 | +22 | +38 | +22 | +35 | +22 | +11 | +10 | +26 | +23 | +20 |
| $\pm M_H$ | 15.9 | 11.5 | 11.4 | 11.9 | 11.3 | 18.9 | 10.3 | 18.4 | 18.1 | 9.9 | 10.7 | 9.7 |
| Δ_H | 13.4 | 9.8 | 9.7 | 8.8 | 9.4 | 15.7 | 8.5 | 14.5 | 13.6 | 7.5 | 8.4 | 8.2 |
| Σ_H | +4.5 | +2.0 | +2.3 | +4.1 | +2.1 | +8.2 | +1.9 | -12.2 | -11.1 | -0.8 | 0.0 | +1.0 |
| $\pm m_H^{\min}$ | 16.2 | 11.0 | 9.9 | 5.8 | 6.9 | 8.1 | 5.9 | 8.9 | 7.9 | 5.8 | 7.7 | 8.0 |
| $\pm m_H^{\max}$ | 44.3 | 30.0 | 27.1 | 15.8 | 18.9 | 22.1 | 16.1 | 24.4 | 21.5 | 16.2 | 21.0 | 21.7 |
| $\pm m_H^6$ | 27.2 | 18.5 | 16.6 | 9.9 | 11.6 | 13.6 | 9.9 | 15.0 | 13.2 | 9.8 | 12.9 | 13.3 |

WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

Na podstawie przeprowadzonych badań terenowych oraz analiz rozwiązania sieci przestrzennej "Turów" można sformułować następujące wnioski:

1. Przedstawione w opracowaniu modele refrakcji pionowej mają charakter ogólny w odniesieniu do metodyki postępowania. Zostały one zweryfikowane na obiekcie KWB "Turów". Zastosowane konkretne wzory na obliczanie kątowych poprawek refrakcyjnych słuszne są dla tego obiektu oraz dla innych obszarów o podobnych warunkach charakteryzujących środowisko, w którym przeprowadzane są pomiary geodezyjne.

2. Dokładność określenia odległości zenitalnej i współrzędnej wysokościowej w lokalnej sieci przestrzennej w znacznym stopniu zależy od sposobów obliczania kątowych poprawek refrakcyjnych.

3. Najkorzystniejsze parametry dokładnościowe wyznaczania odległości zenitalnej /a więc i obliczania współrzędnej wysokościowej/ uzyskano przy zastosowaniu regresji wielokrotnej kwadratowej, w której do sformułowania modelu refrakcji wykorzystuje się możliwie pełny zestaw parametrów ilościowych i jakościowych charakteryzujących środowisko, w którym wykonano pomiary. Sposób ten pozwala na określenie kątowych poprawek refrakcyjnych indywidualnie dla każdej obserwacji /celowej jednostronnej/.

4. Stosując różne warianty rozwiązania sieci przestrzennej "Turów" uzyskano przeciętne /dla wszystkich punktów/ wartości błędów określenia współrzędnej wysokościowej od $\pm 9,8$ mm do $\pm 27,2$ mm. Dla wariantów poprawnych, tzn. tych, w których błędy systematyczne spowodowane refrakcją zostały wyeliminowane, uzyskano:

- przy zastosowaniu /do obliczeń kątowych poprawek refrakcyjnych/ stałego współczynnika refrakcji oddzielnie dla każdego stanowiska /wariant 2C/ -
- $m_H = \pm 9,9$ mm,
- przy zastosowaniu równego podziału kąta refrakcji połowej /wariant 3A/ -
- $m_H = \pm 11,6$ mm,
- przy zastosowaniu podziału kąta refrakcji połowej w oparciu o wysokość warstwy autokonwekcji oraz o średnią wysokość celowania /wariant 3C/ -
- $m_H = \pm 9,9$ mm,
- przy wykorzystaniu równań regresji wielokrotnej kwadratowej /wariant 4C/-
- $m_H = \pm 9,8$ mm,
- przy wykorzystaniu zależności poprawek refrakcyjnych od średniej wysokości celowania /wariant 5A/ - $m_H = \pm 12,9$ mm oraz od średniej wysokości celowania i odległości /wariant 5B/ - $m_H = \pm 13,3$ mm.

5. Wyrównanie sieci przestrzennej z wprowadzonymi poprawkami dla każdej celowej pozwala na uzyskanie dokładności określenia współrzędnej wysokościowej na poziomie dokładności określenia współrzędnych X, Y. Przeciętne wartości błędów średnich określenia współrzędnych punktów wynoszą:

$m_X = \pm 8,5$ mm, $m_Y = \pm 8,2$ mm, $m_H = \pm 9,8$ mm. Powyższy wniosek potwierdza zalety zaproponowanej koncepcji sieci geodezyjnej, która łączy sieć poziomą z wysokościową /niwelacja trygonometryczna/ w jedną przestrzenną konstrukcję.

Terenowe pomiary badawcze oraz ich kameralne opracowania pozwalają sformułować, oprócz wniosków, następujące uwagi:

- pomiary odległości zenitalnych najkorzystniej jest wykonywać w dni pochmurne, przy niewielkim wietrze oraz w tzw. "okresach spokojnych obrazów", tj. między godzinami 7⁰⁰-9⁰⁰ i 16⁰⁰-18⁰⁰;
- wybór sposobu określenia kątowych poprawek refrakcyjnych zależy od wymagań dokładnościowych wykonywanych pomiarów oraz od możliwości sprzętowych i czasowych zespołów wykonujących dany rodzaj pomiarów geodezyjnych;
- pozytywne rezultaty określenia poprawek refrakcyjnych dla pomiarów odległości zenitalnych na obu końcach celowej - w pełni uzasadniają stosowanie tego sposobu obserwacji; korzystniejsze dokładności uzyskuje się przy zastosowaniu obserwacji jednoczesnych z wykorzystaniem dwóch teodolitów, co nie zawsze znajduje możliwość szerszego zastosowania.

Obliczone wg zaproponowanych sposobów poprawki refrakcyjne do odległości zenitalnych służyć mogą do redukcji obserwacji w kolejnych, cyklicznych pomiarach sieci mających na celu badanie deformacji terenu. Mogą być też wykorzystywane przez służbę geodezyjną KWB "Turów" w pracach realizacyjnych i inwentaryzacyjnych.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Bartkowiakowa A.: Opis merytoryczny programów statystycznych. Wyd. Uniw. Wrocław., Wrocław 1982.
- [2] Boliszakow W.D., Gajdajew P.A., Teorija matematičeskoj obrabotki giediezičeskich izmierienij, NEDRA, Moskwa 1977.
- [3] Cacoń S.: Zesz. nauk. AR Wrocław, Rozprawy nr 25, 1980.
- [4] Cacoń S., Kontny B., Mąkowski K., Stopyra R.: Zesz. nauk. AR Wrocław, Geodezja i Urządzenia Rolne IV, z. 167, 1987, 59-69.
- [5] Hradilek L.: Vysokohorska geodezie. Academia, Praha 1984.
- [6] Izotow A.A., Piellinen L.P.: Issledowanije ziemnoj refrakcji i metodow giediezičesko niwelirowanija. Trudy CNIIGAIK 102, Moskwa 1955.
- [7] Makowska A.: Trójwymiarowa sieć geodezyjna w Tatrach Polskich, Materiały II Sympozjum PAN "Współczesne problemy podstawowych sieci geodezyjnych", Warszawa 1980.
- [8] Mayer M.: Theoretische Untersuchungen über die Genauigkeit der dreidimensionalen terrestischen Punktbestimmung - Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 244, München 1978.
- [9] Mąkowski K.: Wpływ warunków środowiska kopalni odkrywkowej na dokładność określenia odległości zenitalnej i współrzędnej wysokościowej w sieci przestrzennej. Katedra Geodezji i Fotogrametrii AR Wrocław. 1987 /rozprawa doktorska/.
- [10] Winogradow W.W., Miedowikow A.S.: Izwiestja, Giediezja i Aerofotosioma 1, 1936, 45-52.

THE INFLUENCE OF OPEN PIT ENVIRONMENT ON ACCURACY OF DETERMINING
OF ZENITH DISTANCES AND VERTICAL COORDINATES OF SPATIAL NETWORK
POINTS

S u m m a r y

This paper is applied to elimination of vertical refraction influence on accuracy of determining of zenith distances and vertical coordinates of spatial network points. This problem is solved on the basis of results of investigations made in spatial network KWB "Turów". Methods of evaluations the refraction angle corrections to zenith distances are presented. Multiple regression method was used. Point coordinates, calculated in 12 alternative procedures, are compared with the "true" values, which are determined on the basis results of precision levelling. The "best" results are achieved for the model, assumed individual refraction coefficient separately for each direction.