

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ**

Каблак Наталія Іванівна

УДК 521.2+520.16

**Вплив атмосфери на віддалемірні спостереження
штучних супутників Землі**

01.03.01-астрометрія і небесна механіка

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Ужгород-1999

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі оптики в лабораторії космічних досліджень Ужгородського державного університету, Міносвіти України, в Головній астрономічній обсерваторії Національної Академії наук України.

Науковий керівник : — доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Миронов Микола Трохимович,
Головна астрономічна обсерваторія
Національної академії наук України,
старший науковий співробітник

Офіційні опоненти : — доктор фізико-математичних наук,
професор Марченко Олександр
Миколайович, Львівський державний
університет "Львівська політехніка",
професор

— кандидат фізико-математичних
наук, старший науковий співробітник
Медведський Михайло Михайлович,
Головна астрономічна обсерваторія
Національної академії наук України,
старший науковий співробітник

Провідна організація : Астрономічна обсерваторія
Київського університету
ім. Т.Г. Шевченка,
м. Київ.

Захист відбудеться "22" квітня 1999 року на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.208.01 при ГАО НАН України. Початок засідання о 10 годині у великому конференц-залі ГАО за адресою:
252650, м. Київ-22, Голосіїв, ГАО НАН України.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ГАО НАН України.

Автореферат розісланий "21" березня 1999 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
к. ф.-м. наук



Гусева Н.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ випливає із необхідності розвитку технології денних лазерних та радіотехнічних спостережень штучних супутників Землі (ШСЗ), підвищення точності моделей редуцій за вплив атмосфери, врахування регіональних та локальних особливостей рефракційного поля, що відповідає задачам сучасного розвитку космічної геодезії і знаходить відображення в тематиці міжнародних симпозіумів, проектів, програм: Міжнародної служби обертання Землі (МСОЗ), Державної програми “Створення та розвиток державної служби єдиного часу і еталонних частот України” та інших національних проектів.

Існує велика кількість конкретних методів визначення атмосферної поправки до результатів астрономо-геодезичних вимірів, розроблених вченими України, Росії та інших зарубіжних країн (І.Г.Колчинський, І.І.Мотрунич, М.Т.Миронов, М.Ф.Нелобін, А.Г.Нефедьєва, А.Л.Островський, О.В.Прокопов, А.В.Шабельников, Г.А.Шандуров, Л.С.Юношев, Дж.Аскне, Г.Бейбі, П.Бендер, Ф.Брюннер, Дж.Девіс, К.Гарднер, Г.Хопфільд, Дж.Мюррей, Я.Саастамойнен та інші).

Для визначення атмосферної поправки найточнішими вважаються моделі Саастамойнена та Маріні-Мюррея, які забезпечують точність визначення віддалі до ШСЗ декілька сантиметрів при зенітній відстані порядку 70° - 80° . Перевірка відносної точності моделі Маріні-Мюррея, яку МСОЗ використовує як стандарт при опрацюванні лазерних віддалемірних спостережень ШСЗ, була проведена для регіону США, а також дещо пізніше для регіону України на нічний час доби.

Розвиток денних лазерних спостережень ШСЗ, підвищення інструментальної точності лазерних вимірювань відстаней до ШСЗ до 1-5 мм, розвиток радіотехнічних спостережень (GPS- спостереження), та виконання міжнародних національних програм і проектів зумовили необхідність проведення наших досліджень.

ЗВ'ЯЗОК РОБОТИ З НАУКОВИМИ ПРОГРАМАМИ, ПЛАНАМИ, ТЕМАМИ.

Робота виконана в рамках завдань державної програми “Створення та розвиток служби єдиного часу і еталонних частот України”, науково-дослідницьких тем Головної астрономічної обсерваторії Національної Академії Наук України (ГАО НАНУ), комплексного міжнародного та міжвузівського проекту “Закінчення створення мережі лазерно-локаційних станцій для спостереження ШСЗ на території України для вирішення завдань з геофізики, геодезії, картографії, навігації, геології, екології та метеорології” та в рамках науково-дослідницьких робіт лабораторії космічних досліджень Ужгородського державного університету.

Розроблені в дисертації алгоритми і програми, уточнена модель Маріні-Мюррей, результати дослідження атмосферних редуцій у віддаль за даними денних аерологічних зондувань атмосфери передані в ІАГО НАН України та на кафедру Пряшівського Університету (Словакія). Їх також можна рекомендувати для використання при обробці віддалемірних спостережень ШСЗ на пунктах створюваної міжвузівської мережі лазерно-локаційних станцій, а також можуть бути використані при створенні національної мережі геодинамічних станцій та опрацюванні результатів астрономо-геодезичних спостережень.

МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета дисертаційної роботи - більш точно врахування впливу атмосфери на результати віддалемірних спостережень ШСЗ у регіоні України в денний час доби.

Для досягнення поставленої мети була визначена необхідність розв'язання таких конкретних задач:

1. Дослідити, використовуючи сферично-симетричну та несферичну моделі, вплив земної атмосфери на результати віддалемірних лазерних та GPS-спостережень ШСЗ за одержаними впродовж року даними денних аерологічних зондувань атмосфери у регіоні України та в Будапешті.
2. Провести оцінку та аналіз моделей редуцій за атмосфери, рекомендованих МСОЗ для обробки віддалемірних спостережень ШСЗ.
3. Співставити результати дослідження впливу атмосфери на віддалемірні лазерні спостереження ШСЗ у нічний та денний час доби.
4. Дослідити і удосконалити моделі редуцій за атмосферу на основі виявлених регіональних і локальних особливостей впливу атмосфери на лазерні і радіовіддалемірні спостереження ШСЗ.

НАУКОВА НОВИЗНА ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

В роботі вперше за даними денних аерологічних зондувань атмосфери:

1. Досліджено регіональні особливості та просторово-часові варіації атмосферних поправок до результатів лазерних та радіовіддалемірних вимірів у регіоні України.
2. Проведено оцінку та аналіз рекомендованих МСОЗ стандартних моделей для редуцій за денну атмосферу при віддалемірних спостереженнях ШСЗ.
3. Уточнена стандартна модель Маріні-Мюррей для знаходження величини поправки за вплив атмосфери при лазерних віддалемірних спостереженнях ШСЗ для регіону України.
4. Виконано порівняння результатів оцінки та аналізу стандартних моделей за даними нічних і денних аерологічних зондувань атмосфери.

5. Досліджено вплив вмісту водяної пари в тропосфері на результати радіотехнічних спостережень ШСЗ.

6. Досліджено і враховано регіональні та локальні особливості рефракційного поля в моделях редукції за атмосферу при лазерних та радіовіддалемірних спостереженнях ШСЗ.

ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Дослідження впливу атмосфери на результати лазерних і радіотехнічних спостережень ШСЗ за даними денних аерологічних зондувань відповідає вимогам сучасного розвитку космічної геодезії, створення національної мережі геодинамічних станцій і технології денних спостережень ШСЗ.

Практичне значення результатів роботи полягає в тому, що за даними аерологічного зондування атмосфери у регіоні України досліджено атмосферну поправку у віддаль до ШСЗ, уточнено формулу Маріні-Мюррей, яка рекомендована МСОЗ як стандарт при обробці лазерних спостережень і досліджено вплив нейтральної атмосфери при GPS-спостереженнях.

Результати роботи можуть бути використані для методичного забезпечення астрономічних обсерваторій, станцій лазерних супутникових спостережень, центрів обробки астрометричних даних, а також можуть бути включені до навчальних курсів вузів, що готують фахівців із астрономії та геодезії.

Одержані в дисертації результати реалізовано в програмному забезпеченні для розрахунку поправок за атмосферу при астрономіко-геодезичних спостереженнях.

ДОСТОВІРНІСТЬ І ОБГРУНТОВАНІСТЬ НАУКОВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ І ВИСНОВКІВ

сформульованих в дисертації, перевірялись шляхом порівняння з відомими з літератури результатами інших авторів, обробки великих масивів вимірювань, і забезпечені коректним використанням статистичних і математичних методів та друкованістю результатів.

ОСОБИСТІЙ ВНЕСОК ЗДОБУВАЧА полягає в безпосередній участі в постановці задач, розробці методів їх розв'язання, проведенні аналітичних та чисельних розрахунків, аналізі та інтерпретації одержаних результатів, формулюванні висновків, підготовці матеріалів до публікації.

НА ЗАХИСТ ВІНОСЯТЬСЯ:

1. Результати дослідження впливу атмосфери на лазерні і радіотехнічні віддалемірні спостереження ШСЗ за даними 468 денних аерологічних зондувань атмосфери в Ужгороді, Києві, Львові, Шепетівці, Сімферополі, Чернівцях, Одесі та Будапешті.

2. Результати оцінки та аналізу стандартної моделі редукцій за атмосферу, рекомендованої МСОЗ.

3. Порівняння та аналіз стандартних моделей атмосферних редукцій у віддалі до ШСЗ на основі обробки даних нічних і денних аерологічних зондувань атмосфери.

4. Уточнені моделі редукції за атмосферу з урахуванням виявлених регіональних і локальних особливостей впливу атмосфери на віддалемірні спостереження ШСЗ.

5. Дослідження нахилів ізопекнічних поверхонь і великомасштабних горизонтальних градієнтів рефракції, їх зміни з часом та висотою над рівнем моря.

6. Дослідження впливу вмісту водяної пари в тропосфері на результати радіовіддалемірних спостережень ШСЗ.

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні результати роботи доповідались і обговорювались на Міжнародній науковій Конференції "Фізика Місяця і планет" (Харків, 1994), Науковій конференції, присвяченій 225-ій річниці заснування астрономічної обсерваторії Львівського університету (Львів, 1994), Міжнародному симпозиумі "Обертання Землі і системи відліку в геодинаміці" (Польща, Варшава, 1995), на III-му з'їзді Української Астрономічної Асоціації (Київ, 1995), Українській науково-технічній конференції "Метрологія в геодезії" (Харків, 1996), Міжнародній науковій конференції, присвяченій 125-ій річчю Астрономічної обсерваторії Одеського університету "Сучасні проблеми астрономії" (Одеса, 1996), на четвертому з'їзді Української Астрономічної Асоціації (Київ, 1997), II-й науковій конференції пам'яті Б.Т.Бабія "Вибрані питання астрономії та астрофізики" (Львів, 1998), наукових семінарах ГАО НАНУ, а також на щорічних наукових конференціях викладачів та наукових співробітників фізичного факультету УжДУ (1995-1998рр).

ПУБЛІКАЦІЇ. По матеріалах дисертації опубліковано 11 робіт, які приведені наприкінці автореферату.

СТРУКТУРА ТА ОБСЯГ ДИСЕРТАЦІЇ

Дисертація складається з вступу, трьох розділів, висновків і списку літератури. Вона містить 133 сторінок друкованого тексту, 19 рисунків, 9 таблиць, а також список літератури з 109 найменувань.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми, сформульована мета роботи, визначена наукова новизна і практична цінність одержаних результатів, подані основні положення, що виносяться на захист, а також стисла анотація роботи.

Перший розділ присвячений огляду літератури за темою. З метою підвищення точності астрономо-геодезичних спостережень виявлено необхідність проведення досліджень впливу атмосфери на результати віддалемірних спостережень штучних супутників Землі на денний період доби в регіоні України.

Другий розділ, присвячений дослідженню впливу атмосфери на точність лазерних віддалемірних спостережень штучних супутників Землі (ШСЗ).

Атмосферну поправку у віддаль при лазерній локації ШСЗ можна записати у такий спосіб:

$$\Delta\rho = \Delta\rho_1 + \Delta\rho_2 \quad (1)$$

$$\Delta\rho_1 = 10^{-6} \int_S N(S) dS \quad (2)$$

$$\Delta\rho_2 = \iint_S [1 - \cos(\Delta z)] dS, \quad (3)$$

де $N(S) = 10^6 [n(S) - 1]$ - індекс рефракції,

Δz - астрономічна рефракція в довільній точці просторової кривої S .

Формули (2) і (3) – це інтегральні вирази для поправки у віддаль із-за зміни швидкості поширення імпульсу в атмосфері $\Delta\rho_1$ та для поправки, яка враховує викривлення траєкторії лазерного імпульсу внаслідок рефракції (геометрична поправка), $\Delta\rho_2$. Індекс рефракції в довільній точці просторової кривої S описується функцією сферичних координат: висоти h над рівнем моря, географічної широти φ і географічної довготи λ . Це дає можливість величину поправки $\Delta\rho_1$ подати сумою двох членів:

$$\Delta\rho_1 = \Delta\rho_{1S} + \Delta\rho_g, \quad (4)$$

де $\Delta\rho_{1S}$ – поправка за зміну швидкості розповсюдження лазерного імпульсу при припущенні сферично-симетричної моделі атмосфери,

$\Delta\rho_g$ – поправка, що зумовлена відхиленням профілів індекса рефракції від сферичної симетрії, тобто існуванням горизонтальних градієнтів рефракції.

Для сферично-симетричної моделі атмосфери обчислення поправки у віддаль, як суми поправок $\Delta\rho_{1S}$ і $\Delta\rho_2$, проводилось для $\lambda = 0.694$ мкм при $Z = 0^\circ, 35^\circ, 55^\circ, 70^\circ, 75^\circ, 80^\circ$. При цьому використано 468 аерологічних профілів метеопараметрів, одержаних протягом року практично в одні і ті ж моменти часу (12 годин Всесвітнього часу) в ясні дні (хмарність менша 2 балів) для 7 пунктів регіону України і Будапешту.

В таблиці 1 подані середні величини поправок $\Delta\rho_{1S}$ в досліджуваних пунктах для різних значень зенітної відстані.

Похибка інтегрування при обчисленні поправки у віддаль за зміну швидкості поширення лазерного випромінювання у атмосфері майже на всьому діапазоні зенітних відстаней Z від 0° до 80° становить приблизно 1 мм.

Похибка обчислення $\Delta\rho_{1S}$ методом чисельного інтегрування за даними аерологічного зондування атмосфери, обумовлена похибкою вимірювання метеопараметрів і становить біля 2 мм при $z=0^\circ$ і 9 мм при $z=80^\circ$. Співставлення результатів дослідження впливу атмосфери на віддалемірні лазерні спостереження ШСЗ в нічний та денний час доби показало, що значення $\Delta\rho_{1S}$ вдень є меншим ніж вночі (на 4 см при $z=80^\circ$).

Таблиця 1. Середні величини поправок $\Delta\rho_{1S}$ (м) на вибраних зенітних відстанях в досліджуваних пунктах.

Пункт	$h_0, \text{км}$	z, град					
		0	35	55	70	75	80
Одеса	0.040	2.383 ± 0.004	2.908 ± 0.004	4.148 ± 0.006	6.911 ± 0.010	9.080 ± 0.013	13.302 ± 0.020
Ужгород	0.120	2.366 ± 0.002	2.885 ± 0.003	4.120 ± 0.004	6.873 ± 0.006	8.987 ± 0.009	13.214 ± 0.014
Київ	0.170	2.350 ± 0.003	2.867 ± 0.003	4.088 ± 0.005	6.818 ± 0.008	8.953 ± 0.011	13.117 ± 0.016
Чернівці	0.210	2.349 ± 0.002	2.866 ± 0.003	4.086 ± 0.004	6.814 ± 0.007	8.943 ± 0.009	13.107 ± 0.014
Сімферополь	0.280	2.318 ± 0.001	2.829 ± 0.002	4.033 ± 0.004	6.725 ± 0.006	8.414 ± 0.008	12.926 ± 0.015
Шепетівка	0.280	2.328 ± 0.004	2.858 ± 0.005	4.044 ± 0.007	6.744 ± 0.012	8.857 ± 0.015	12.975 ± 0.023
Львів	0.330	2.303 ± 0.002	2.811 ± 0.003	4.007 ± 0.004	6.602 ± 0.007	8.777 ± 0.009	12.845 ± 0.013
Будапешт	0.150	2.355 ± 0.002	2.873 ± 0.002	4.097 ± 0.003	6.832 ± 0.005	8.968 ± 0.006	13.140 ± 0.015

Величина поправки $\Delta\rho_2$ залежить від z. При $z = 80^\circ$ поправка приймає середнє значення приблизно 3 см і при сучасних вимогах до точності вимірювань, значення $\Delta\rho_2$ потрібно враховувати при редуції нічних і денних лазерних спостережень ШСЗ. Середньоквадратичне відхилення $\Delta\rho_2$ від середнього за рік не перевищує 2 мм при $Z = 80^\circ$.

МСОЗ для обчислення впливу атмосфери в якості стандарту використовує формулу Маріні-Мюррей. Ця формула дозволяє обчислити поправку за атмосферу $\Delta\rho^m$ на основі вимірних наземних значень метеопараметрів P_0 , T_0 , W_0 в точці спостережень (на поверхні Землі). Вона одержана для сферично-симетричної моделі атмосфери і дає повну атмосферну поправку, тобто включає поправку $\Delta\rho_{1S}$ за зміну швидкості поширення лазерного імпульсу через атмосферу і за викривлення траєкторії $\Delta\rho_2$. За даними аерологічного зондування атмосфери тільки у регіоні США було проведено перевірку відносної точності цієї формули.

В роботі виконано перевірку точності формули Маріні-Мюррей на основі 268 денних значень аерологічних зондувань атмосфери на протягом року для семи пунктів України і пункта Будапешт. Використовуючи наземні значення

P_0 , T_0 , W_0 , обчислено значення поправки за формулою Маріні- Мюррей для різних пунктів зондування і проведено порівняння їх із значеннями атмосферної поправки $\Delta\rho = \Delta\rho_{15} + \Delta\rho_2$, одержаними методом чисельного інтегрування даних. Формула Маріні-Мюррей дає зміщене, а саме завищене значення поправки $\Delta\rho^m$. Величина зміщення вдень у 1.5 - 2 рази є більшою, ніж вночі. При $Z = 0^\circ$ вона становить 0.38 см, а при $Z = 80^\circ$ відповідно 2.7 см. Лише для пункту Чернівці вночі і вдень $\Delta\rho^m < \Delta\rho$.

Розходження результатів досліджень пояснюються тим, що: по-перше, формули Маріні-Мюррей були виведені для сферично-симетричної моделі атмосфери; по-друге, у формулі Маріні - Мюррей температурний градієнт ($\beta = -6$ °/км) вважається сталим на різних висотах h , по-третє, приймалася умова гідростатичної рівноваги. Є й інші наближення й допуски.

Приймаючи до уваги той факт, що різниці поправок ($\Delta\rho^m - \Delta\rho$) є змішеними у всіх пунктах регіону України та Будапешті, як в денний так і в нічний час доби, для досягнення потрібної точності проведено уточнення формули Маріні-Мюррей шляхом визначення коефіцієнтів, що враховують регіональні і локальні особливості атмосфери у пунктах спостереження. Значення коефіцієнтів наведені у таблиці 2.

Таблиця 2. Коефіцієнти A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , які враховують локальні особливості пунктів спостереження.

Пункт	A_1	A_2	$A_3 \cdot 10^{-4}$	$A_4 \cdot 10^{-5}$
Львів	1,00067	0,00968	1,936	7,34
Сімферополь	1,00040	0,00968	1,200	4,79
Київ	1,00053	0,00968	1,530	5,95
Шепетівка	1,00032	0,00968	0,895	3,38
Ужгород	1,00051	0,00968	1,480	5,82
Середнє для регіону України	1,00049	0,00968	1,410	5,45

Уточнена формула Маріні-Мюррей для регіону України дає можливість точніше обчислити значення поправки $\Delta\rho^m$. Так, при $Z = 70^\circ$ величина зміщення між $\Delta\rho$ і $\Delta\rho^m$ зменшується у 4 рази (рис.1).

Отже, для регіону України формулу для визначення коефіцієнта K при обчисленні поправки у віддаль по формулі Маріні - Мюррей можна записати у такий спосіб:

$$K = 1.00049 - 0.00968 \cos 2\varphi - 1.410 \cdot 10^{-4} T_0 + 5.45 \cdot 10^{-5} P_0 \quad (5)$$

Уточнену формулу Маріні-Мюррей можна рекомендувати при обчисленні поправки у віддаль до ШСЗ в регіоні України.

В даній роботі для дослідження впливу парів води на радіовіддалемірні спостереження ШСЗ було використано 260 даних денних аерологічних зондувань атмосфери в п'яти пунктах регіону України. Поправку $\Delta\rho_b$ обчислено на основі термодинамічних співвідношень за вимірними тільки на поверхні Землі метеопараметрами: температура T_0 , °K; тиск P_0 , мбар; відносна вологість W_0 , %.

Значення температури повітря T_i і тиску P_i на висоті h_i виражаються в такий спосіб :

$$T_i = T_0 - \beta_i h_i \quad (7)$$

$$P_i = P_0 \left(1 - \frac{\beta_i h_i}{T_0} \right)^{\frac{5.256}{R}} \quad (8)$$

де R - універсальна газова стала;

індекси $0, i$ - означають, що значення величин відносяться до поверхні Землі, а також до i -ї висоти атмосфери відповідно.

Вертикальний градієнт температури β_i на висоті h_i над поверхнею Землі (тобто швидкість зміни температури із висотою $\beta = -\frac{dT}{dh}$):

$$\beta_i = \frac{g}{C_{p,i}} \quad (9)$$

де g - прискорення вільного падіння.

В залежності від географічної широти φ та висоти пункту спостереження над рівнем моря h_0 вираз для g можна написати так :

$$g_i = 9,806 [1 - 0,0026 \cos 2\varphi - 0,00031(h_0 + h_i)], \text{ [м/с}^2\text{]} \quad (10)$$

Питома теплоємність вологого повітря рівна:

$$C_{p,i} = 1.005 \cdot 10^7 (1 + 0.96 S_i), \text{ [см}^2\text{/с}^2\text{град]} \quad (11)$$

Еквівалентну молекулярну вагу m_0 вологого повітря можна обчислити за формулою:

$$m_0 = 29 \cdot 18 / (18 + 11 S_0) \quad (12)$$

Питома вологість повітря на поверхні Землі S_0 , тобто кількість водяної пари в грамах, що міститься в одному грамi вологого повітря виражається так:

$$S_0 = 0.622 e_0 / (P_0 - 0.378 e_0) \quad (13)$$

Парціальний тиск e_0 водяної пари обчислюється за формулою Магнуса. Парціальний тиск e_i , виражений через вміст водяної пари S_i на висоті атмосфери h_i , рівний:

$$e_i = \{29 \cdot S_i / (18 \cdot 11 S_i)\} P_i, \text{ [мбар]} \quad (14)$$

В термодинамічній моделі S_i представлено так:

$$S_i = S_0 \cdot e^{-0.42 h_i}, \quad (15)$$

де h_i - в кілометрах.

Отже, профіль індекса рефракції вздовж шляху поширення електромагнітної хвилі одержується із рівнянь (7) - (15), а його інтеграл від поверхні Землі h_0 до висоти $h_b = 12$ км дає значення поправки $\Delta\rho_b^T$.

Для оцінки точності термодинамічної моделі було проведено порівняння значень поправок Δr_b^T із значеннями Δr_b визначеними за реальними миттєвими профілями метеопараметрів, які одержані під час спостережень ШСЗ.

Із результатів досліджень слідує, що на $z=75^\circ$ максимальна різниця поправок становить приблизно ± 16 см, а на $z=0^\circ$ - ± 4 см.

Такі розходження перш за все пояснюються тим, що висотний розподіл вмісту водяних парів неможливо точно представити певними співвідношеннями із-за локальних особливостей атмосфери. В термодинамічній моделі приймається, що висотний хід вмісту водяної пари описується експоненціальною залежністю (15), де коефіцієнт $\alpha=0.42\text{км}^{-1}$ приймається сталою величиною. Для більш детального дослідження вмісту водяної пари у атмосфері за формулою (13) було знайдено S_i на кожній висоті h_i в 5-ти досліджуваних пунктах, а по них до висоти $h_d=16$ км були визначені миттєві значення коефіцієнта α за формулою:

$$\alpha = \ln(S_i/S_0) / h_i \quad (16)$$

На рис.2 представлено реальні зміни коефіцієнта α з висотою h_i протягом року в безжмарні дні для Ужгорода. Для інших пунктів результати аналогічні. Із аналізу результатів видно, що до висоти $h_i=6$ км, спостерігаються великі зміни α (від -0.14 до $+0.93$) км^{-1} . Лише на висотах $h=(8-11)\text{км}$ α є достатньо стабільним у всіх досліджуваних пунктах протягом року і приблизно рівний $\alpha \approx 0.42\text{км}^{-1}$.

Використовуючи реальні значення α_i , на основі термодинамічної моделі було обчислено Δr_b^T і проведено порівняння із аналогічними еталонними значеннями Δr_b . Із аналізу результатів слідує, що термодинамічна модель дозволяє визначити Δr_b^T при $z=75^\circ$ із точністю ± 5 мм, якщо α є реальними. Отже, при цьому з'ясується необхідність дослідження регіональних і локальних особливостей моделей редукцій, які залежать від пори року і від часу проведення віддалемірних спостережень (день чи ніч).

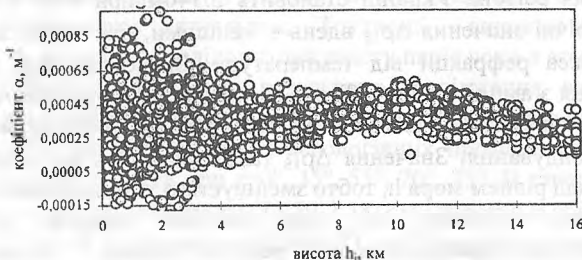


Рис.2. Зміна коефіцієнта α з висотою h_i протягом року для пункту Ужгород

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

У зв'язку із функціонуванням МСОЗ, виконанням міжнародних програм "Динаміка твердої Землі", ВЕГЕНЕР-МЕДЛАС, Державної програми "Створення та розвиток служби єдиного часу і еталонних частот України" та інших, а також підвищенням інструментальної точності віддалемірних спостережень штучних супутників Землі до 1-5 мм одним із актуальних завдань є оцінка і удосконалення моделей атмосферних редукцій при аналізі та інтерпретації астрономо-геодезичних спостережень.

В дисертаційній роботі виконано аналіз і оцінку впливу атмосфери на лазерні і радіовіддалемірні спостереження ШСЗ в регіоні України та в Будапешті за даними денних аерологічних зондувань атмосфери. При цьому досліджено регіональні та локальні особливості моделей редукцій за атмосфери.

В дисертаційній роботі одержано такі основні результати:

1. Вивчено і проведено аналіз впливу атмосфери, в кожній точці якої індекс рефракції N представлений функцією сферичних координат. Це дозволило оцінити окремо вплив сферично-симетричної атмосфери і горизонтальних градієнтів при лазерних спостереженнях ШСЗ.

Для сферично-симетричної атмосфери обчислено поправки у відстань до ШСЗ $\Delta\rho$, як суми поправок за зміну швидкості поширення лазерного випромінювання $\Delta\rho_{1S}$ і викривлення траєкторії із-за рефракції $\Delta\rho_2$ (геометричної поправки).

Обчислення поправки $\Delta\rho$ проводилось для $\lambda = 0.694\text{мкм}$ і $\lambda = 0.532\text{мкм}$ при $z = 0^\circ, 35^\circ, 55^\circ, 70^\circ, 75^\circ, 80^\circ$ з використанням 468 миттєвих метеопараметрів (P, T, W).

Зондування атмосфери проводилось до висоти 25-35 км протягом року в п'яти регіонах України і в Будапешті практично в одні і ті ж моменти часу (12^{h}UT) в ясні дні- (хмарність менша 2 балів).

Випадкова похибка обчислення N не перевищує 0.5 N - од., а похибка обчислення поправки $\Delta\rho$, що зумовлена похибками вимірювання метеопараметрів, становить біля 2 мм при $z = 0^\circ$ і 9 мм при $z = 80^\circ$. Поправка $\Delta\rho_{1S}$ в середньому для регіона України становить 2.340м при $z = 0^\circ$ і 13.09м при $z = 80^\circ$. Середні річні значення $\Delta\rho_{1S}$ вдень є меншими, ніж вночі, що слідує із залежності індекса рефракції від температури. Значенням $\Delta\rho_2$ притаманні сезонні коливання з амплітудою (6-8) см. Ці коливання обумовлені сезонними варіаціями метеопараметрів і залежать від географічного розташування пункту аерологічного зондування. Значення $\Delta\rho_{1S}$ також залежать від висоти пункту спостереження над рівнем моря h , тобто зменшуються із збільшенням висоти h .

Геометричну поправку $\Delta\rho_2$, при сучасних вимогах до точності вимірювань, потрібно враховувати при редукції нічних і денних лазерних спостереженнях ШСЗ. Значення $\Delta\rho_2$ при $z = 80^\circ$ для регіону України набуває

середнього значення приблизно 3 см. Середньоквадратичне відхилення Δr_2 від середнього за рік не перевищує 2 мм при $z=80^\circ$.

2. МСОЗ для обчислення величини впливу атмосфери при лазерних спостереженнях ШСЗ рекомендує формулу Маріні-Мюррея. Вона одержана для сферично-симетричної моделі атмосфери і дає повну поправку $\Delta r^m = \Delta r_{1S} + \Delta r_2$. Виконано перевірку точності формули Маріні-Мюррей на основі 468 денних миттєвих значень аерологічного зондування атмосфери в регіоні України. Встановлено, що формула Маріні-Мюррей дає завищене значення поправки Δr^m . Причому величина зміщення вдень у 1,5-2 рази більша, ніж уночі. Для $\lambda=694.3$ нм в середньому вона становить 0.38 см при $z=0^\circ$ і 2.7см при $z=80^\circ$. Випадкова похибка Δr^m становить від 1мм при $z=0^\circ$ і до 7 мм при $z=80^\circ$. Проведено уточнення формули Маріні-Мюррей для регіону України шляхом врахування регіональних та локальних особливостей атмосфери. Знайдено уточнені значення коефіцієнтів у формулі Маріні-Мюррей з урахуванням локально- топографічних особливостей для кожного досліджуваного пункту зокрема, і для регіону України в цілому. Величина зміщення при $z=70^\circ$ зменшилась у 4 рази. Отож для підвищення точності врахування впливу земної атмосфери на результати лазерної віддалеметрії в регіоні України можна рекомендувати уточнену формулу Маріні-Мюррей.

3. За даними денних синхронних аерологічних зондувань атмосфери протягом року в 5 пунктах України, розташованих на відстані 150-200 км один від одного, визначено великомасштабні горизонтальні градієнти рефракції Δr_g для різних висот h над землею поверхнею і оцінено їх вплив на лазерні спостереження ШСЗ. Опорним пунктом вибрано Львів. Горизонтальні градієнти індекса рефракції обумовлюють систематичну похибку. Тому виникає необхідність введення поправки Δr_g у відстань, що залежить від горизонтальних координат і азимута ШСЗ. Поправка Δr_g у відстань має синусоїдальну залежність від Δr_g , в середньому дорівнює (2.5-3.0) см при $z=70^\circ$ та зменшується до кількох міліметрів поблизу зеніта. Межі зміни значень горизонтальних градієнтів рефракції при денних спостереженнях ШСЗ у 2-3 рази більші, ніж при нічних.

4. Дослідження затримки радіосигналу Δr при поширенні в земній атмосфері та її врахування при проведенні високоточних віддалемірних спостережень ШСЗ все ще залишається актуальним. Труднощі виникають при визначенні поправки на відстань внаслідок зміни вмісту парів води в атмосфері.

В роботі представлено результати дослідження впливу нейтральної атмосфери на радіовіддалемірні спостереження ШСЗ. Обчислення проводились за даними 260 денних миттєвих аерологічних профілів метеопараметрів в 5 пунктах регіону України при $z=0^\circ, 35^\circ, 55^\circ, 70^\circ, 75^\circ$. В середньому для регіону України Δr при $z=0^\circ$ становить (2.29-2.38) см і зростає із збільшенням зенітної відстані. При $z=75^\circ$ Δr досягає (8.84-9.93)см. Поправка за вміст водяної пари у атмосфері Δr_p у всіх пунктах не перевищує (4-5)% від сумарної поправки Δr , але вплив на визначення відстані до ШСЗ є суттєвим із-за значних просторово-

Каблак Н.І.

Вплив атмосфери на віддалемірні спостереження штучних супутників Землі.

Дисертація на здобуття вченого степеня кандидата фізико-математичних наук із спеціальності 01.03.01 - Астрометрія й небесна механіка.

Головна астрономічна обсерваторія Національної Академії наук України, Київ, 1999.

Дисертація присвячена проблемі підвищення точності врахування впливу земної атмосфери на результати денних віддалемірних спостережень штучних супутників Землі.

За одержаними впродовж року даними денних аерологічних зондувань в регіоні України та в Будапешті, використовуючи сферичну симетричну та несферичну моделі атмосфери, визначено поправки, їх просторово-часові варіації.

Проведено оцінку та аналіз моделей редуцій за атмосферу, рекомендованих МСОЗ для обробки віддалемірних спостережень ШСЗ. Досліджено і удосконалено моделі редуцій за атмосферу на основі виявлених регіональних і локальних особливостей впливу атмосфери на лазерні та радіовіддалемірні спостереження ШСЗ.

Ключові слова: електромагнітний імпульс, атмосферна поправка, лазерні та радіовіддалемірні спостереження.

Kablak N.I.

Influence of the atmosphere on the distance ranging observations of the Earth artificial satellites.

Thesis for Candidate of Science Degree in Physics and Mathematics.

01.03.10- astrometry and skycelestial mechanics.

The Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 1999.

Dissertation is devoted to the problem of accuracy increasing in allowing for Earth's atmosphere influences on results of daily ranging observation of the Earth artificial satellites. Atmosphere delays and their spatial-timely variations for spherical-symmetrical and nonspherical models of atmosphere were determined radiosounding data gathered during a year in a regions of Ukraine and Budapest using. Developed valuing and analysis of models reductions to over of atmosphere, which recommended of IERS for processing distance ranging observation of the Earth artificial satellites. Investigated and improved models of reductions to over of the atmosphere on the basis of discovered regionals and local peculiarities of influence atmosphere on the laser and radio ranging observations of the of the Earth artificial satellites.

Keywords: electromagnetic impulse, atmosphere delay, laser and distance ranging observations

Каблак Н.И.

Влияние атмосферы на дальномерные наблюдения искусственных спутников Земли.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.01 - астрометрия и небесная механика. - Главная астрономическая обсерватория Национальной Академии наук Украины, Киев, 1999.

Диссертация посвящена проблеме повышения точности учета влияния земной атмосферы на результаты дневных дальномерных наблюдений искусственных спутников Земли (ИСЗ). На основании полученных на протяжении года данных аэрологического зондирования атмосферы в семи пунктах Украины (Одесса, Ужгород, Киев, Черновцы, Симферополь, Шепетовка, Львов) и в Венгрии (Будапешт), используя сферично-симметричную модель атмосферы, определены значения атмосферных поправок и их пространственно-временные вариации на разных зенитных расстояниях. Выполнен сравнительный анализ точности определения поправок в измерение дальности до ИСЗ в ночное и дневное время суток в зависимости от зенитного расстояния космических объектов. Результаты исследований предоставили возможность получения целостной картины региональных особенностей влияния атмосферы на результаты лазерной локации ИСЗ в ночное и дневное время суток.

Национальное управление по исследованию космического пространства (NASA) США и Международная служба вращения Земли (МСВЗ) для обработки дальномерных наблюдений ИСЗ в глобальной сети станций рекомендуют в качестве стандарта формулу Марини-Мюррей. Поэтому существует необходимость более строгой оценки точности данной формулы для разных регионов Земли, а также, для тех погодных условий и тех моментов времени, когда проводятся лазерные наблюдения ИСЗ.

Проведено анализ и получено оценку точности формулы Марини-Мюррей на основании 468 дневных значений аэрологического зондирования атмосферы на протяжении года для семи пунктов Украины для $\lambda = 0.694$ мкм и $\lambda = 0.532$ мкм. Результаты исследований показывают, что формула Марини-Мюррей дает завышенное значение атмосферной поправки у всех исследуемых пунктов. Величина смещения в дневное время суток в полтора - два раза больше чем в ночное. Проведено уточнение формулы Марини-Мюррей путем определения коэффициентов, что учитывают региональные и локальные особенности атмосферы в пунктах наблюдения. Уточненную формулу Марини-Мюррей можно рекомендовать для использования при обработке лазерных наблюдений ИСЗ в пунктах Украины.

Исследовано отклонение индексов рефракции от сферичной симметрии. По данным дневных синхронных аэрологических зондирований атмосферы на протяжении года в пяти пунктах Украины, находящихся на расстоянии не

