

СПРОБА ВИЗНАЧЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНОЇ РЕФРАКЦІЇ ЗА МИТТЄВИМИ ЗМІНАМИ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ

© Мороз О.І., Островська О.А., 2002

Показана возможность определения вертикальной рефракции по мгновенным колебаниям температуры, которые качественно и количественно эквивалентны колебаниям температурных градиентов.

Possibility of the vertical refraction determination by instantaneous temperature fluctuations, which qualitatively and quantitatively equivalent to fluctuations of the temperature gradients was showed.

I. Вертикальну рефракцію – $\delta_{сер}$ в термічно турбулентній атмосфері визначають за формулою

$$\delta_{\text{сер}} = 0,198 \frac{P}{T} L - 8,132 \frac{P}{T^2} L \gamma_{\text{ан.ек.сер}}, \quad (1)$$

де $\delta_{\text{сер}}$ – середня рефракція протягом відрізка часу 1 – 2 с, необхідного для наведення зорової труби спостерігачем на візирну ціль, P – тиск в ГПас, T – абсолютна температура повітря, L – довжина лінії візування. При цьому перший член формули (1) описує нормальну частину рефракції, визначення якої не викликає труднощів, оскільки відношення $\frac{P}{T^2}$ мало змінюється з часом в реальних умовах і достатньо знати P та T за даними найближчої метеостанції, або виміряти їх в одній точці. Труднощі полягають у визначенні аномальної частини рефракції, яку описує другий член формули (1). У цьому члені $\gamma_{\text{ан.ек.сер}}$ – аномальний середній еквівалентний (ваговий) градієнт температури, визначення якого вважається неможливим без градієнтних вимірів температури в багатьох точках траси на висоті розповсюдження променя світла.

У статті описана спроба визначити рефракцію без градієнтних вимірів, на основі миттєвих вимірів температури безінерційними термометрами на висоті проходження візирного променя.

II. Подамо теоретичне обґрунтування такої спроби

Другий член формули (1) можна записати так:

$$\delta_{\text{ан.сер}}'' = -C \gamma_{\text{ан.ек.сер}}, \quad (2)$$

де

$$C = 0,198 \frac{P}{T} L = \text{Const}. \quad (3)$$

Відомо (див. наприклад [1]), що

$$\delta_{\text{ан.сер}}'' = \frac{\sigma_{\text{max}}''}{2}, \quad (4)$$

де σ_{max}'' – максимальний розмах коливань зображень візирної цілі (в секундах дуги) за час $t \geq 1$ с, що знаходиться на віддалі L від теодоліта.

На основі (4) та (2) можна записати

$$\sigma_{\text{max}}'' = 2C \gamma_{\text{ан.ек.сер}}. \quad (5)$$

Очевидно, що σ_{max}'' у формулі (5) пропорційні еквівалентним градієнтам. З іншого погляду, відомо [2], що при нестійкій стратифікації аномальні градієнти температури змінюються у границях від $\gamma_{\text{ан.мін}} = 0$ до $\gamma_{\text{ан.макс}}$. Це доведено на основі законів статички атмосфери та пливучості частинок атмосфери, а також теорії турбулентності атмосфери Моніна-Обухова. Тому можна записати

$$\gamma_{\text{ан.ек.сер}} = \frac{\gamma_{\text{ан.мін}} + \gamma_{\text{ан.макс}}}{2} = \frac{\gamma_{\text{ан.макс}}}{2}. \quad (6)$$

Нехай маємо рівну ділянку землі з однорідною трав'яною підстилюючою поверхнею, а промінь проходить на висоті 1,5 м, тоді $\gamma_{\text{ан.ек.сер}} = \gamma_{\text{ан.сер}}$. Градієнт $\gamma_{\text{ан.сер}}$, який визначається за формулою (6), слід зарахувати до висоти $h = 1,5$ м і знайти σ_{max} за формулою (5). Але, якщо на цій висоті аномальний градієнт змінюється від нуля до $\gamma_{\text{ан.макс}}$, то і температура повітря миттєво буде змінюватися на цій висоті в таких самих границях.

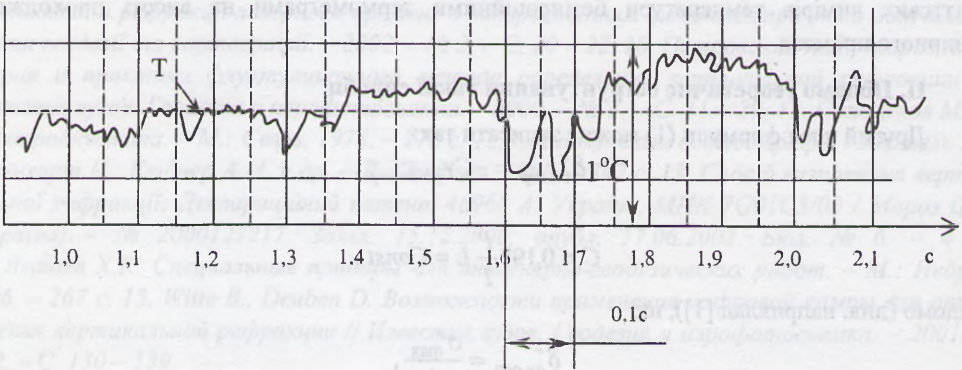
Причиною флуктуацій температури, як і градієнтів температури, є турбулентні переміщення частинок повітря, які переносять тепло. Тому флуктуації температури є якісно і кількісно аналогічними з флуктуаціями градієнтів температури.

Отже, ми доходимо висновку, що в разі однорідного рефракційного поля для визначення аномальної рефракції достатньо знати миттєві зміни температури в одній точці (на висоті теодоліта) протягом 1 – 2 с часу.

III. Приклад визначення рефракції за миттєвими температурами

На рисунку показано запис миттєвих змін температури, яку вимірювали протягом дещо більше 1 с безінерційним термометром в термічно турбулентній атмосфері. На перший погляд зміни температури мають тільки випадковий характер. Проте, на рисунку однозначно виділяються піки максимальних відхилень температури від середнього значення, мають частоту приблизно 0,5 – 1,0 Гц.

Знайдемо максимальний верхній пік коливань на рисунку. Йому відповідатиме градієнт $\gamma_{ан. \min} = 0$.



Запис миттєвих змін температури у приземному шарі атмосфери протягом ≥ 1 с

Проведемо через цю точку горизонтальну пряму, паралельну нижній лінії графіка – лінії часу. Ця пряма є лінією нульових градієнтів. Вертикальні відрізки від цієї прямої до точок кривої графіка, що зображає коливання температури (коливання миттєвих градієнтів), виражених в міліметрах графіка. Вертикальний масштаб графіка: 1°C (1 град/м) відповідає 29,5 мм. Знайдемо також максимальний нижній пік. Йому відповідає вертикальних відрізок, який дорівнює 20 мм. Тобто: максимальний вертикальний градієнт (за модулем)

$\frac{dT}{dh} = \gamma_{ан. \max} = 0,714 \text{ град/м}$. Знайдемо середній градієнт. Відповідно з (6), маємо:

$\gamma_{ан. \text{сеп}} = 0,357 \text{ град/м}$. Зауважимо, такі середні градієнти $\gamma_{ан. \text{сеп}} = 0,3 - 0,4 \text{ град/м}$ звичайно існують на висоті $h = 1,5$ м, над трав'яною поверхнею при ясній, антициклонній погоді.

Знаючи аномальний градієнт, визначимо аномальну рефракцію за формулами (2) та (3). При $L = 125$ м, $P = 986$ ГПас, $T = 288$ К, отримаємо $\delta_{ан. \text{сеп}} = -4,32''$.

IV. Перевіримо, чи дійсно два вибрані нами піки коливань (верхній та нижній) є не випадковими і можуть характеризувати середнє значення градієнта, тобто впевнимися, що ці дві точки не займають під впливом турбулентності випадкового положення, як багато інших точок, а є дійсно закономірними. Знаючи, на основі тільки двох точок, середнє

значення градієнта проведемо вісь симетрії графіка. Далі перевіримо за багатьма миттєвими значеннями температури (градієнтів) чи ця вісь симетрії є насправді віссю симетрії. Для цього було виміряно за графіком усі відрізки (градієнти) через кожних 0,05 с на відрізку часу від 1,00 до 2,00 с. Це склало 21 вимір. Були також виміряні градієнти в точках, що мали положення в часі 1,62; 1,675; 1,870 с, тобто займали проміжне положення між відрізками часу 0,05 с. Результати вимірів наведені у таблиці (стовпець 3).

Результати графічних вимірів миттєвих температур (градієнтів температури) та обчислених рефракцій, для траси $L = 125$ м. Флуктуації градієнтів – $\Delta\gamma$ та рефракцій – $\Delta\delta''$

№ з/п	Час, с	Миттєві градієнти $\gamma_{ан,і}$	Флуктуації градієнтів $\Delta\gamma_{ан,і}$	Миттєві рефракції $\delta''_{ан,і}$	Флуктуації рефракції $\Delta\delta''_{ан,і}$
1	1,00	-0,446	-0,115	-5,39''	-1,39''
2	1,05	-0,531	-0,200	-6,42	-2,42
3	1,10	-0,493	-0,162	-5,96	-1,96
4	1,15	-0,340	-0,009	-4,11	-0,11
5	1,20	-0,357	-0,026	-4,31	-0,31
6	1,25	-0,374	-0,043	-4,52	-0,52
7	1,30	-0,578	-0,247	-6,98	-2,98
8	1,35	-0,408	-0,077	-4,93	-0,93
9	1,40	-0,238	+0,098	-2,88	+1,12
10	1,45	-0,269	+0,062	-3,25	+0,75
11	1,50	-0,238	+0,093	-2,86	+1,14
12	1,55	-0,204	+0,127	-2,46	+1,54
13	1,60	-0,391	-0,060	-4,72	-0,72
14	1,62	-0,707	-0,376	-8,54	-4,53
15	1,65	-0,408	-0,077	-4,93	-0,93
16	1,675	-0,714	-0,383	-8,63	-4,63
17	1,70	-0,405	0,074	-4,89	-0,89
18	1,75	-0,204	+0,127	-2,46	+1,54
19	1,80	-0,129	+0,202	-1,56	+2,44
20	1,85	-0,068	+0,263	-0,82	+3,18
21	1,87	0,000	+0,331	0,00	+4,00
22	1,90	-0,085	+0,246	-1,03	+2,97
23	1,95	-0,075	+0,256	-0,91	+3,09
24	2,00	-0,255	-0,255	-3,08	+0,92
$\gamma_{ан,ср} = -0,3312$			$\delta''_{ан,ср} = -4,00''$	$\sum_+ = 22,44''$ $\sum_- = 22,69''$	

Уточнене середнє значення $\gamma_{ан,ср,ут}$ (кількість вимірів $n = 24$) виявилось таким, що дорівнює $\gamma_{ан,ср,ут} = 0,3317$ град/м. Різниця з попереднім значенням становить тільки 0,026 град/м, що, враховуючи помилки графічних вимірів, можна вважати незначним. Значить теоретичні докази можливих змін атмосферних градієнтів температури і відповідних їм змін абсолютної температури підтверджені експериментально.

Надалі, за графіком були визначені миттєві амплітуди температури – $\Delta\gamma_{ан,і}$ (колонка 4), миттєві рефракції – $\delta''_{ан,і}$ (колонка 5), а також амплітуди рефракцій – $\Delta\delta''_{ан,і}$ (колонка

ка б). Розбіжності між попереднім і точним середнім значенням аномальної рефракції становить всього 0,32". Отримані результати, на нашу думку, вказують на можливість визначення аномальних рефракцій за флуктуаціями температури, вимірними безінерційними термометрами.

Звернемо ще увагу на те, що миттєві рефракції, як і миттєві градієнти температури не змінюють знак. Змінюють знаки тільки амплітуди – відхилення від середнього значення рефракцій та градієнтів температури. Такий характер змін підтверджує правильність теоретичних положень.

Проведений дослід дозволяє стверджувати, що:

1. За миттєвими значеннями температури повітря, які флюктують аналогічно, як і вертикальні градієнти температури, можна визначати аномальну рефракцію.

2. Запропонований метод визначення рефракції, коли флуктуації температури вимірюються в одній точці, можна реалізувати тільки в рівнинній місцевості. Якщо ж висоти променя над поверхнею землі – перемінна величина, тоді флуктуації температури слід вимірювати на еквівалентній висоті променя.

3. Подальше вивчення такого методу визначення рефракції безперечно становить неабиякий інтерес, враховуючи, що безінерційні термометри дешеві, прості і доступніші прилади, ніж камери ПЗС, які записують коливання зображень.

Потрібно, однак, визнати, що записані камерою коливання зображень характеризують їх інтегральні значення на трасі, а записані коливання температури – є точковими.

1. Мороз О., Островська О. Основні положення теорії флуктуаційного методу визначення аномальної вертикальної рефракції / Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів, 2002. – С. 110 – 120. 2. Островський А.Л., Мороз А.И. Теория и практика флуктуационного метода определения вертикальной рефракции / Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – М., 2000. – № 3. – С. 11 – 29.