

JERZY JANUSZ

LINIOWA NIWELACJA TRYGNOMETRYCZNA

ZARYS TREŚCI: Przedstawiono sposób wykonywania pomiaru ciągów niwelacyjnych metodą liniowej niwelacji trygonometrycznej z wykorzystaniem precyzyjnego tachimetru elektronicznego i dwóch luster dalmierczych z tarczami celowniczymi na tyczkach o jednakowej długości, z regulowanymi podpórkami.

1. WPROWADZENIE

Pomiary niwelacyjne na obszarach cechujących się bogatą rzeźbą terenu są znacznie utrudnione w związku z koniecznością skracania odstępów między stanowiskiem niwelatora i miejscami ustawiania łąt. Są one na tych terenach w większym stopniu obciążone niekorzystnymi wpływami refrakcji atmosferycznej oraz różnic długości podziału łąt. Stwierdzano to w wyniku wielu badań terenowych i z tego powodu próbowano w rozmaity sposób ulepszyć metodykę pomiarów wykonywanych metodą niwelacji geometrycznej. Szczególnie utrudnione są pomiary wykonywane metodą niwelacji precyzyjnej o najwyższej wymaganej dokładności, mające na celu wyznaczenie osiadań obiektów hydrotechnicznych, gdzie z natury rzeczy mamy do czynienia z dużymi deniwelacjami i stromymi podejściami na trasach ciągów.

Współczesny rozwój nowoczesnych instrumentów geodezyjnych umożliwia podjęcie innych prób rozwiązania problemu – nie przez ulepszenie metody niwelacji geometrycznej, lecz przez zastąpienie jej na terenach o dużych nachyleniach odpowiednio zmodyfikowaną metodą niwelacji trygonometrycznej. Znane mi próby w tym zakresie podjęte zostały już na początku lat dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia (Krack K., Schodlbauer A., Widmann R. 1990), lecz jak dotychczas nie zyskały one odpowiedniego stopnia zainteresowania i przygotowania technologicznego umożliwiającego praktyczne stosowanie. Interesujące próby w tym względzie omówione są w pracy (Aksoy A., Franke P., Witte B.I., Yalin D. 1994).

Próby poczynione w tym zakresie w celu rozwiązania niezwykle uciążliwego problemu pomiarów osiadań dużego obiektu hydrotechnicznego, na którym konieczne jest okresowe niwelowanie ponad tysiąca reperów, w bardzo krótkim okresie ustabilizowanego stanu obciążeń użytkowych obiektu, przyniosły wyniki zachęcające do dalszych badań i szerszego zastosowania zmodyfikowanej niwelacji trygonometrycznej o wysokiej dokładności. Głównym walorem stosowania w terenie o dużych nachyleniach niwelacji trygonometrycznej w miejsce niwelacji geometrycznej, jest kilkukrotne przyspieszenie pomiarów i zmniejszenie nakładu pracy.

2. ZASADA POMIARU

Niwelacja trygonometryczna kojarzy się na ogół z wyznaczaniem różnicy wysokości pary punktów terenowych przez pomiar z jednego z tych punktów odległości poziomej i kąta zenitalnego do drugiego punktu, następnie z wykonaniem takich samych pomiarów z punktu drugiego na pierwszy w celu ograniczenia w średniej z wyników wpływu refrakcji atmosferycznej. Z takim użyciem niwelacji trygonometrycznej wiążą się zawsze czynności dodatkowe, służące wyznaczaniu wysokości celu i osi obrotu lunety nad reperami, których różnicę wysokości należy wyznaczyć.

Powstanie tachimetrów elektronicznych, umożliwiających zaprogramowanie bezpośredniego pomiaru różnic wysokości, bez konieczności osobnego odczytu odległości (lub obliczania jej ze znanych uprzednio współrzędnych) i odczytu kąta zenitalnego oraz obliczania na podstawie tych danych różnicy wysokości, przyczyniło się do znacznego usprawnienia – zwiększenia zasięgu i dokładności wykonywania pomiarów tachimetrycznych. Stwarza ono również możliwość **sprawnego prowadzenia pomiarów metodą niwelacji trygonometrycznej w schemacie zbliżonym do pomiaru ciągu niwelacji geometrycznej**, którą nazywam tu **liniową niwelacją trygonometryczną** (w pracy – Krack K, Schodlbauer A., Widmann R. 1990 – użyte jest do tego celu wyrażenie „niwelacja skokowa”). Zgodnie ze schematycznym rysunkiem 1, pomiar ciągu metodą niwelacji geometrycznej pokazany na rysunku 1a może zostać zastąpiony pomiarem metodą liniowej niwelacji trygonometrycznej jak na rysunku 1b i 1c. W rezultacie takiego zastosowania niwelacji trygonometrycznej, wyznaczanie różnicy wysokości celu i osi obrotu lunety zostaje zastąpione wyznaczaniem różnicy wysokości dwu celów jako różnicy przewyższeń zmierzonych ze stanowiska, bez znajomości wysokości punktu, nad którym ustawiony jest instrument. Ma to istotny walor w porównaniu z klasycznie traktowaną niwelacją trygonometryczną. Uproszczenie postępowania i zwiększenie dokładności następuje głównie przez posługiwanie się dwoma (lub jednym) lustrami dalmierzowymi z celownikami na dwóch tyczkach o jednakowej długości, ustawianymi na żabkach lub reperach.

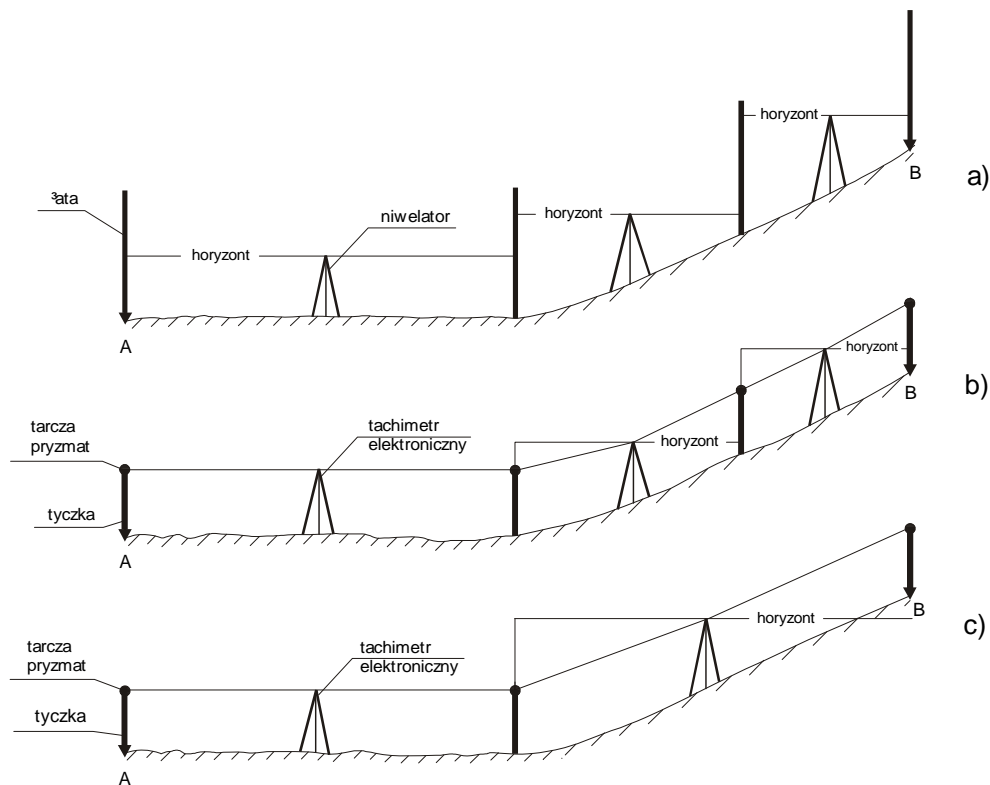
Jak wiadomo, przy pomiarach niwelacyjnych mamy do czynienia ze szkodliwym wpływem refrakcji atmosferycznej. W niwelacji geometrycznej pomija się ten wpływ, zakładając, że przy jednakowych odległościach od instrumentu do łąty „wstecz” i „w przód” wpływy te redukują się. Jednak założenie to ma charakter uproszczony, bowiem nie uwzględnia faktu, że wartość współczynnika refrakcji jest zależna od rodzaju podłoża, nad którym przebiega celowa i od wysokości celowej nad tym podłożem. Szczególnie niekorzystnie może się to ujawnić w terenach nachylonych, gdzie celowe „wstecz” i „w przód” przebiegają na różnicowanych wysokościach nad podłożem (rys. 1a).

Pierwszą przewagę liniowej niwelacji trygonometrycznej nad niwelacją geometryczną pokazuje rysunek 1b. Polega ona na tym, że w terenie pochyłym odległość celowej od podłoża może być w mniejszym stopniu zróżnicowana, jeśli przyjmie się, że łąty niwelacyjne zostają zastąpione tarczami celowniczymi i przyrządami dalmierzowymi osadzonymi na tyczkach o **jednakowej długości**, równej w przybliżeniu wysokości ustawiania instrumentu. Można się spodziewać, że przy takim użyciu metody niwelacji trygonometrycznej, z powodu jednakowej wysokości celowych nad podłożem, wyniki pomiarów będą w mniejszym stopniu uzależnione od szkodliwych wpływów refrakcji atmosferycznej niż wyniki niwelacji geometrycznej.

Druga istotna przewaga tak stosowanej niwelacji trygonometrycznej nad niwelacją geometryczną wynika z tego, że w terenach o dużym nachyleniu, odległości poziome między stanowiskiem niwelatora i stanowiskami łąt muszą być skracane w stosunku do odległości, przy których w terenie poziomym można uzyskać wystarczająco dokładne rezultaty, bowiem celowa pozioma do łąty ustawionej wyżej trafia na łątę zbyt blisko terenu lub w ogóle wchodzi „w teren” pod łątę. Podczas pokonywania niwelacją geometryczną stromego zbocza jest to wada dotkliwa, zmuszająca niekiedy wykonawcę do skracania odległości między instrumentem i łątami do kilku metrów. W takim przypadku przy użyciu metody niwelacji trygonometrycznej możemy w terenie pochyłym stosować długości celowych nie zmniejszone w stosunku do długości celowych stosowanych w terenie poziomym, osiągając istotne korzyści ekonomiczne i organizacyjne. Pokazuje to wyraźnie rysunek 1c, na którym rozmieszczenie stanowisk niwelacji trygonometrycznej jest jednolite co do odległości poziomych, nie ograniczone przez nachylenie terenu.

Trzecia przewaga tak stosowanej niwelacji trygonometrycznej nad niwelacją geometryczną wynika z tego, że nie zachodzi potrzeba korzystania z łąt, które do pokonywania terenu nachylonego muszą być znacznie dłuższe niż wysokość ustawienia niwelatora (stosowane są na ogół łąty 3 m w przypadku niwelacji precyzyjnej i 4 m w przypadku niwelacji technicznej, przy przeciętnej wysokości ustawiania niwelatora ok. 1,6 m). Do niwelacji trygonometrycznej najkorzystniej jest stosować tarcze celownicze i przyrządy

dalmiercze usytuowane na tyczkach o długości równej w przybliżeniu wysokości osi obrotu lunety nad terenem, wówczas bowiem możliwe jest wspomniane wcześniej ograniczenie zróżnicowań odległości celowych od powierzchni terenu, co sprzyja osiągnięciu zbliżonych do siebie wartości współczynnika refrakcji na celowej „wstecz” i „w przód” i efektywniejszemu znoszeniu się jego wpływu na wyniki pomiarów. Tyczki tarczy i pryzmatu dalmierczego o takiej długości są znacznie mniej uciążliwe do transportowania niż znacznie dłuższe od nich łąty, bowiem mogą być transportowane bez bagażnika dachowego. Jest to cecha bardzo istotna w przypadku korzystania z samochodu osobowego, nieprzydatnego do transportowania łąt długości 3 m.



Rys. 1

Czwarta przewaga polega na tym, że – zastępując łąty tarczami i pryzmatami – eliminujemy konieczność sprawdzania zgodności długości podziału łąt z obowiązującą nominalną wartością jednostki długości,

pozostawiając jedynie obowiązek sprawdzania, czy wysokość tarcz i przyrządów nad stopkami tyczek jest w komplecie jednakowa. Tego rodzaju sprawdzenie może być z wystarczającą dokładnością dokonane w terenie, samodzielnie przez wykonawcę pomiarów, bez konieczności korzystania z usług laboratorium komparacyjnego. Należy jednak wspomnieć, że w gruncie rzeczy, przy zastosowaniu liniowej niwelacji trygonometrycznej podział łąt zostaje zastąpiony przez podział różnic wysokości mierzonych stacją totalną, w związku z czym obowiązek komparacji łąt zostaje tu zastąpiony obowiązkiem komparowania dalmierza stacji totalnej.

Pewną ujemną cechą liniowej niwelacji trygonometrycznej w stosunku do niwelacji geometrycznej jest znacznie większy koszt i ciężar tachimetru elektronicznego niż niwelatora, jednak może to być kompensowane istotnym zmniejszeniem liczby stanowisk przy pomiarach w terenie nachylonym. W tym zakresie autor uzyskał istotne doświadczenie przy pomiarach niwelacyjnych reperów na dnie zbiornika wodnego elektrowni szczytowo-pompowej, dokonanych po jego opróżnieniu. Mianowicie nawiązanie niwelacji dna zbiornika do reperów odniesienia poza zbiornikiem wymagało wejścia na obwałowanie o wysokości rzędu 20 m ciągami niwelacji geometrycznej, zawierającymi po 6–8 stanowisk i zejścia ciągami niwelacji geometrycznej po zewnętrznej skarpie obwałowania w kierunku do stałych reperów odniesienia, które zostało zastąpione pomiarem trygonometrycznym różnic wysokości z pojedynczych stanowisk zlokalizowanych na koronie obwałowania. Przyspieszyło to w istotny sposób prowadzenie pomiarów.

3. WYMAGANIA DOTYCZĄCE SPRZĘTU DO LINIOWEJ NIWELACJI TRYGONOMETRYCZNEJ

Przy wykonywaniu pomiarów metodą niwelacji geometrycznej możemy na ogół posługiwać się łątami ustawianymi na reperach i żabkach, trzymanymi przez pomiarowych, którzy w celu ich pionowego sytuowania korzystają z libeli sferycznej. Drobne odchylenia od pozycji pionowej i nieznaczne zmiany nachylenia łąty w czasie wykonywania pomiaru nie mają w niwelacji technicznej istotnego wpływu na wyniki z uwagi na prostopadłość celowej do podziału łąty. Również w niwelacji precyzyjnej często zaniedbuje się utrwalenia pozycji łąt na czas pomiaru bez dużej szkody dla wyników (choć oczywiście przy pomiarach o najwyższych wymaganiach dokładnościowych jest możliwe i zalecane stosowanie podpórek łąt).

W przypadku niwelacji trygonometrycznej, prowadzonej z wykorzystaniem stacji totalnej, tarcz i przyrządów na tyczkach nośnych, konieczne jest zachowanie pionowości tyczek z dokładnością podobną do dokładności pionowego sytuowania łąt, natomiast warunek ich nieruchomości w czasie wykonywania pomiaru jest znacznie bardziej kategoryczny, co wynika z odchylenia celowej od prostopadłości do osi

pionowo ustawionej tyczki. Z tego powodu tyczki takie zawsze muszą być zaopatrzone w regulowane podpórki, które po osiągnięciu przez tyczkę pozycji pionowej zostają na czas pomiaru unieruchomione po to, aby po precyzyjnym nacelowaniu nitką poziomą tachimetru na tarczę/pryzmat (któremu odpowiada automatyczny odczyt kąta zenitalnego) nie uległa ona poruszeniu przed zakończeniem pomiaru odległości.

Jeśli posługujemy się kompletem dwóch tarcz i pryzmatów na tyczkach, to osiągnięcie dużej dokładności wymaga, aby wysokość tarczy i pryzmatu nad stopką tyczki była w tym komplecie jednakowa i niezmienna. Z tego powodu tyczka musi być wykonana jako stała, z materiału o małym współczynniku rozszerzalności termicznej. Praktycznie oznacza to, że nie powinno się stosować do tego rozsuwanych tyczek aluminiowych, produkowanych do wykorzystania w tachimetrii elektronicznej, lecz należy stosować nierozsuwane tyczki drewniane, o współczynniku rozszerzalności termicznej rzędu $3 \cdot 10^{-6}$.

Ze względu na wymiary gabarytowe produkowanych tarcz i pryzmatów dalmierzowych trzeba się liczyć z koniecznością mocowania ich na tyczkach mimośrodowo. Wymóg taki można by pominąć w przypadku korzystania wyłącznie z reperów ziemnych, natomiast powinien on być przestrzegany w przypadku korzystania z reperów ściennych, z uwagi na bliskość powierzchni ściany i trudność zmieszczenia tarczy i pryzmatu przy pionowym ustawieniu tyczki na reperze (w tym miejscu dodam, że coraz częściej spotykamy się z ogromnym utrudnieniem prowadzenia pomiarów metodą niwelacji geometrycznej po istniejących reperach ściennych, które przy modernizowaniu elewacji budynków polegającym na ogół na pokryciu grubszą niż uprzednio warstwą tynku lub zastępowaniu tynków różnego rodzaju wykładzinami „znikają” w warstwie tynku lub wykładziny). Uwzględniając ten niekorzystny dodatkowy fakt, należy projektować stopki tyczek do ustawiania tarcz i pryzmatów w sposób „odsadzający” tyczki od ściany.

Tyczki nośne tarcz i pryzmatów, stosowane do pomiarów tachimetrycznych, mają na ogół zaokrąglone groty, co jest wystarczające do ustawiania na utwardzonym podłożu przy pomiarach o dokładności centymetrowej. Gdy chcemy zastosować je do pomiarów o wyższej dokładności, na poziomie niwelacji technicznej lub precyzyjnej, musimy korzystać z tyczek o stopkach płaskich, prostopadłych do osi tyczki ustawianej na reperze z wykorzystaniem libeli sferycznej.

4. WSTĘPNA OCENA MOŻLIWEJ DO UZYSKANIA DOKŁADNOŚCI POMIARU W CIĄGACH LINIOWEJ NIWELACJI TRYGONOMETRYCZNEJ

Różnica wysokości celu i osi poziomej obrotu lunety (dalmierza) stacji totalnej jest funkcją mierzonej dalmierzem odległości i mierzonego kąta zenitalnego.

Deklarowana przez wytwórcę dokładność pomiaru odległości dalmierzem elektrooptycznym stacji totalnej TC 2002, TC 2003 określana jest przy użyciu formuły $m_d = \pm(1\text{mm}+1\text{ppm})$, przy czym, jak wskazuje doświadczenie, dobrze skomparowany dalmierz, przy prawidłowym uwzględnieniu poprawek komparacyjnych i redukcji ze względu na warunki atmosferyczne, umożliwi osiągnięcie przy odległościach kilkusetmetrowych dokładności nawet dwukrotnie wyższej. W przypadku odcinków krótkich, rzędu kilkudziesięciu metrów, można spodziewać się dalszego zwiększenia dokładności, wyrażającego się błędem m_d w granicach $\pm(0,2\div 0,5)\text{mm}$.

Możliwa do osiągnięcia dokładność pomiaru kąta zenitalnego zależy od błędu kompensatora koła pionowego i od dokładności nacelowania. Doświadczenie pokazuje, że przy odległościach rzędu kilkudziesięciu metrów możliwe jest uzyskanie błędu średniego kąta zenitalnego m_z rzędu $\pm(1,0\div 2,0)''$.

W rezultacie można oszacować, że przy celowych w przybliżeniu poziomych i przy jednakowych długościach celowych „wstecz” i „w przód” na wartość różnicy wysokości praktyczny wpływ ma głównie błąd kompensatora i błąd celowania, natomiast wpływ błędu pomiaru odległości uzyskiwanego przy pomiarze dalmierzem jest praktycznie zaniedbywalny. Można oszacować, że przy celowych o długości rzędu 25 m osiągalny jest przy użyciu stacji totalnej błąd średni różnicy wysokości między punktami ustawienia przyzmatu „wstecz” i „w przód” rzędu $\pm 0,08$ mm, zaś przy celowych wydłużonych do 50 m błąd średni rzędu $\pm 0,2$ mm.

W przypadku pokonywania ciągiem terenu o nachyleniu 1:5, można spodziewać się pojawienia wpływu błędu pomiaru odległości dalmierzem, wskutek czego błąd pomiaru różnicy wysokości wzrośnie do $\pm 0,10$ mm przy celowych 25 m i do $\pm 0,25$ mm przy celowych 50 m. Przy takim nachyleniu terenu można uzyskać metodą niwelacji geometrycznej praktycznie takie same dokładności, jednak kosztem wykonania pomiaru ciągu zawierającego 6–7 stanowisk zamiast jednego stanowiska niwelacji trygonometrycznej. Przy większych nachyleniach terenu następuje zwiększenie przewagi ekonomicznej i pojawia się przewaga dokładnościowa liniowej niwelacji trygonometrycznej nad niwelacją geometryczną.

Szacowane tu możliwości dokładnościowe i korzyści organizacyjno-ekonomiczne zostały wstępnie potwierdzone pomiarami eksperymentalnymi wykonanymi z myślą o zastosowaniu do wyznaczania osiadań obiektów

elektrowni wodnej. Zastosowano przy tych pomiarach stację totalną TC 2002 firmy Leica i pryzmaty precyzyjne na tyczkach aluminiowych służących do tachimetrii. Dokładności odpowiadające niwelacji precyzyjnej osiągnięto przy stosowaniu celowych nieznacznie odbiegających od poziomu, natomiast w przypadku celowych o większych nachyleniach pomiary były nieco mniej dokładne i bardziej kłopotliwe ze względu na brak regulowanych podpórek umożliwiających unieruchomienie tarczy i pryzmatu w momencie dokonywania nacelowania i odczytu. W najbliższym czasie przewiduję wykonanie pomiarów eksperymentalnych przy wykorzystaniu sprzętu lepiej przystosowanego do tego celu. Ewentualne ich powodzenie może się okazać niezwykle pomyślne i dające szanse na rozwiązanie kilku trudnych problemów, z jakimi mamy do czynienia od wielu lat przy pomiarach niwelacyjnych w terenach o dużych nachyleniach i deniwelacjach.

Wiele wskazuje, że omawiana tu metoda pomiaru może okazać się korzystna ekonomicznie i wysoce dokładna, jednak nie można jej praktycznie wdrażać bez wcześniejszego przeprowadzenia wspomnianych pomiarów eksperymentalnych i analizy ich wyników.

LITERATURA

- [1] Aksoy A., Franke P., Witte B.I., Yalin D., 1994, *Eine modifizierte Methode des Trigonometrischen Nivellements zur exakten Bestimmung von Höhenänderungen*. Vermessungswesen und Raumordnung, 56/1 Februar.
- [2] Krack K., Schodlbauer A., Widmann R., 1990, *Entwicklung eines automatisierten Meßsystems zum trigonometrischen Nivellement*. Vermessungswesen und Raumordnung 52 Heft 2+3.

JERZY JANUSZ

LINEAR TRIGONOMETRIC LEVELLING

A b s t r a c t

Author presented concept of making levelling traverses applying method of linear trigonometric levelling with the use of electronic tacheometer and two mirrors with targets on poles of the same height. Advantages of the method, especially in the areas with big slopes, where keeping distance between instrument and mirrors as in flat terrain becomes possible, were described. The other advantages were also mentioned: possibility to replace 3 m staffs with more portable mirrors on 1.6 m poles, which corresponds to the average height of axis of rotation for tacheometer set

on tripod, as well as option of avoiding staff calibration and instead of it checking, if heights of mirrors on poles are the same. Prognosis of possible high accuracies, while applying linear trigonometric leveling, was presented.

Translation: Zbigniew Bochenek

ЕЖИ ЯНУШ

ЛИНЕЙНОЕ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКОЕ НИВЕЛИРОВАНИЕ

Резюме

Представлена концепция проведения измерения нивелирных ходов методом линейного нивелирования с использованием электронного тахеометра и двух дальномерных зеркал с мешенями на вехах одинаковой длины. Перечислены возможные выгоды применения этого метода измерения, особенно на местности с большим наклоном, где возможным становится сохранение таких расстояний между инструментом и зеркалом, как на горизонтальной местности. Другие выгоды это возможность замены реек 3 метровой длины более портативными зеркалами на вехах длиной порядка 1,6м, соответствующих средней высоте оси оборота визирной трубы тахеометра, установленного на штативе, а также возможность отказа от компарирования реек и замены их проверкой, одинакова ли высота зеркал на вехах в комплекте. Представлен прогноз возможных для достижения высоких точностей линейного тригонометрического нивелирования.

Перевод: Роза Толстикова

