

НОВІ СУЧАСНІ МОЖЛИВОСТІ ГЕОДИНАМІКИ

А. Островський, О. Мороз,

(Державний університет "Львівська політехніка")

П. Черняга

(Українська державна академія водного господарства)

З розвитком засобів та методів вивчення фігури Землі та її гравітаційного поля, з підвищенням точності та оперативності досліджень, геодинаміка, як наука, що займається саме проблемами вивчення змін просторових положень точок планети Земля і варіацій елементів її гравітаційного поля, а також інтерпретацією причин цих змін, перетворюється з науки майбутнього в науку сучасності. Достатнім доказом сказаного може бути те, що в наш час вивчення змін положень точок земної поверхні займає значне місце в основних роботах, що проводяться геодезистами.

Це стало можливим завдяки науково-технічному прориву в підвищенні на порядок точності

лінійних вимірів, реалізованому світловіддалемірами та приймачами GPS.

При цьому відносні помилки лінійних вимірів 10^{-6} , які ще недавно вважались мінімально можливими, стали рівними біля 10^{-7} . З'явилась реальна можливість вивчати не тільки локальні вертикальні, але і горизонтальні складові рухів точок земної кори менші 1-2 мм. в рік.

Дійсно, поклавши граничну помилку визначення горизонтальних рухів $m_{\Delta S} = 0.5 \text{ мм}$, знайдемо максимальну довжину лінії (максимальне допустиме рознесення точок) S при відносній помилці 10^{-7} , тобто

$$\frac{m_{\Delta S}}{S} = \frac{1}{10000000}; S=5\text{км.} \quad (1)$$

Зауважимо, що абсолютні помилки $m_{\Delta S}$ менше 1 мм забезпечують сучасні віддалеміри. Однак, оскільки довжини ліній обмежені, то світловіддалеміри дозволяють розв'язувати тільки локальні задачі геодинаміки. При регіональних та глобальних задачах геодинаміки слід звертатись до глобальних пошукових систем (до GPS методів). Точність визначення просторового вектора приймачами GPS описується рівнянням регресії

$$m_{\bar{S}} = 5\text{мм} + 0.2\text{мм} \bar{S} \quad (2)$$

при базі $\bar{S}=10$ км. Нехай точки рознесені на віддалі 500 км. Тоді $m_{\bar{S}}=15$ мм. Хоча відносна помилка $0.3 \cdot 10^{-7}$, однак точність недостатня для вивчення рухів біля 1 мм. в рік. Але вже при глобальних, або регіональних рухах порядку кількох міліметрів в рік та при рознесені повторних спостережень на часові проміжки 3-5 років розв'язання задач геодинаміки методами GPS стає реальним

Найбільш точним методом визначення змін висот точок земної поверхні продовжує залишатися геометричне нівелювання. Так геометричне нівелювання I класу дозволяє вивчати зміну перевищень Δh між двома точками, рознесеними на 1 км, з граничною помилкою $m_{\Delta h} \cong 0.8$ мм.

Однак, з'явилась реальна можливість підвищити точність геометричного нівелювання I класу. Так, розрахунки показують, що перехід до нівелювання I класу, але коротким променем ($S \leq 25\text{м}$) підвищує точність результатів в 1.8 раза. Перехід же від рівневих нівелірів до нівелірів з компенсаторами та електронних нівелірів дозволяє підвищити точність нівелювання I класу в 2,3 рази.

Якщо ж проводити нівелювання прецизійними нівелірами з компенсаторами, але короткими променями ($S \leq 25\text{м}$), то точність можна збільшити в 2.7 раза, тобто майже втричі. Тоді можна буде вивчати зміну перевищень Δh між точками рознесеними на 1 км з граничною похибкою 0.25-0.30 мм.

Подальше підвищення точності геодезичних вимірів, якого перш за все вимагає геодинаміка, можливе:

- 1) стабілізацією систематичних помилок;
- 2) досягненнями сучасної рефрактометрії;

3) застосуванням диференційних світловіддалемірів, що дозволяють вимірювати не довжини ліній, а точні зміни цих довжин.

Розглянемо ці можливості більш детально.

1. Головним завданням геодезичних спостережень на геодинамічних полігонах не є, як звичайно, визначення координат X, Y, H точок, а визначення змін координат цих точок $\Delta X, \Delta Y, \Delta H$ в просторі та часі на основі повторних вимірів. Тому найбільш загрозливі систематичні помилки вимірів достатньо стабілізувати, тобто добитися їх незмінності в циклах повторних вимірів, тоді ці помилки виключаються з приростів $\Delta X, \Delta Y, \Delta H$. Незмінність систематичних помилок в циклах можна досягти проведенням вимірів в одні і ті ж пори року, в одні і ті ж години доби. Цьому сприяє той факт, що сучасні світловіддалеміри вже на протязі біля 10 сек виконують багаторазове вимірювання (до 1000 раз) і середній результат автоматично видають на електронне табло.

2. Одним з важливих досягнень сучасної рефрактометрії є розроблені методи точного визначення впливу турбулентної атмосфери на результати геометричного нівелювання.

Як відомо, на результати геометричного нівелювання на станції впливає тільки аномальна диференційна рефракція - $\Delta r_{\text{ан сер}}$

$$\Delta r_{\text{ан сер}} = 0.03942 \frac{P}{T^2} L^2 (\gamma_{\text{е сер з}} - \gamma_{\text{е сер п}}). \quad (3)$$

$$\text{При цьому: } \gamma_{\text{е сер}} = \frac{2}{L^2} \int_0^L \gamma_{\text{ан}} dl. \quad (4)$$

В цих формулах P -тиск в Гпа, T - абсолютна температура повітря, L -довжина плеча нівелювання, $\gamma_{\text{е сер}}$ - еквівалентний середній вертикальний градієнт температури; $\gamma_{\text{ан}}$ - аномальний градієнт температури на безконечно малому відрізьку dl , l - відрізок лінії від візирної цілі до біжучої точки інтегрування.

Індекси " з " і " п " при $\gamma_{\text{е сер}}$ в формулі (3) відповідно означають еквівалентні градієнти на шляху променя до задньої ("з") та передньої ("п") рейок. Труднощі визначення поправки $\Delta r_{\text{ан сер}}$ в необхідності визначення $\gamma_{\text{е сер}}$.

Як видно з (4) таке визначення потребує знання точкових градієнтів $\gamma_{\text{ан}}$ в багатьох точках на шляху променя світла, вимірювання яких

практично важко реалізувати. Знайдено рішення цієї проблеми в термічно-турбулентній атмосфері.

На основі закону пливучості частинок повітря одиничного об'єму в термічно турбулентній атмосфері теоретично доказано [1], що середня аномальна рефракція - $r_{ан.сер}$ є максимальна лінійна амплітуда - A коливань зображень штриха рейки, тобто доказано, що

$$r_{ан.сер} = 0.03942 \frac{P}{T^2} L^2 \gamma_{е.сер} = A. \quad (5)$$

Враховуючи (5), формулу (3) можна записати скорочено

$$r_{ан.сер} = A_3 - A_{II} \quad (6)$$

При цьому амплітуда A_3 , A_{II} можуть бути виміряні в умовних одиницях або в міліметрах кутовим бісектором нівеліра. Формули (5), а значить і (6) точні в такій мірі, в якій виконується закон пливучості в термічно-турбулентній атмосфері. Реально, в залежності від часу осереднення в секундах - t_c закон пливучості виконується з такими відносними помилками - τ [4]:

t_c	τ	t_c	τ
10^{-1}	10^{-2}	10	10^{-4}
1	10^{-3}	10^2	10^{-5}

Як бачимо, уже при осередненні в 1 секунду закон виконується з відносною помилкою 1/1000. Саме з точністю порядку 1/100-1/1000 можна визначити еквівалентні вертикальні градієнти температури за коливаннями зображень, а значить і поправки за рефракцію. Зауважимо, що точкові градієнти, визначені, наприклад, психрометрами Асмана, мають відносні помилки порядку 1/10, тобто визначаються значно грубіше.

Формули (5) та (6) узгоджуються з аналогічними формулами Павліва П.В. [2] та Стащишина І.І [3], отримані і перевірені ними експериментально.

Точність формул (3) та (6) вивчалась нами в двох аспектах:

І- досліджувалась точність визначення поправок за рефракцію флюктуаційним методом (за коливаннями зображень штрихів рейки) в результаті нівелювання на станції.

Істинні помилки поправок за рефракцію визначались на основі формули:

$$\delta_1 = \Delta r_{ан.сер.1} - \Delta r_{о.1} \quad (7)$$

В (7) $\Delta r_{ан.сер.1}$ - поправка, визначена за формулою

(6); $\Delta r_{о.1}$ - еталонні поправки за рефракцію, отримані із порівнянь перевищень, виміряних коротким і довгим променем (16.67м і 50м);

II-досліджувались точність визначення поправки за аномальну рефракцію в відлік по рейці флюктуаційним методом - $r_{ан.сер.1}$ (за коливаннями зображень штрихів рейки) і одночасно вивчалась точність виконання пропорційності рефракційних поправок квадратам довжин променя - L_1^2 .

При цьому:

1) визначались поправки в відліки по рейці $r_{ан.сер.1}$ за формулою (5);

2) визначались еталонні поправки в ці відліки по рейці - $r_{о.1}$ таким методом:

якщо бісектувати (наводити бісектор) на середнє положення штриха рейки що коливається, то правильний відлік по рейці - a буде спотворено середньою від'ємною рефракцією - $r_{сер.}$, тобто

отримаємо відлік ($a - r_{сер.}$); якщо береться відлік по рейці при нормальних градієнтах температури (при спокійних зображеннях візорних цілей), то правильний відлік буде спотворено додатньою нормальною рефракцією - $r_{н.}$, тобто отримаємо відлік ($a + r_{н.}$). Різниця цих відліків дає еталонну аномальну рефракцію -

$$r_{о.1} = -r_{сер.} - r_{н.} \quad (8)$$

3) Різниця $\delta_1' = r_{ан.сер.1} - r_{о.1}$ (9)

можна розглядати, як істинні помилки флюктуаційного методу визначення рефракції.

4) Маючи аномальні рефракції для довжин $L=50$ м, знайдені за формулою (5), обчислимо аномальні рефракції для інших довжин променя L_1

за такою формулою

$$r_{ан.L_1} = r_{ан.50} \cdot \frac{L_1^2}{50^2} \quad (10)$$

5) Поправки $r_{ан.L_1}$ порівняємо з еталонними поправками $r_{о.1}$.

Різниця $V_1 = r_{ан.L_1} - r_{о.1}$ (11)

можна розглядати, як помилки неповного виконання пропорційності поправок квадратам довжин проміння L_1^2 .

Основою досліджень стали старанно виконані і великі за об'ємом натуральні спостереження Стащишина І.І. [3].

Результати досліджень зведені в таблиці 1 та 2.

Таблиця 1.
Поправки за рефракцію $\Delta r_{ан.сер.}$ їх порівняння

з еталонними поправками - Δr_{o_1} .

Години спостережень	Δr_{o_1} (мм)	$\Delta r_{ан.сер.}$ (мм)	δ_i (мм)
1	2	3	4
7	0.01	0.04	+0.03
8	0.17	0.16	-0.01
9	0.20	0.22	+0.02
10	0.26	0.28	+0.02
11	0.31	0.34	+0.03
12	0.41	0.42	+0.01
13	0.48	0.43	-0.05
14	0.54	0.50	-0.04
15	0.44	0.49	+0.05
16	0.31	0.30	-0.01
17	0.22	0.23	+0.01
18	0.16	0.14	-0.02
19	0.08	0.05	-0.03
Середні	0.276	0.277	$\sum = +0.01$

$$m_{\Delta r} = \sqrt{\frac{[\delta_i \delta_i']}{n}} = 0.0289 \text{ мм.}$$

Середня квадратична помилка $m_{\Delta r}$ менше 0.03 мм.

Таблиця 2.
Дослідження точності флюктуаційного методу визначення поправок за рефракцію в відлік по рейці та пропорційності рефракцій квадратом довжин ліній (плеч) - L_1^2 .

Підстил. поверх	Довжина плеч L (м)	r_{o_1} (мм)	$r_{ан.сер.}$	r_{L_1}	δ_i'	v_1
1	2	3	4	5	6	7
Асфальт	25	-0.336	-0.34	-0.22	-0.004	+0.116
	33	-0.431	-0.44	-0.38	-0.009	+0.051
	40	-0.577	-0.58	-0.56	-0.003	+0.017
	50	-0.837	-0.88	(-0.88)	-0.043	-0.043
Грунтова Дорога	25	-0.276	-0.28	-0.19	-0.004	+0.086
	33	-0.361	-0.37	-0.33	-0.009	+0.031
	40	-0.477	-0.49	-0.49	-0.013	-0.013

1	2	3	4	5	6	7
25	-0.797	-0.76	(-0.76)	-0.053	-0.053	
Дуг	25	-0.226	-0.24	+0.14	-0.014	+0.086
	33	-0.311	-0.32	-0.25	-0.009	+0.061
	40	-0.417	-0.43	-0.37	-0.013	+0.047
	50	-0.567	-0.58	(-0.58)	-0.013	-0.013
Середнє	25	-0.279	-0.286	-0.185	-0.007	+0.094
	33	-0.368	-0.380	-0.322	-0.012	+0.046
	40	-0.490	-0.504	-0.474	-0.014	+0.016
	50	-0.704	-0.740	(-0.740)	-0.036	-0.036

$$\delta'_{сер.} = \frac{[\delta_i']}{n} = \frac{-0.256}{16} = -0.016 \text{ мм;}$$

$$v_{сер.} = \frac{[v_i]}{n} = \frac{+0.493}{16} = +0.031 \text{ мм;}$$

$$m_r = \sqrt{\frac{[\delta_i' \delta_i']}{n}}; m = \sqrt{\frac{[v_i v_i]}{n}};$$

$$m_r = 0.021 \text{ мм; } m = 0.059 \text{ мм.}$$

Як видно з таблиці 2, помилки δ_i' - незначні, правда систематичного характеру. Середня квадратична помилка m_r визначення поправки за рефракцію в відліку по рейці складає 0.021 мм.

Цей результат добре узгоджується з $m_{\Delta r}$ - отриманою з таблиці 1 ($m_{\Delta r} = 0.0289 \text{ мм}$).

Дійсно, так, як $m_{\Delta r} = m_r \cdot \sqrt{2}$, то на основі таблиці 2 маємо $m_{\Delta r} = 0.0296 \text{ мм}$.

Зауважимо, що систематичний характер помилок δ_i' пояснюється помилками визначення коефіцієнта переходу від умовних одиниць амплітуди коливань до міліметрів. Ймовірне значення коефіцієнта переходу $Q = 0.909 \pm 0.029$. Випадкова середня квадратична помилка визначення цього коефіцієнта 0.029 при вживанні його для обчислень амплітуди коливань зображень штрихів в міліметрах стає систематичною.

Підтверджена достатньо висока точність пропорційності поправок за рефракцію квадратам довжини променя - L_1^2 . З формули (5)

$$\text{видно, що } r_{ан.сер.} = f(P, T, \gamma_{сер.}, L^2),$$

тобто $r_{ан.сер.}$ є функцією цілого ряду змінних в просторі та часі. Тому не можна було сподіватися, що пропорційність поправок $r_{ан.сер.}$

параметру L^2 буде мати помилки менші 0.059 мм.

Таким чином, маємо простий і точний метод визначення поправок за рефракцію в результати геометричного нівелювання з точністю 0.03 мм.

Зауважимо, що перехід на електронні, автоматизовані методи вимірювання амплітуди коливань зображень дасть можливості підняти точність цього методу, як мінімум, на порядок.

На завершення, більш детально розглянемо можливості підняття точності визначення горизонтальних рухів земної поверхні, споруд та технологічного обладнання з допомогою диференційних світловіддалемірів. Звернемо увагу, наприклад, на диференційний високоточний світловіддалемір ДВСД-1200В(СРСР), призначений для безпосереднього вимірювання змін віддалей ΔS . Віддалемір працює на єдиній, дуже високій частоті модуляції 1200 Мгц. Тому неоднорозумно можна було б розв'язати і виміряти повна довжина лінії (хоча це не обов'язково), якщо попередньо довжина відома з точністю $\lambda/4=6\text{см}$. Ця обставина не затримує застосування диференційного світловіддалеміра на геодинамічних полігонах. Головне, що коли S необхідно знати з відносною помилкою, як мінімум, $1 \cdot 10^{-6}$ то ΔS достатньо знати з помилкою $1 \cdot 10^{-1}$. Діапазон роботи світловіддалеміра $0.5 \div 250\text{м}$. Точність вимірювання

різниці фаз $m_p = 0.4^\circ$ забезпечує вимірювання довжин з точністю

$$m_s = 0.15\text{мм} + 0.2\text{мм}/100\text{мм}.$$

Таким чином, сучасний науково-технічний прогрес відкриває перед геодинамікою нові можливості рішення локальних, регіональних і глобальних задач.

Література

1. A.Ostrovskiy Regularities of fluctuations and determination of vertical gradients of temperature and anomalous refraction of the light beam in thermally turbulent atmosphere. Reports on Geodesy Warsaw university of technology №(2) 25, 1997, p. 21-33.
2. Павлів П.В. Проблемы высокоточного нивелирования и методы их решения. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н. Львов, 1987, 49 стр.
3. Стацишин И.И. Разработка и исследование методов учета нивелирной рефракции в турбулентной атмосфере. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Львов, 1983, 24 стр.
4. Юношев Л.С. Астрономо-геодезические наблюдения сквозь трехмерно-неоднородную атмосферу. Ж-л "Геодезия и картография" М. № 8, 1991, с.5-9.

A. Ostrovskiy, O. Moroz, P. Chernjaga
NEW MODERN POSSIBILITIES OF GEODYNAMICS

Summary

In work is shown, that the modern linear lightwave measurements can be fulfilled with a relative error of 0.25-0.3 mm. per 1 km. These reachings open new possibilities of geodynamics: to study not only vertical, but also horizontal driving terrestrial layer, buildings, process equipment for rather short time intervals.

А. Островський, О. Мороз, П.Черняга
НОВЫЕ СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГЕОДИНАМИКИ

Резюме

В работе показано, что современные линейные измерения светодальномерами можно выполнять с относительной погрешностью $1 \cdot 10^{-7}$, а высокоточное геометрическое нивелирование с предельной погрешностью 0,25-0,3 мм. на 1 км. хода. Эти достижения открывают новые возможности геодинимики: изучать только вертикальные, но и горизонтальные движения земной коры, сооружений, технологического оборудования за сравнительно короткие промежутки времени.