



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 57781

(13) C2

(51) 7 G01C5/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) СПОСІБ ПРОГНОЗУВАННЯ АНОМАЛЬНОЇ ВЕРТИКАЛЬНОЇ РЕФРАКЦІЇ У ТУРБУЛЕНТНІЙ АТМОСФЕРІ

1

2

(21) 99105617

(22) 14 10 1999

(24) 15 07 2003

(46) 15 07 2003, Бюл. № 7, 2003 р

(72) Мороз Олександр Іванович, Островський  
Аполінарій Львович, Шевченко Тарас Георгійович(73) Державний Університет "Львівська  
політехніка"(56) Учет атмосферных влияний на астрономо-  
геодезические измерения/ А.Л.Островский, Б.М.  
Джуман, Ф.Д.Заболоцкий, Н.И.Кравцов - М.  
Недра, 1990, с. 112-114, 134-147Павлів П.В. Проблеми високоточного  
невелирювання - Львів Вища школа. Изд-во при  
Львів ун-те, 1980, с. 55-65

US 5117689 02 07 1992

WO 8809480 01 12 1988

US 5796105 18 08 1998

US 5159407 27 10 1992

SU 1793220 A1 07 02 1991

SU 1362927 A1 30 12 1987

(57) Спосіб прогнозування аномальної  
вертикальної рефракції у турбулентній атмосфері,  
при якому наводять зорову трубу геодезичного

приладу на візирну ціль, фіксують наявність  
коливань її у турбулентній атмосфері, вимірюють  
величину максимальних коливань зображення  
візирної цілі, тобто визначають величину  
аномальної вертикальної рефракції на віддалі від  
приладу до цілі, обчислюють цю ж величину у  
будь-якій точці на прямій L, де L – віддалі від  
приладу до візирної цілі, який відрізняється тим,  
що після визначення величини аномальної  
вертикальної рефракції визначають аномальний  
середній еквівалентний вертикальний градієнт  
температури за залежністю

$$\gamma_{\text{ане сер}} = \frac{\sigma_{A_{\text{max}}}}{C \cdot L},$$

де  $\sigma_{A_{\text{max}}}$  - величина аномальної вертикальної  
рефракції,  
C – стала,  
а обчислення величини аномальної вертикальної  
рефракції у будь-якій точці на  
прямій L здійснюють на основі цієї залежності

Винахід відноситься до геодезичного  
вимірювання відстаней, висот, зокрема, до  
геометричного та тригонометричного нівелювання,  
і може бути використаний для прогнозування  
аномальної вертикальної рефракції у турбулентній  
атмосфері

Відомий спосіб визначення та прогнозування  
рефракції полягає у тому, що наводять зорову  
трубу геодезичного приладу на візирну ціль і  
фіксують коливання цілі у полі зору зорової труби,  
наприклад, за допомогою бісектора зорової труби  
високоточного нівеліра (Павлів П.В. Проблеми  
високоточного нівелювання. Львів Вища шк.,  
1980, ст. 57-65). Спосіб дозволяє визначити  
рефракцію на момент вимірів. У ньому вважають,  
що коливання візирної цілі мають випадковий  
характер. Тому точність прогнозування рефракції  
цим способом є не високою.

Відомий спосіб визначення та прогнозування  
аномальної вертикальної рефракції у турбулентній

атмосфері (Учет атмосферных влияний на  
астрономогеодезические измерения/ Островский  
А.Л., Джуман Б.М., Заблоцкий Ф.Д., Кравцов Н.И.  
М., Недра, 1990 с. 112-114, 134-147) заключається у  
тому, що наводять зорову трубу геодезичного  
приладу на візирну ціль, фіксують наявність  
коливань її у турбулентній атмосфері, вимірюють  
величину максимальних коливань зображення  
візирної цілі, тобто, визначають величину  
рефракції. При цьому зв'язок між розмахом  
(подвійною амплітудою) коливань зображень  
візирних цілей  $\sigma$  та шляхом L візирного променя  
визначають за залежністю

$$\sigma = 1,7 C_n D^{1/6} L^{1/2} \quad (1)$$

де  $C_n$  коефіцієнт, що характеризує  
інтенсивність пульсацій показника заломлення  
повітря n, D - діаметр об'єктива зорової труби

Але залежність (1) описує випадковий процес,  
оскільки  $\sigma$  є випадковою величиною внаслідок

(13) C2

(11) 57781

(19) UA

того, що  $\sigma$  пропорційна  $L^{1/2}$ . У зв'язку з версією випадковості процесу точність прогнозування рефракції описаним способом є низькою, часто помилковою.

В основу винаходу поставлене завдання вдосконалити спосіб визначення та прогнозування аномальної вертикальної рефракції у турбулентній атмосфері на основі версії про закономірність процесу максимальних коливань зображень візирної цілі. Це дає можливість підвищити точність прогнозування рефракції.

Поставлене завдання вирішується тим, що у спосіб визначення та прогнозування аномальної вертикальної рефракції у турбулентній атмосфері, який заключається у тому, що наводять зорову трубу геодезичного приладу на візирну ціль, фіксують наявність коливань її у турбулентній атмосфері, вимірюють величину максимальних коливань зображення візирної цілі, тобто, визначають величину рефракції, згідно з винаходом, визначають аномальний середній еквівалентний вертикальний градієнт

температури, за залежністю  $\gamma_{\text{ан сер}} = \frac{\sigma_{\text{Аmax}}}{CL}$ , де  $\sigma_{\text{Аmax}}$  величина рефракції,  $L$  віддаль від приладу до візирної цілі,  $C$  стала, а на основі цього прогнозують аномальну вертикальну рефракцію.

Запропонований спосіб визначення та прогнозування вертикальної рефракції у турбулентній атмосфері ґрунтується на наступних доказах.

Формули для визначення вертикальної рефракції в турбулентній атмосфері записуються так

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

$$\gamma_{\text{ан сер}} = \frac{2}{L^2} \int_0^L \gamma_{\text{ан}} |dl| \quad (3)$$

Формула (2), записана скорочено, має вигляд  $\delta_{\text{сер}} = \delta_n \delta_{\text{ан сер}}$  (4)

Тут  $\delta_{\text{сер}}$ , середня вертикальна рефракція,  $P$  тиск в гПа,  $T$  абсолютна температура,  $L$  відрізок лінії від візирної цілі до бажаної точки інтегрування, в якій  $\gamma_{\text{ан}} = \gamma = \gamma_n$  аномальний вертикальний градієнт температури на нескінченно малому відрізку  $dl$  ( $\gamma$  - повний,  $\gamma_n = 0,0098 \text{ град/м}$  нормальний градієнт),  $\delta_n$  та  $\delta_{\text{ан сер}}$  формули (4) нормальна та аномальна рефракція за цей же відрізок часу,  $\delta_n$  та  $\delta_{\text{ан сер}}$  описуються першим та другим членом правої частини формули (2) відповідно.

Складність прогнозування рефракції у визначенні  $\gamma_{\text{ан сер}}$ . Як видно з формули (4), для визначення  $\gamma_{\text{ан сер}}$  необхідно знати градієнти  $\gamma_{\text{ан}}$  в множині точок траси довжиною  $L$ . Тоді можна визначити аномальну рефракцію.

Виміряти  $\gamma_{\text{ан сер}}$  одночасно в багатьох точках дуже складно, а, надто, коли промінь світла розповсюджується високо над поверхнею землі.

Визначення аномальної рефракції можливе тільки при умові знання законів турбулентності атмосфери. Однак, турбулентність вважають випадковим стохастичним процесом, оскільки елементарні частинки повітря хаотично

перемішуються в атмосфері. Ними встановлено, що, хоча турбулентність випадковий процес, максимальні турбулентні переміщення частинок повітря (граничні переміщення) є закономірними, систематичними, оскільки описуються законом пливучості елементарних частинок.

Закон пливучості

$$(dP_A dP)/dh = g(\rho_e - \rho_i) \quad (5)$$

де  $dP_A$  сила Архімеда,  $dP$  сила тяжіння Землі,  $\rho_i$  - густина елементарної частинки,  $\rho_e$  - густина повітря, що оточує частинку,  $g$  - прискорення сили ваги.

Сила пливучості направлена догори при  $\rho_e > \rho_i$ , або донизу, при  $\rho_e < \rho_i$ . Під впливом сили пливучості частинки повітря отримують прискорення

$$\frac{d^2 h}{dt^2} = g \frac{\rho_e - \rho_i}{\rho_i} = g \frac{T_i - T_e}{T_e} \quad (6)$$

Залежності (5) та (6), дають можливість зрозуміти, що в межах від інверсії температури (вертикальні градієнти  $\gamma$  додатні) до від'ємних адиабатичних (нормальних) градієнтів  $\gamma = \gamma_a = \gamma_n$  термічної турбулентності в повітрі не буде.

Відомо, що флуктуації (коливання) зображення віддалених предметів, які розглядають в зорову трубу, обумовлені варіаціями показника заломлення повітря, причому зміни показника заломлення, в свою чергу, обумовлені майже тільки варіаціями температури. Тому турбулентність можна розглядати, як намагання атмосфери набутти стійкої стратифікації, при якій  $\gamma > \gamma_n$ . Фактично, частинкам повітря вдається, під дією сили тяжіння та сили Архімеда, миттєво повертатися з прискоренням (турбулентно) до нейтральної стратифікації, при якій  $\gamma = \gamma_n$ . При таких градієнтах на різній висоті в турбулентному шарі атмосфери температура частинок повітря  $T_i$  дорівнює  $T_e$  температури навколишнього повітря. Одночасно, на цих висотах густина частинки  $\rho_i$  дорівнює  $\rho_e$  густини навколишнього повітря. При цьому, як видно з (6), частинки не мають прискорення, а переміщуються адиабатично, без теплообміну з навколишнім середовищем. Ці рухи в зорову трубу не видно (зображення спокійне). Іншими словами якщо повний вертикальний градієнт  $\gamma$  розділити на  $\gamma_n$  нормальну та  $\gamma_{\text{ан}}$  аномальну частини і записати  $\gamma = \gamma_n + \gamma_{\text{ан}}$  (7)

то при флуктуаціях аномальний градієнт  $\gamma_{\text{ан}}$  коливається поблизу деякого середнього  $\gamma_{\text{ан сер}}$ . При цьому у відповідності з (6), миттєві значення градієнтів  $\gamma_{\text{ан}} = 0$ . Це є одна границя флуктуацій аномальних градієнтів. Оскільки коливання симетричні відносно  $\gamma_{\text{ан сер}}$ , то другою границею буде  $2\gamma_{\text{ан сер}}$ . Таким чином, коливання будуть в границях від  $\gamma_{\text{ан}} = 0$  до  $\gamma_{\text{ан}} = 2\gamma_{\text{ан сер}}$ .

Тому при нестійкій стратифікації температури повітря аномальні градієнти коливаються в границях від  $\gamma_{\text{ан min}} = 0$  до  $\gamma_{\text{ан max}} = 2\gamma_{\text{ан сер}}$ , тобто в границях від нуля до двох середніх аномальних градієнтів. Так само максимально флуктують аномальні еквівалентні градієнти. Ці границі коливань зберігаються, як при падінні, так і при зростанні густини повітря з висотою. В періоди,

коли вертикальний градієнт густини повітря

$$\left(\frac{dp}{dh} = 0\right)$$

дорівнює нулю, еквівалентні та точкові градієнти температури флюктують навколо середнього градієнта  $\gamma_{e \text{ сер}}$  рівного 0,0244 град/м в межах від  $\gamma_{e \text{ min}}=0$  до  $\gamma_{e \text{ max}}=0.0488$  град/м

При цьому рефракції нормальна -  $\delta_n$  та аномальна -  $\delta_{ан}$  є рівними за абсолютною величиною та протилежні за знаками ( $\delta_n$  завжди додатна,  $\delta_{ан}$  - завжди від'ємна) В ці періоди середня рефракція  $\delta_{сер}=0$  Максимальні амплітуди коливань аномальних, еквівалентних вертикальних градієнтів температури рівні середньому еквівалентному градієнту  $\gamma_{ан \text{ е сер}}$  Таким чином, у турбулентній атмосфері максимальна амплітуда коливань візирних цілей  $\sigma_{A \text{ max}}$  - рівна середній аномальній рефракції,

$$\delta_{ан \text{ сер}}'' = \sigma_{A \text{ max}}'' \quad (8)$$

На відміну від відомого способу визначення та прогнозування рефракції, запропонований нами спосіб ґрунтується на тому, що максимальні коливання зображень візирних цілей є систематичними, закономірними величинами і залежать від довжини променя L Максимальні амплітуди коливання зображень  $\sigma_{A \text{ max}}$  за проміжки від однієї до декількох секунд регламентуються законом пливучості частинок повітря в атмосфері і описуються залежністю

$$\sigma_{A \text{ max}} = CL \gamma_{ан \text{ е сер}} \quad (9)$$

У формулі (9), яка є формулою аномальної рефракції, прийняті такі позначення

$$\sigma_{A \text{ max}} = \frac{\sigma_{\text{max}}}{2}$$

величини максимальних амплітуд коливань (флюктуацій) зображень в секундах дуги, C коефіцієнт, що залежить від тиску P та абсолютної температури T повітря, L довжина візирного променя,  $\gamma_{ан \text{ е сер}}$  аномальний середній еквівалентний вертикальний градієнт температури

Застосування запропонованого способу дає можливість визначити вертикальні градієнти температури без трудомістких метеорологічних вимірів у багатьох точках простору, причому визначаються осереднені для траси аномальні еквівалентні градієнти температури Для цього необхідно навести зорову трубу геодезичного приладу на візирну ціль і зафіксувати коливання її, наприклад, за допомогою бісектора зорової труби високоточного нівеліра, виміряти величину максимальних коливань зображень і визначити величину рефракції Згідно з (9), величинам максимальних амплітуд коливань зображень візирних цілей відповідають значення аномального, середнього еквівалентного вертикального градієнта температури  $\gamma_{ан \text{ е сер}}$  За вимірними величинами коливань визначають  $\gamma_{ан \text{ е сер}}$  за залежністю

$$\gamma_{ан \text{ е сер}} = \frac{\sigma_{A \text{ max}}}{CL} \quad (10)$$

яка виходить з залежності (9) Маючи значення аномального еквівалентного градієнта температури, є можливість прогнозувати величину максимальних коливань візирних цілей, тобто

середню аномальну рефракцію на всій довжині візирного променя

Точність визначення вертикальних аномальних градієнтів температури на основі коливань візирних цілей запропонованим способом за версією, що  $\sigma_i = f(L_i)$  (залежність (9), (10)) є у декілька разів вищою порівняно з відомим способом, в якому припускають, що  $\sigma_i = f(L_i^{1/2})$  (залежність (1)), тобто вважають, що величини максимальних коливань зображення візирної цілі є випадковими Тому й точність прогнозування рефракції запропонованим способом у стільки ж разів вища, порівняно з відомим способом

Запропонований спосіб визначення та прогнозування рефракції має ряд переваг порівняно з відомими, а саме

Підвищення точності прогнозування рефракції внаслідок підтвердження версії, що максимальні величини коливань зображення візирної цілі, тобто вертикальна аномальна рефракція, прямо пропорційні довжині візирного променя ( $\sigma_i = f(L_i)$ ) порівняно з відомим способом, в якому припускають, що  $\sigma_i = f(L_i^{1/2})$

Спосіб дає можливість з високою точністю визначити флюктуації градієнта температури

Спосіб може бути використаний як на коротких, так і на довгих, неоднорідних трасах

Спосіб дає можливість визначити важливі параметри турбулентності атмосфери, такі, як структурні характеристики температури  $C_T$  та показника заломлення  $C_n$

Реалізація запропонованого способу показана на прикладі одного з експериментів Для експерименту були вибрані лінії довжиною 10, 25, 33, 40, 45, 50, 60 метрів Висота візирного променя постійна, рівна 1,6м З метою одержання надійних результатів спостереження проводилися над трьома різними за альбедо підстилаючими поверхнями асфальт, ґрунтова дорога, луки Геодезичний прилад, у даному випадку високоточний нівелір, встановлюють на одному кінці лінії, а візирну ціль штрихову нівелірну рейку, на другому кінці лінії Наводять зорову трубу геодезичного приладу,

наприклад, високоточного нівеліра на ціль, наприклад, штрихову рейку Фіксують коливання цілі (тобто штрихів рейки) у турбулентній атмосфері Вимірюють величину максимальних коливань зображення візирної цілі (штрихів рейки)  $\Gamma_{\text{max}}$  за допомогою бісектора зорової труби нівеліра

Середня квадратична помилка визначення максимальних флюктуацій зображення штрихів рейки дорівнювала  $m_{\phi} = 0,0104$ мм

Лінійна  $\Gamma_{\text{max}}$  та кутова  $\sigma''_{\text{max}}$  амплітуди флюктуацій зображення цілей зв'язані співвідношенням

$$\frac{\Gamma_{\text{max}}}{L} = \frac{\sigma''_{\text{max}}}{\rho''}$$

звідки

$$\sigma''_{\text{max}} = \frac{\Gamma_{\text{max}} \rho''}{L} \quad (11)$$

Тут  $\rho'' = 206265''$  число секунд у радіані, L довжина лінії

Результати вимірів та розрахунки за формулами

$$\delta_{(L_i)} = \frac{\delta_{60} L_i}{60} \quad (12)$$

$$\delta_{(L_i^{1/2})} = \frac{\delta_{60} \sqrt{L_i}}{60} \quad (13)$$

наведені у таблиці 1

Згідно з формулами (12) і (13), виміряні значення  $\delta_{\max}$  для ліній у 60м, були прийняті за

вихідні. Далі були обчислені амплітуди для інших довжин ліній -  $L_i$  за гіпотезами  $\delta_{\max i} = f(L_i)$  та  $\delta_{\max i} = f(L_i^{1/2})$

Для перевірки гіпотез залежності максимальної величини кутових коливань як  $f(L_i)$  залежність (9) та як  $f(L_i^{1/2})$  залежність (1) були визначені різниці  $v_i$  між обчисленими та виміряними значеннями максимальних амплітуд флуктуацій

Таблиця 1

Результати вимірювань коливань візирної цілі та розрахунків їх при припущеннях  $\sigma_i = f(L_i)$ ,  $\sigma_i = f(L_i^{1/2})$

Підстилаючі поверхні	Довжини ліній $L$ (м)	Максимальні лінійні виміряні амплітуди флуктуацій (мм) $r_{\max i}$	Максимальні кутові амплітуди флуктуацій (в секундах дуги) $\delta_{\max i}$	Кутові амплітуди за гіпотезами		Середні квадратичні помилки підтвердження гіпотез	
				$\delta_i = f(L_i)$	$\delta_i = f(L_i^{1/2})$	$v_{\delta}(L_i)$	$v_{\delta}(L_i^{1/2})$
	1	2	3	4	5	6	7
Асфальт	10	0,06	1,24	1,20	2,95	0,04 +1,71	
	25	0,38	3,14	3,01	4,67	0,13 +1,53	
	33	0,66	4,12	3,97	5,34	0,15 +1,22	
	40	0,92	4,74	4,81	5,90	+0,07 +1,26	
	45	1,23	5,64	5,42	6,26	-0,22 +0,62	
	50	1,56	6,44	6,02	6,60	-0,42 +0,16	
	60	2,10	7,22	(7,22)	(7,22)	(0,00) (0,00)	
Грунтова дорога	10	0,03	0,62	1,04	2,54	+0,42 +1,92	
	25	0,24	1,98	2,59	4,01	+0,61 +2,04	
	33	0,52	3,25	3,42	4,61	+0,17 +1,36	
	40	0,76	3,92	4,15	5,08	+0,23 +1,16	
	45	1,00	4,58	4,66	5,39	+0,08 +0,81	
	50	1,33	5,49	5,18	5,68	-0,31 +0,19	
	60	1,81	6,22	(6,22)	(6,22)	(0,00) (0,00)	
Луки	10	0,02	0,41	0,90	2,22	+0,49 +1 81	
	25	0,21	1,73	2,26	3,51	+0,53 +1 78	
	33	0,40	2,5	2,99	4,03	+0,49 +1 53	
	40	0,61	3,14	3,62	4,43	+0,48 +1 29	
	45	0,86	3,94	4,07	4,71	+0,13 +0 77	
	50	1,09	4,50	4,52	4,96	+0,02 +0 46	
	60	1,58	5,43	(5,43)	(5,43)	(0 00) (0 00)	

$$v_{\delta(L_i)} = \delta_{(L_i)} - \delta_{\max i} \quad (14)$$

$$v_{\delta(L_i^{1/2})} = \delta_{(L_i^{1/2})} - \delta_{\max i} \quad (15)$$

Середні квадратичні помилки підтвердження гіпотез  $\delta_i = f(L_i)$  і  $\delta_i = f(L_i^{1/2})$  дорівнюють  $m_{(L_i)} = 0 33'$ ,  $m_{\delta(L_i^{1/2})} = 1 33'$  відповідно. Ступінь довіри до гіпотез є ваги  $P_i$ , що є оберненими величинами до квадратів середніх квадратичних помилок. Відношення ваг

$$\frac{P_{\delta(L_i)}}{P_{\delta(L_i^{1/2})}} = \frac{m_{\delta(L_i^{1/2})}^2}{m_{\delta(L_i)}^2} = \frac{(1 33')^2}{(0 33')^2} = 16$$

свідчить, що ступінь довіри до гіпотези, що максимальні кутові амплітуди коливань зображень слід визначити із співвідношення  $f(L_i)$  за залежністю (9) у 16 разів більша від гіпотези, що ті ж амплітуди слід визначати із співвідношення  $f(L_i^{1/2})$  за залежністю (1)

Визначають аномальні середні еквівалентні вертикальні градієнти температури за залежністю

$$\gamma_{\text{ан е с е р}} = \frac{\sigma_{A \max}}{CL}$$

де  $\sigma_{\max}$  максимальна амплітуда коливань зображень за 12сек (величина рефракції),  $L$  - віддаль від приладу до візирної цілі,  $C$  - стала. На основі цього прогнозують аномальну вертикальну рефракцію

Прогнозування аномальної вертикальної рефракції запропонованим способом у декілька разів точніше порівняно з відомим. Це є наслідком того, що точність визначення аномальних середніх еквівалентних вертикальних градієнтів температури на основі коливань візирних цілей є у декілька разів вищою, порівняно з існуючим способом

