

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

Шкуратов

ШКУРАТОВ Юрій Григорович

ЗВОРОТНЕ РОЗСІДВАННЯ НЕПОЛЯРИЗОВАНОГО СВІТЛА
ВИПАДКОВО-НЕОДНОРІДНИМИ ПОВЕРХНЯМИ

01.04.05 - Оптика

01.03.03. - Геліофізика та фізика Сонячної системи

Автореферат дисертації
на здобуття вченого ступеня
доктора фізико-математичних наук

ХАРКІВ 1993

А 10 28.035

Роботу виконано у Харківському державному університеті

Офіційні опоненти: Доктор фізико-математичних наук,
професор В. К. Мілославський
(ХДУ, м. Харків)

Доктор фізико-математичних наук,
професор Ф. Г. Басс
(ІРЕ АН України, м. Харків)

Доктор фізико-математичних наук,
професор І. М. Фукс
(РІ АН України, м. Харків)

Ведуча організація: Головна астрономічна обсерваторія
АН України, м. Київ

Захист дисертації відбудеться 08. 10 1993 р. в 14 годин
на засіданні спеціалізованої ради Д 053.06.02 по захисту докторсь-
ких дисертацій в Харківському державному університеті (310077,
Харків-77, майдан Свободи, 4, ХДУ, ауд. ім. К. Д. Сінельнікова.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій
бібліотеці ХДУ.

Автореферат розіслано "05" 07 1993 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В. П. Пойда

ЛННБ України ім. В. Стефаника



00802320 (F)

ЛННБ ім. В. Стефаника
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Численні методи дистанційного зондування поверхонь як природного, так і штучного походження засновані на вимірюванні характеристик зворотного розсіювання. Наприклад, радіолокація чи оптичне зондування планетних поверхонь. Зворотне розсіювання як фізичний ефект стало вперше вивчатися кількісно саме в фізиці планет.

Інформативність дистанційної діагностики залежить від стану поляризації падаючого зондуючого випромінювання. Так, якщо це випромінювання поляризоване лінійно або циркулярно, то у загальному випадку розсіяне випромінювання буде частково деполаризоване і ступінь цієї деполаризації є важливим характеристиком поверхні, що досліджується. Якщо ж падаюче випромінювання повністю деполаризоване, то така діагностика менше ефективна через погрублення інформації, що отримується, за рахунок розкиду поляризацій падаючих хвиль. Але вибрати стан поляризації падаючого випромінювання можливо не завжди. Так, при спостереженнях Місяця та планет в оптичному діапазоні мають справу з сонячним випромінюванням, яке деполаризоване в дуже високій мірі. З цієї причини доводиться досліджувати випадок, не дуже цікавий з точки зору задач фізичної оптики, але вкрай важливий для розвитку оптичної діагностики планет.

Більшість таких тіл вдається спостерігати з Землі тільки при малих кутах фази (кут поміж напрямками: планета - Сонце, планета - Земля), тобто саме в умовах зворотного розсіювання. Це означає, що якщо походження зворотного розсіювання трактується неадекватно, то численні телескопічні дослідження Місяця, астероїдів, супутників планет та інших об'єктів стануть з діагностичної точки зору не ефективними до того часу, доки не буде знайдено вірний підхід. До недавнього часу саме така ситуація і спостерігалась у фотометрії та поляриметрії планет.

Необхідність надійних моделей для опису особливостей зворотного розсіювання неполяризованого світла реголітоподібними поверхнями в повній мірі обґрунтовує актуальність вибраної теми дисертації.

Мета роботи. Метою цієї роботи є експериментальне та теоретичне дослідження зворотного розсіювання неполяризованого світла випадково-неоднорідними поверхнями в контексті сучасних

результатів фотометричних та поляриметричних вимірювань твердих поверхонь небесних тіл.

Наукова новизна. При малих кутах фази практично усі безатмосферні небесні тіла, зразки неземної речовини (метеорити, ґрунт Місяця), а також декотрі матеріали земного походження (природні, штучні) виявляють так званий опозиційний ефект та від'ємну поляризацію. До цього часу в деяких роботах обидві ці особливості зворотного розсіювання розглядаються тільки з традиційних позицій тіньового ефекту, тоді як зараз відомі і інші механізми (наприклад, когерентне посилення зворотного розсіювання), які треба приймати до уваги. Цю роботу присвячено розвитку нетрадиційних підходів у фотометрії та поляриметрії поверхонь з випадково-неоднорідною структурою, зокрема, поверхонь безатмосферних небесних тіл. Так, уперше вдалося на досить широкому експериментальному матеріалі довести спільність походження опозиційних ефектів яскравості та поляризації, що є важливим для опрацювання їх інтерпретаційної основи. У ході лабораторних оптичних вимірювань вперше вдалося встановити великий вплив оптичної гетерогенності поверхні, що розсіє, на властивості від'ємної поляризації. Цей фактор раніш ніде не фігурував і ні в одній із теоретичних моделей не приймався до уваги, хоч як зараз зрозуміло, він є одним із ведучих. Підкреслимо також, що цикл лабораторних вимірювань, що подається, є найбільш повним з аналогічних - досліджено кілька сотень зразків по чітко визначених наукових програмах.

Побудовано теоретичні моделі зворотного розсіювання на базі тіньового та інтерференційного механізмів. Раніше можливість такого поєднання в достатньо повній та коректній формі не досліджувалась. Усі розроблені теоретичні моделі підтверджуються результатами їх порівняння як з даними лабораторних оптичних вимірювань і чисельного моделювання, так і з даними натурних досліджень небесних тіл.

Новим в оптиці випадково-неоднорідних поверхонь є одержання так званої ондуляційно-інваріантної фотометричної функції, яка добре описує експериментальні дані. Вперше побудовані зображення та карти параметрів зворотного розсіювання для декотрих ділянок поверхні Місяця. На цих зображеннях чітко виділяються ділянки, що відповідають попільним відкладенням, які супроводжують пізні вулканічні події. Раніш такі зони вдалося ідентифікувати тільки

по космічним зображенням високої роздільної здатності.

Практичне значення. Роботу виконано на межі деяких розділів фізичної оптики та планетології. Так, результати лабораторних оптичних вимірювань, а також формули для оцінок опозиційного ефекту та від'ємної поляризації можуть бути корисні у тих фізичних задачах, де йдеться про ефекти слабкої локалізації часток, наприклад, слабкої локалізації фотона. Формули для розрахунку затіненень статистично-шорсткої поверхні, які приймають до уваги зкорельованість входу та виходу променів, необхідні при інтерпретації даних бістатичної локації поверхні Землі, зокрема - Світового океану, і планет. Особливий інтерес результати роботи становлять для фізичних досліджень поверхонь планет. В роботі на конкретному прикладі (поверхня Місяця) показано, що параметри зворотного розсіювання можуть бути наведені у вигляді зображень або карт. Такий метод вивчення зворотного розсіювання разом з відомими, а також одержаними автором дисертації експериментальними та теоретичними результатами, може розглядатись як новий науковий напрямок в оптиці твердих поверхонь планет. Він може одержати розвиток у дослідженнях Землі із космосу, зокрема в задачах екологічного районування її поверхні.

На захист вносився:

1. Експериментальні докази загального (інтерференційного) походження частини опозиційного ефекту яскравості та від'ємної поляризації світла реголітоподібних поверхонь.
2. Виявлення та дослідження сильного впливу оптичної гетерогенності поверхні що розсіє на характеристики зворотного розсіювання.
3. Рішення задачі затінення статистично шорсткими та випадково-неоднорідними поверхнями з урахуванням скорельованості входу та виходу променів.
4. Інтерференційний механізм формування від'ємної поляризації світла, розсіяного реголітоподібними поверхнями при малих кутах фази.
5. Модель спектрального ходу альбеда порошкоподібних поверхонь та її використання для інтерпретації спектрофотометричних вимірювань Місяця.
6. Ондуляційно-інваріантна фотометрична функція, яка описує дані спостережень твердих поверхонь небесних тіл при значно меншій кількості параметрів, ніж загальноприйняті моделі Халке та

Льме-Буела.

7. Зображення та карти параметрів зворотного розсіювання деяких ділянок поверхні Місяця.

Апробація. Матеріали дисертації були наведені у вигляді усних доповідей на: Всесоюзній конференції "Поляриметричні методи в астрофізиці" (6 - 11 жовтня 1983 р., Казивелі); Всесоюзній науково-координаційній нараді "Актуальні проблеми та перспективи досліджень Місяця" (24 - 27 вересня 1984 р., ГАО АН СРСР, Пулково); Всесоюзному семінарі-нараді "Розсіювання світла поверхнями планет та атмосферними аерозолями" (квітень 1984 р., Харків); Всесоюзному семінарі-нараді "Проблеми дистанційного зондування Місяця" (23 - 26 квітня 1985 р., Харків); Всесоюзній нараді "Поляриметричні методи в астрофізиці" (29 вересня 1987 р. - 3 жовтня 1987 р., Абастумані); ХХ Всесоюзній метеоритній конференції (10 - 12 лютого 1987 р., Таллінн); семінарі-нараді "Лабораторне моделювання комет" (24 - 27 травня 1988 р., Душанбе); засіданнях робочої групи "Астероїди" (квітень 1987 р., Душанбе, 31 жовтня - 6 листопада 1988 р., Загальба); Всесоюзній науково-координаційній нараді "Інформаційно-комп'ютерне забезпечення комплексних досліджень Місяця" робочої групи "Місяць" (4-8 вересня, Славське 1989 р.); Всесоюзній нараді "Наукові проблеми місячної бази" (5 - 8 лютого 1991 р., ДАІШ МДУ, Москва); засіданні робочої групи "Місяць", присвяченому науковим завданням полярного супутника Місяця (4 - 8 жовтня 1991 р., САО АН СРСР, Зеленчукська); а також на усіх щорічних робочих нарадах за проблемами порівняльної планетології (США - СРСР), які проводились ГЕОХІ АН СРСР у Москві в 1985 - 1992 рр.; міжнародних робочих нарадах за проектом "Фобос" (24 - 28 листопада 1986 р., 13 - 16 лютого і 15 - 19 травня 1989 р.); щорічних конференціях відділення планетних наук Американського астрономічного товариства (31 жовтня - 3 листопада 1989 р., Провіденс; 12 - 16 жовтня 1992 р., Мюнхен); семінарах у департаменті геологічних наук в Університеті Браука (листопад 1989 р., США); семінарах Астрономічної обсерваторії Хельсинського університету (червень 1990 р., квітень 1991 р., Фінляндія) і т.п.

Обсяг та структура роботи. Робота складається із вступу, трьох розділів, закінчення і списку літератури (510 найменування). Загальний обсяг роботи: 476 сторінок, із них 131 сторінка малюнків та 5 таблиць. У кінці кожного розділу наведено зведення основних результатів, отриманих автором.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність досліджень в галузі зворотного розсіювання світла випадково-неоднорідними поверхнями, зокрема поверхнями безатмосферних небесних тіл; сформульовано мету дисертаційної роботи; наведено положення, які виносяться на захист; коротко викладено зміст дисертації.

У першому розділі наведено огляд робіт, умовно поділених на три частини: 1) фотометричні та поляриметричні спостереження поверхонь небесних тіл при малих кутах фази; 2) лабораторні оптичні дослідження, що імітують вимірювання поверхонь планет; 3) теоретичні роботи, присвячені механізмам посилення зворотного розсіювання та від'ємної поляризації світла, розсіюваного реголітоподібними поверхнями. Аналіз даних показує:

1. Опозиційний ефект яскравості та від'ємна поляризація розсіюваного світла характерні для усіх досліджених твердих поверхонь небесних тіл, включаючи частки кометного пилу та зодіакального світла.
2. Обидва ефекти як правило супроводжують один одного хоч іноді (наприклад, у випадку Європи - другого галілеєвого супутника Юпітера) при наявності значного опозиційного ефекту спостерігається дуже слабка гілка від'ємної поляризації.
3. Амплітуда опозиційних сплесків яскравості світлих тіл як правило вище, ніж у темних, але ширина піку при цьому помітно менша.
4. Відкриття вузького опозиційного сплеску у дуже світлих поверхонь, наприклад, свіжонапиленого зразка MgO .
5. Відкриття плавного ходу фазової залежності яскравості при переході через нульовий кут фази.
6. Доведення "резонансного" походження від'ємної поляризації при зміні розміру частинок.

Теорії Халке і Лме-Боуела, якими широко користуються у фотометрії планетних поверхонь, а також модель Вольфа, що була створена для з'ясування від'ємної поляризації, нездатні описати й половину перелічених фактів спостережень і лабораторних вимірів. Це вказує на необхідність і своєчасність дальших робіт, що спрямовані як на розвиток лабораторних досліджень аналогів ґрунту планетних тіл, так і створення сучасних теоретичних підходів для інтерпретації експериментальних даних.

Другий розділ присвячено опису лабораторного фотометра-поляриметра, що імітує умови спостереження небесних тіл, а також опису і аналізу численних вимірів земних аналогів ґрунтів планет, метеоритів і реголіту Місяця. Зокрема, показано, що:

1. Існує чітка різниця в характері яскравісного, кольорового та поляриметричного опозиційних ефектів діелектричних і металічних випадково-неоднорідних поверхонь. Так, у порошкоподібних поверхонь однорідних матеріалів з розмірами часток більш за 10 мкм, помітна від'ємна поляризація спостерігається тільки у металів.

2. Опозиційний ефект яскравості і особливо від'ємна поляризація посилюється при зростанні оптичної гетерогенності тонкодисперсних поверхонь діелектриків. Ефект посилення від'ємної поляризації (величини $|P_{\min}|$) для сумішу пудри ільменіту та кварцу виявляється чотирикратним.

3. Залежність нахилу фазової функції яскравості, а також параметра від'ємної поляризації $|P_{\min}|$ від альbedo поверхонь з тонков структурою A має складний двогілястий характер.

4 Для дуже різних за природою поверхонь виявляється кореляція між параметрами опозиційного ефекта яскравості і від'ємної поляризації. Таким чином, від'ємна поляризація та звичайний опозиційний ефект яскравості - різні прояви одного й того ж явища.

5. Параметри опозиційних ефектів яскравості та поляризації планетних ґрунтів залежать від характеру та інтенсивності деяких реголітових процесів. Зокрема показано, що ударний вплив, змінюючи структуру ґрунтів, може приводити до посилення ефекту. Це підтверджується вимірваннями зразків деяких мінералів, що зазнали впливу ударно-хвильового навантаження, а також зразків ґрунту Місяця різного ступеня зрілості.

6. Стосовно до поверхонь небесних тіл, що вміщують дуглець, припускається, що можуть існувати реголітові процеси, які приводять до маскуванню оптичної неоднорідності поверхні і, як наслідок, до послаблення опозиційних ефектів яскравості та поляризації. Тут ми приймаємо до уваги процес відкладення продуктів піролізу органічної речовини у верхніх зонах реголітових часток при ударному випарванні матеріалу поверхні.

У третьому розділі розглядаються теоретичні моделі, що описують зворотне розсіювання випадково-неоднорідними поверхнями. Тут зроблено ось що:

1. Метод Сміта-Фукса для розрахунку тінювого ефекту стосовно

до випадково-шорсткої поверхні типу планетної узагальнено на випадок, що враховує зкорельованість входу та виходу світлових променів при довільній геометрії освітлення і спостереження поверхні. Отримана формула, яка описує залежність ймовірності того, що деяку точку поверхні одночасно і видно і освітлено незважаючи на висоту і нахил поверхні у цій точці, від кутів падіння і виходу променів (i, ε), а також від кута азимуту φ :

$$P \approx \frac{T(i, \varepsilon, \varphi)}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^{\infty} dz_0 \exp\left[-\frac{z_0^2}{2\sigma^2}\right] \exp\left\{-\sqrt{\frac{2}{\pi\sigma^2}} \left[\frac{\Lambda_1^{(a)} \cdot I_\varepsilon}{\operatorname{tg}\varepsilon} + \frac{\Lambda_1^{(a)} \cdot I_i}{\operatorname{tg}i} \right]\right\}. \quad (1)$$

де

$$I_\varepsilon = \int_0^{\infty} \frac{\exp\left[-\frac{\xi_\varepsilon^{(a)2}}{2\sigma^2}\right] \left[1 + \operatorname{erf}\left\{\frac{[z_0(1-R) + r(\operatorname{ctg}i - R \operatorname{ctg}\varepsilon)]}{\sigma \sqrt{2(1-R)^2}}\right\}\right]}{\left[1 + \operatorname{erf}\left\{\frac{\xi_1^{(a)}}{\sqrt{2}\sigma}\right\}\right] \left[1 + \operatorname{erf}\left\{\frac{\xi_\varepsilon^{(a)}}{\sqrt{2}\sigma}\right\}\right] + 4k(z_0, r)} dr,$$

$$I_i = \int_0^{\infty} \frac{\exp\left[-\frac{\xi_i^{(a)2}}{2\sigma^2}\right] \left[1 + \operatorname{erf}\left\{\frac{[z_0(1-R) + r(\operatorname{ctg}\varepsilon - R \operatorname{ctg}i)]}{\sigma \sqrt{2(1-R)^2}}\right\}\right]}{\left[1 + \operatorname{erf}\left\{\frac{\xi_1^{(a)}}{\sqrt{2}\sigma}\right\}\right] \left[1 + \operatorname{erf}\left\{\frac{\xi_i^{(a)}}{\sqrt{2}\sigma}\right\}\right] + 4k(z_0, r)} dr,$$

$$k(z_0, r) = \frac{R}{2\pi} \int_0^R \frac{dt}{\sqrt{1-t^2}} \exp\left[-\frac{\xi_1^{(a)2} + \xi_\varepsilon^{(a)2} - 2t\xi_1^{(a)}\xi_\varepsilon^{(a)}}{2\sigma^2(1-t^2)}\right],$$

$$\Lambda_1^{(a)} = \rho \operatorname{tg}i \frac{\exp\left[-\frac{\operatorname{ctg}^2 i}{2\rho^2}\right]}{\sqrt{2\pi}} - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{\operatorname{ctg}i}{\sqrt{2}\rho},$$

$$\Lambda_\varepsilon^{(a)} = \rho \operatorname{tg}\varepsilon \frac{\exp\left[-\frac{\operatorname{ctg}^2 \varepsilon}{2\rho^2}\right]}{\sqrt{2\pi}} - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{\operatorname{ctg}\varepsilon}{\sqrt{2}\rho},$$

$$R = \exp\left[-4(r/L)^2 \cdot \sin^2 \varphi / 2\right],$$

причому, $\rho = \sigma/L$ - дисперсія нахилів поверхні (L - розмір області кореляції висот, σ - дисперсія висот), $\xi_1^{(a)} = z_0 + r \cdot \operatorname{ctg}i$, $\xi_\varepsilon^{(a)} = z_0 + r \cdot \operatorname{ctg}\varepsilon$. Функція $T(i, \varepsilon, \varphi)$ описує самозатінення ділянок і має такий

ВИГЛЯД:

$$T(l, \varepsilon, \varphi) = 1 - \frac{\rho}{2\pi} \exp\left[\frac{-l_0^2}{2\rho^2}\right] - \frac{1}{2\pi\rho^2} \left[\int_{l_{\min}}^{\infty} dt \, t \exp\left[\frac{-t^2}{2\rho^2}\right] \arccos\frac{t_{\min}}{t} + \right. \\ \left. + \int_{l_{\min}}^{l_0} dt \, t \exp\left[\frac{-t^2}{2\rho^2}\right] \arccos\frac{t_{\min}}{t} + \int_{l_0}^{\infty} dt \, t \exp\left[\frac{-t^2}{2\rho^2}\right] \arccos\frac{t_{\max}}{t} + \delta \right],$$

де $l_{\min} = \min\{ctg l, ctg \varepsilon\}$, $l_{\max} = \max\{ctg l, ctg \varepsilon\}$,

$$l_0 = \frac{\sqrt{ctg^2 l + ctg^2 \varepsilon - 2ctg l \, ctg \varepsilon \cos \varphi}}{\sin \varphi}, \\ \delta = \begin{cases} 0, & \text{якщо } 0 \leq \varphi \leq \arccos\left[\frac{l_{\min}}{l_{\max}}\right], \\ 2 \int_{l_{\max}}^{l_0} dt \, t \exp\left[\frac{-t^2}{2\rho^2}\right] \arccos\frac{t_{\max}}{t}, & \text{якщо } \arccos\left[\frac{l_{\min}}{l_{\max}}\right] \leq \varphi \leq \pi \end{cases}$$

Розраховані дані непогано узгоджуються з висновками комп'ютерного моделювання у випадку поверхні з гаусовою статистикою висот. Це свідчить про те, що припущення (абсолютно немінучі в цьому випадку) зроблені при виведенні формул (наприклад, заміна нескінченномірної щільності ймовірності трьохточкової функціїв и т.п.) суттєво не впливають на результат і дійсно виправдані.

2. Урахування зкорельованості вхідних та вихідних траєкторій променів особливо важливо у випадку розрахування затінь для порошкоподібних поверхонь. Це урахування зроблено для однократного розсіяння декількома методами. При цьому результати розрахувань виявились близькими, що свідчить про "стійкість" задачі до різних припущень. Дуже перспективним шляхом розрахунку затінь для порошкоподібних поверхонь виявляється адаптація і використання результатів, отриманих у задачі з випадково-шорсткими поверхнями (див. формулу (1)). Дійсно, для променів, які розповсюджуються у ковзному режимі над шорсткуватою поверхнею, остання може розглядатися як двомірне порошкоподібне середовище. При такому підході вдається легко моделювати середовище з яким завгодно

пористість, у тому числі випадок, коли пористість є функція глибини. В цьому розумінні наш підхід виявляється більш сильним і загальним (при цьому й більш коректним), ніж існуючі моделі Халпе, Ірвіна і Льюе. Одним із головних розрахункових результатів цієї частини розділу є те, що при реалістичних значеннях пористості середовища тільки з допомогою тінювого ефекту не можна описувати позиційне зростання яскравості, що спостерігається у безатмосферних небесних тіл, а також у деяких лабораторних зразків із тонков структуров поверхні.

3. Як ще один механізм підсилення позиційного зростання яскравості, пропонується використати так зване когерентне посилення зворотного розсіювання, яке виникає за рахунок інтерференції променів, що взаємодіють з одними й тими ж розсіювачами, тобто, які розповсюджуються по прямих і зворотних в часі траєкторіях. При деяких припущеннях отримані формули, значно простіші, ніж аналогічні у інших авторів, що описують фазову залежність яскравості при малих кутах фази. Формули передбачають поширення позиційного піку при зменшенні розміру часток. Це дозволяє пояснити важливий експериментальний результат у розділі 2: збільшення нахилу фазової залежності яскравості порошоків оптичного скла при зростанні ступеня їх дисперсності. Показано значний вплив куткових розмірів світового джерела на амплітуду позиційного ефекту. Зокрема, виявляється, що значне позиційне зростання яскравості, що спостерігається у супутника Сатурна - Енцелада, супутників Урана і деяких світлих астероїдів, є не тільки наслідком структури та альbedo їх поверхонь, але і того, що ці тіла досить далекі від Сонця.

4. У рамках механізму когерентного посилення зворотного розсіювання стосовно до випадку одно- та двократного розсіювання вдалося пояснити існування від'ємної поляризації світла у поверхонь з складнов тонков структуров. Отримана формула для оцінки ступеня поляризації, яка добре узгоджується з даними лабораторних вимірювань.

$$P = \frac{\mu S_0 + (1 - \mu) S_T}{8A}, \quad (2)$$

де μ - кількість світлих часток, віднесена до загальної кількості часток, а S_0 та S_T - другі параметри Стокса для світлої і темної компонентів матеріалу поверхні, причому.

$$S_0 = G \omega_0 \left\{ \frac{\sin^2 \alpha}{1 + \cos^2 \alpha} + 2\omega_0 \frac{\xi \left[1 - \sqrt{1 + \left(\frac{g}{3} \rho \cdot \sin^2 \alpha \right)^2} \right]^2}{\left(\frac{g}{3} \rho \cdot \sin^2 \alpha \right)^2 \sqrt{1 + \left(\frac{g}{3} \rho \cdot \sin^2 \alpha \right)^2} \cdot \ln(1 - \xi)} \right\}$$

$$S_T = G \omega_T \left\{ \frac{\sin^2 \alpha}{1 + \cos^2 \alpha} + 2\omega_T \frac{\xi \left[1 - \sqrt{1 + \left(\frac{g}{3} \rho \cdot \sin^2 \alpha \right)^2} \right]^2}{\left(\frac{g}{3} \rho \cdot \sin^2 \alpha \right)^2 \sqrt{1 + \left(\frac{g}{3} \rho \cdot \sin^2 \alpha \right)^2} \cdot \ln(1 - \xi)} \right\}$$

$$A \approx \frac{g}{3} \frac{\omega_c [\mu + (1 - \mu)/K]}{(1 + 2\sqrt{1 - \omega_c [\mu + (1 - \mu)/K]})^2}$$

Тут ω_c , ω_T - альbedo однократного розсіювання часток світлого та темного матеріалу, G - параметр поляриметричної індикатрис, ξ - пористість, $K = \omega_c / \omega_T$, а $\rho = -\frac{3g}{\lambda} \frac{r}{\ln(1-\xi)}$, де r - радіус часток, λ - довжина хвилі світла. Зокрема, теоретична модель передбачає різке заглиблення від'ємної гілки поляризації при змішуванні тонкодисперсних порошоків з дуже різними альbedo, а також двогільність залежності $P_{\min}(A)$, що дійсно спостерігається у експерименті. Формула описує різні типи залежностей $P(\alpha)$, як близькі до парабол (що спостерігається у Місяця та інших небесних тіл), так і дуже несиметричні, які характерні для дуже пористих і світлих поверхонь (наприклад, поверхні оксиду магнію).

5. Фазові залежності потоку випромінювання, розсіяного поверхнями звичайно досліджуються (вимірюються або розраховуються) у відносних одиницях. Якщо необхідно оцінити коефіцієнт відбиття поверхні, доводиться вирішувати проблему множника унормування, тобто робити оцінку альbedo при нульовому фазовому куті. Задача такої оцінки приблизно вирішена у дисертації з допомогою геометрооптичної моделі блукання світлового променя у порошокподібному (зернистому) середовищі. Формально модель одномірна, але вона враховує найбільш значну специфіку тримірного випадку. Так, для розрахунку багаторазового розсіювання у межах однієї частки і між частками, використовуються коефіцієнти Френеля R_0, R_1 , усереднені по куту падіння. Формули моделі мають такий

Вигляд:

$$A = z - \sqrt{z^2 - 1},$$

де

$$z = \frac{2 - r - T - \mu(1 - T)(1 - r)}{r - T},$$

$$r = \frac{R_0 + (1 - R_0 - R_1)\exp(-\tau)}{1 - R_1 \exp(-\tau)},$$

$$T \approx (1 - R_0)(1 - R_1)\exp(-\tau),$$

$$R_0 \approx (n - 1)^2 / (n + 1)^2 + 0,05,$$

$$R_1 \approx (n^2 - 1) / n^2 + 0,04.$$

при цьому, $\tau = 4\pi k l / \lambda$, n и k - дійсна та уявна частини коефіцієнту заломлення, l - характерна довжина шляху світла у частці.

Модель описує спектрофотометричні вимірювання поверхонь, що мають альbedo менш 10%, більш коректно ніж відома модель стопи Стокса-Бодо, яка використовується до теперішнього часу у практиці лабораторної спектрофотометрії порошкоподібних середовищ. Побудована модель використовується для: 1) оцінки спектрального ходу оптичних констант поверхні Місяця в цілому; 2) інтерпретації діаграми альbedo-показник кольору диску Місяця; 3) інтерпретації "титанової" залежності Маккорда-Дольфуса. Зокрема, показано, що дисперсія значень на діаграмі альbedo-колір в цілому залежить від варіацій показника кольору, вираженого через дійсне поглинання, а двозначність "титанової" залежності - зменшенням концентрації поглиначників у частках поверхні при переході від морської речовини до материкової.

6. Умова інваріантності світлового потоку, розсіяного поверхнею зі складною структурою, до ізотропної інфінітезимальної ондуляції одночасно і параметра структури цієї поверхні σ_0 , і її середнього рівня приводить до класичної проблеми Штурма-Ліувіля на сферичному секторі: $\alpha - \frac{\pi}{2} \leq \lambda \leq \frac{\pi}{2}$, $-\frac{\pi}{2} \leq \beta \leq \frac{\pi}{2}$, где λ и β - фотометрична довгота та широта, а $\sigma_0 = \iint \frac{|h(r - l) - h(r)|}{|l|} dr$.

причому тут h - висота поверхні, \vec{l} - базис згладжування, вектори \vec{l} та \vec{g} лежать у площині, від якої відраховуються висоти.

Загальне рішення проблеми дає можливість отримати таку фотометричну функцію:

$$f(\delta_0, \lambda, \beta, \alpha) = (1 - g) \cos \beta \cdot \cos(\lambda - \alpha) + \quad (3)$$

$$+ g \cdot E_{00}^{(\alpha)}(\alpha) \exp \left[- \frac{\sqrt{\alpha(3\pi - 2\alpha)}}{\pi - \alpha} \delta_0 \right] \cos^{\frac{\alpha}{\pi - \alpha}} \beta \cdot \frac{\cos \left[\frac{\pi}{\pi - \alpha} (\lambda - \frac{\alpha}{2}) \right]}{\cos \lambda}$$

де:

$$E_{00}^{(\alpha)}(\alpha) = \frac{16}{3} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} \right) \frac{(3\pi - \alpha) \cdot \cos \alpha \cdot \Gamma \left[\frac{3\pi - \alpha}{2(\pi - \alpha)} \right] \Gamma \left[\frac{5\pi - 4\alpha}{2(\pi - \alpha)} \right]}{4(\pi - \alpha)^2 - \pi^2 \Gamma \left[\frac{2\pi - \alpha}{\pi - \alpha} \right] \Gamma \left[\frac{6\pi - 5\alpha}{2(\pi - \alpha)} \right]}$$

причому, $\Gamma(\dots)$ - гамма-функція, g - балансний множник, що характеризує плямистість (оптичну та структурну неоднорідність) поверхні у масштабах більших ніж база характеристичного нахилу. Розрахунки згідно з формулою (3) дали дуже гарне узгодження з даними телескопічних спостережень Місяця, Меркурія, астероїдів та деяких інших тіл. Показано, що вимірювання фазових залежностей яскравості поверхонь, виконані у рамках спектральних інтервалів, дають можливість визначити показник Хаусдорфа-Безиковича, якщо поверхню можливо приблизно розглядати як фрактальну. Для Місяця цього показника було знайдено: він дорівнює 2,4, що є близько до класичного Броунівського процесу.

7. Коротко приведено досвід побудови зображень та карт параметрів зворотного розсіювання стосовно до поверхні Місяця. Перша наша спроба побудувати зображення фазового коефіцієнта $I(3,5^\circ)/I(14,5^\circ)$ була виконана з допомогою аналогового фотографічного методу. Однак, з допомогою методів цифрової обробки зображень та використання ондуляційно-інваріантної фотометричної функції задачу вдалося вирішити значно повніше. З використанням зображень Місяця при кутах фази $1^\circ, 6^\circ, 12^\circ$ та 96° , методом найменших квадратів, були розраховані параметри g і δ_0 , які відповідають кожній точці зображення (приблизно 300×600 елементів). Виявилось, що параметр δ_0 виявляється характеристикой опозиційного ефекту. Аномалії у регіональному розподілі параметрів δ_0, g часто збігаються з такими неувічайними утвореннями на

Місяці, як пляма Вуда, область Рейнер γ та інші, котрі добре виділяються також на кольороділильних зображеннях. Це свідчить про те, що варіації складу та структурних властивостей поверхні Місяця супроводжують один одного.

ВИСНОВКИ

Головні результати даної роботи є такі:

1. Виявлена чітка різниця в характері опозиційного ефекту яскравості, кольору та поляризації діелектричних та металевих випадково-неоднорідних поверхонь.

2. Для дуже різних з природи поверхонь виявлено, що існує кореляція між параметрами від'ємної поляризації та опозиційного ефекту яскравості. Це свідчить про спільність походження обох ефектів.

3. Показано, що діелектричні матеріали мають виражений опозиційний ефект яскравості та досить глибоку гілку від'ємної поляризації лише тоді, коли поверхні мають неоднорідності, порівняльні з довжиною світлової хвилі.

4. Показано, що залежність фазової функції яскравості, а також параметра P_{\min} від'ємної поляризації від альbedo поверхні мають двозначний характер.

5. Виявлено, що параметри від'ємної поляризації та опозиційного ефекту яскравості залежать від характеру та інтенсивності деяких реголітових процесів. Зокрема, ударні навантаження прозводять до підсилення обох ефектів.

6. Виявлено, що опозиційний ефект яскравості і, особливо, від'ємна гілка поляризації підсилюються при зростанні оптичної гетерогенності тонкодисперсних діелектричних поверхонь.

7. Отримано формулу, яка описує ймовірність того, що дана точка однозначної випадково-шорсткої поверхні одночасно є видима і освітлена в залежності від кутів входу та виходу променів, а також від кута азимута, тобто приймає до уваги зкорельованість їх розповсюдження.

8. Ця зкорельованість також прийнято до уваги при розрахунку затінення в порошокподібних середовищах шляхом адаптації формул, що отримані для однозначної випадково-шорсткої поверхні.

9. Як допоміжний механізм підсилення опозиційного зростання яскравості та від'ємної поляризації планетних реголітів запропоновано інтерференційне посилення променів, які взаємодіють

з одними й тими ж розсіювачами.

10. Зроблено оцінку альbedo поверхні в межах геометрооптичної моделі блукання променя світла в порошкоподібному середовищі.

11. Сформульовано і вирішено задачу Штурма-Ліувіля на сферичному секторі, яка витикає з умови інваріантності функції розсіювання поверхні зі складнов структуров, відносно до ізотропної інфiнітозімальної ондуляції одночасно як параметра структури поверхні, так і її середнього рівня.

12. За допомогою методів цифрової обробки зображень та використання ондуляційно-інваріантної фотометричної функції виконано картографування характеристик зворотного розсіювання для вибраних ділянок поверхні Місяця.

Основні результати дисертації надруковані в таких роботах:

1. Акимов Л. А., Шкуратов Ю. Г. Распределение фазового градиента яркости по лунной поверхности в двух участках спектра Предварительные исследования // Астрон. циркуляр. - 1981. - N1167. - С. 3-6.

2. Шкуратов Ю. Г. Модель оппозиционного эффекта яркости безатмосферных космических тел // Астрон. журнал. - 1983. - Т. 60, вып. 5. - С. 105-108.

3. Акимов Л. А., Шкуратов Ю. Г. Оптические исследования образцов лунного грунта различной степени зрелости // Астрон. вестн. - 1983. - Т. 17, N 4. - С. 202-209.

4. Шкуратов Ю. Г., Акимов Л. А., Тишковец В. П. Отрицательная поляризация не доказывает существование пыли на поверхности безатмосферных космических тел // Письма в Астрон. Ж. - 1984. - Т. 10, N 10. - С. 797-799.

5. Шкуратов Ю. Г., Акимов Л. А., Тишковец В. П. Современные проблемы поляриметрии твердых поверхностей космических тел // Астрон. вестн. - 1984. - Т. 18, N 3. - С. 163-178.

6. Шкуратов Ю. Г. О природе оппозиционного эффекта яркости иотрицательной поляризации света твердых космических поверхностей // Астрон. циркуляр. - 1985, N 1400. - С. 3-6.

7. Акимов Л. А., Тишковец В. П., Шкуратов Ю. Г. Экспериментальное моделирование поляризующих свойств поверхности безатмосферных космических тел при малых углах фазы // Фотометрические и поляриметрические исслед. небесных тел / Под ред. А. В. Морозенко. - Киев: Наукова Думка. - 1985. - С. 42-46.

8. Бондаренко Н. В., Шкуратов Ю. Г., Акимов Л. А., Корниенко

В. В. Диаграмма альbedo-цвет лунной поверхности // Кинематика и физика небес. тел. - 1985. - Т. 1, N 6. - С. 3-11.

9. Шкуратов Ю. Г. Модель спектрального хода альbedo твердых поверхностей космических тел // Кинематика и физика небес. тел. - 1987. - Т. 3, N 5. - С. 39-46.

10. Шкуратов Ю. Г. Интерпретация спектральной зависимости параметров отрицательной поляризации света, рассеянного твердыми поверхностями космических тел // Письма в Астрон. Ж. - 1987. - Т. 13, N 5. - С. 444-448.

11. Шкуратов Ю. Г., Акимов Л. А. Лабораторные исследования отрицательной поляризации света, рассеянного поверхностями со сложной структурой. Некоторые следствия для безатмосферных космических тел. 1 // Кинематика и физика небес. тел. - 1987. - Т. 3, N 2. - С. 22-27.

12. Шкуратов Ю. Г., Акимов Л. А., Станкевич Н. П., Мелкумова Л. Я., Латынина И. И., Богданова Т. Б. Лабораторные исследования отрицательной поляризации света, рассеянного поверхностями со сложной структурой. Некоторые следствия для безатмосферных космических тел. 2 // Кинематика и физика небес. тел. - 1987. - Т. 3, N 3. - С. 32-37.

13. Шкуратов Ю. Г., Акимов Л. А., Мелкумова Л. Я. фотополяриметрия астероидов и метеоритов как метод исследования микроструктуры их поверхностей // Тезисы докл. XX Всесовзн. метеоритной конф., 10-12 февраля 1987, Таллин. - Москва. - 1987. - С. 179-180.

14. Шкуратов Ю. Г. О природе поляриметрической неоднородности астероида 4 Веста // Астрон. вестник. - 1988. - Т. 22, N 2. - С. 152-158.

15. Шкуратов Ю. Г. Теневая составляющая фазовой зависимости яркости безатмосферных небесных тел // Кинематика и физика небес. тел. - 1988. - Т. 4, N 5. - С. 60-66.

16. Шкуратов Ю. Г. Дифракционный механизм формирования оппозиционного эффекта яркости поверхностей со сложной структурой // Кинематика и физика небес. тел. - 1988. - Т. 4, N 4. - С. 33-39.

17. Шкуратов Ю. Г., Мелкумова Л. Я., Бадюков Д. Д. Лабораторные исследования отрицательной поляризации света, рассеянного поверхностями со сложной структурой. Некоторые следствия для безатмосферных космических тел. 3 // Кинематика и физика небес. тел. - 1988. - Т. 4, N 1. - С. 11-18.

18. Шкуратов Ю. Г. Новый механизм формирования отрицательной поляризации света, рассеянного твердыми поверхностями космических тел // Астрон. вестник. - 1989. - Т. 23, N 2. - С. 176-180.

19. Шкуратов Ю. Г., Качанов А. С., Карпов В. С. Фотометрия и поляриметрия в области малых фазовых углов лабораторного фотометрического стандарта PTFE (halon) // Астрон. циркуляр. - 1989. - N 1538. - С. 47-48.

20. Шевченко В. Г., Шкуратов Ю. Г., Опанасенко Н. В. Поверхность Луны по данным дистанционных исследований // Астрон. вестн. - 1991. - Т. 25, N 5. - С. 569-577.

21. Шкуратов Ю. Г. Интерференционная модель отрицательной поляризации света, рассеянного твердыми поверхностями небесных тел // Астрон. вестник. - 1991. - Т. 25, N 2. - С. 152-161.

22. Шкуратов Ю. Г. Оценка влияния конечности угловых размеров источника света на величину оппозиционного эффекта яркости безатмосферных тел // Астрон. вестн. - 1991. - Т. 25, N 1. - С. 71-75.

23. Шкуратов Ю. Г., Станкевич Д. Г. Теневой эффект для поверхности планеты с гауссовым мезорельефом // Астрон. вестн. - 1992. - Т. 26, N 2. - С. 89-101.

24. Shkuratov Yu. G., Akimov L. A., Vokhmentzev A. Ya., Antipova-Karatayeva I. I. An optical study of carbonaceous chondrites and basalt achondrites // Lunar Planet. Sci. Conf. 16-th. - 1985. - P. 777-78.

25. Shkuratov Yu. G., Pieters C. M., Stankevich N. P., Pavlov G. N., Ovcharenko A. P., Starukhina L. V., Goncharov A. I., Skorik S. K. Estimation of the thickness of possible carbonaceous deposits in the superficial zones of Phobos and Deimos regolith particles on the basis of laboratory simulation data // Abstr. of papers subm. to the 8 Sov.-Amer. microsposium. Aug. 22-26, 1988. - Moscow. - 1988. - P. 92-93.

26. Shkuratov Yu. G., Opanasenko N. V., Basilevsky A. T., Zhukov B. S., Krešlavsky M. A., Murchie S. A possible interpretation of bright features on the surface of Phobos // Planet. Space Sci. - 1991. - V. 39, N 1/2. - P. 341-347.

27. Shkuratov Yu. G., Opanasenko N. V., Akimov L. A. Connection between the slope of brightness-phase curve and lunar albedo // Lunar and Planet. Sci. Conf. XXII, 1991, Lunar and Planet. Inst. - Houston Tex. - 1991. - P. 1247-1248.

28. Avanesov G., Zhukov B., Ziman Ya., Kostenko V., Kuzmin A., Murav'ev V., Fedotov V., Bonev B., Mishev D., Petkov D., Krumov A., Simeonov S., Boycheva V., Usunov Yu., Weide G.-G., Halmann D., Possel W., Head J., Murchie S., Shkuratov Yu. G., Berghanel R., Danz M., Mangoldt T., Pihan U., Weidlich U., Lumme K., Muinonen K., Peltoniemi J., Duxbury T., Murray B., Herkenhoff K., Fanale F., Irvine W., Smith B. Results of TV imaging of Phobos (experiment VSK-Fregat) // Planet. Space Sci. - 1991. - V. 39, No 1/2. - P. 281-295.

29. Avanesov G. A., Bonev B. I., Kempe F., Basilevsky A. T., Boycheva V., Chikov K. N., Danz M., Dimitrov D., Duxbury T., Gromatkov P., Halmann D., Head J., Krasavtsev V. M., Krasikov V. A., Krumov A., Kuzmin A. A., Losev K. D., Lumme K., Mishev D. N., Mohlmann D., Muinonen K., Murav'ev V. M., Murchie S., Murray B., Neumann W., Paul L., Petkov D., Petuchova I., Possel W., Rebel B., Shkuratov Yu. G., Simeonov S., Smoth B., Totev A., Usunov Yu., Fedotov V. P., Weide G.-G., Zapfe H., Zhukov B. S., and Ziman Ya. L. Television observation of Phobos // Nature. - 1989. - V. 341. - P. 585-587.

30. Shkuratov Yu. G. New photometric function of lunar-like surfaces: Fractal approach // Bull. Amer. Astron. Soc. - 1992. - P. 1021.

31. Shkuratov Yu. G., Opanasenko N. V. and Kreslavsky M. A. Polarimetric and laboratory simulation. 1. The negative polarization // Icarus. - 1992. - V. 95. - P. 283-299.

32. Shkuratov Yu. G., Opanasenko N. V. Polarimetric and photometric properties of the Moon. Telescope observation and laboratory simulation. 2. The positive polarization // Icarus. - 1992. - V. 99. - P. 468-484.

33. Shkuratov Yu. G., Muinonen K. Interpreting asteroid photometry and polarimetry using a model of shadowing and coherent backscattering // Asteroids, Comets, Meteors / Eds. A. W. Harris and E. Bowell. - Houston: LPI. - 1992. - P. 549-552.

АВ 28.035

Підп. до друку 15.08.93 Формат 60×84¹/₁₆. Папір. друк. Друк офсетний.
Умовн. друк. арк. 2,0 Умовн. фарбо-відб. 4,16 Облік-вид. арк. а; в
Тираж 100 прим. Зам. № 1940. Безплатно.

Харківське орендне поліграфічне підприємство.
310093, Харків, вул. Свердлова, 115.