

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Мозгова Альона Михайлівна

УДК 523.68:520.35:520.8

**РЕЧОВИННИЙ СКЛАД ВИБРАНИХ МЕТЕОРІВ
ЗА ДИСТАНЦІЙНИМИ СПЕКТРАЛЬНИМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ**

05.07.12 – Дистанційні аерокосмічні дослідження

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата фізико-математичних наук

Київ - 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
член-кореспондент НАН України
Чурюмов Клим Іванович,
Астрономічна обсерваторія
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка,
головний науковий співробітник.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
професор
Відьмаченко Анатолій Петрович
Головна астрономічна обсерваторія
Національної академії наук України,
головний науковий співробітник


кандидат фізико-математичних наук,
Коломієць Світлана Володимирівна
Харківський національний університет
радіоелектроніки
завідувач науково-дослідної лабораторії
радіоастрономії імені Б.Л. Кащеєва

Захист відбудеться « 7 » грудня 2018 року о 13:00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради - **К 26.062.13** при Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, проспект Комарова, 1, корпус № 3, ауд. 3.506, кафедра аерокосмічної геодезії.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, проспект Комарова, 1, корпус № 8.

Автореферат розісланий « 6 » листопада 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої Вченої ради К 26.062.13
доцент, кандидат фізико-математичних наук

 Л.С. Чубко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Кожен метеорний спектр являє собою велику наукову цінність. Оскільки метеор – непередбачуване і короткотривале явище, зафіксувати його не просто, а отримати хороший метеорний спектр ще складніше. Потрібні високочутливі камери, якісні дисперсійні елементи та тривалий час спостережень за якомога більшими ділянками неба.

Метеорні тіла є продуктами розпаду комет і частинками астероїдів, таким чином науковий інтерес і цінність вивчення цієї речовини зумовлені ще й через одну з небагатьох можливостей доступу до неї – метеорні явища. Згідно сучасних уявлень малі тіла Сонячної системи є залишками речовини, з якої утворилися планети Сонячної системи, і завдяки малим масам склад і фізико-хімічні властивості малих тіл залишилися майже такими, як і під час формування планетної системи. Тому малі тіла містять важливу інформацію про умови, що мали місце на початковому етапі формування Сонячної системи. З огляду на те, що на сьогодні отримано багато наукових результатів про будову і еволюцію Сонячної системи, а достовірні відомості про її початковий стан практично відсутні, величезне значення набуває створення добре оснащених всебічних спостережних баз для збору достовірних спостережних даних про малі тіла, обробка та інтерпретація цього матеріалу.

Одним з напрямків цієї великої і складної задачі є визначення вмісту різних хімічних елементів в сучасній Сонячній системі і далі, користуючись отриманими результатами, дослідження складу первинної речовини в протосонячній туманності. Як відомо, такого роду результати можуть бути отримані тільки зі спектрального аналізу, зокрема (в нашому випадку), випромінення метеорної речовини, за допомогою якого визначається хімічний склад метеороїдів.

Спектри метеорів дають нам інформацію про умови збудження, світіння та іонізацію метеорної плазми, температуру, процеси абляції (тобто руйнування метеорного тіла), фізико-хімічні процеси, що відбуваються під час метеорних явищ в атмосфері Землі, маси метеороїдів, причини і характер протікання спалахів, якісний та кількісний хімічний склад метеорного тіла і концентрації елементів в метеороїдах, а, отже, і про тугоплавку складову ядер комет і астероїдів.

Досліджуючи метеорні спектри, ми вивчаємо фізичне явище, яке в фізичних експериментальних лабораторіях відтворити повністю поки неможливо. Подібний дослід провести дуже складно. Відомі спроби проведення експериментів по відтворенню метеорних явищ, однак результатів таких експериментів не вистачає для побудови теорії випромінювання метеора, яка цілком не завершена.

Спектроскопія метеорів – традиційний, але все ще перспективний метод вивчення хімічного складу та інших властивостей метеороїдів і їхніх батьківських тіл (астероїдів, комет). Багато теоретичних робіт і результатів спостережень потребують використання всіх переваг цього методу досліджень. Тому дослідження метеорних спектрів є актуальною науковою задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася в Астрономічній обсерваторії Київського національного

університету імені Тараса Шевченка (в межах комплексної наукової програми “Астрономія та фізика космосу”) за темами: № 11БФ023–03 “Фізичні та кінематичні характеристики малих тіл Сонячної системи” (01.2011 – 12.2015 рр., номер держреєстрації 0111U006168); № 16БФ023–02 “Космічні чинники земних катаклізмів. Спостереження, аналіз, інформатизація” (01.2016 – 12.2018 рр., номер держреєстрації 0116U002526).

В перерахованих наукових темах здобувач приймав участь як виконавець.

Мета і завдання дослідження.

Мета роботи: визначити речовинний склад вибраних метеорів за спектральними спостереженнями. Для цього були поставлені такі *завдання:*

1. Визначити речовинний склад метеорних тіл шляхом ідентифікації спектральних ліній у фотографічних спектрах метеорів;
2. Оцінити ефективну температуру збудження атомів заліза FeI в метеорній комі та її зміну з висотою за даними спостережень;
3. Створити каталог ліній спектральних мультиплетів FeI і FeII та MgI і MgII, що спостерігались в метеорних спектрах, і побудувати на його основі діаграми Гротріана.

Об’єкт дослідження – метеорні явища.

Предмет дослідження – речовинний склад вибраних метеорних тіл.

Методи дослідження – спектральний аналіз дистанційних спостережень метеорів.

Наукова новизна одержаних результатів:

Вперше:

1. Досліджено фізичні характеристики трьох спорадичних метеорів (2 і 27 серпня 2011 року та 20 лютого 2012 року) і одного метеора потоку Персеїди (11 серпня 2012 року) на основі аналізу фотографічних спектрів.
2. Визначено речовинний склад досліджуваних метеорних тіл за їхніми спектрами. Найбільш інтенсивні лінії в спектрах метеорів належать атомам CrI, FeI, MgI, SiI, AlI, MnI, CaI, TiI, NaI, іонам FeII, CaII, MgII, TiII, SiII, які характерні для залізних та залізо-силікатних метеороїдів.
3. Створено каталог спостережених емісійних ліній в спектрі кожного метеора, який містить спостережену і теоретичну довжини хвиль емісійних ліній, назву атома і номер мультиплету, інтенсивність ліній у відносних та абсолютних одиницях.
4. В наближенні стану термодинамічної рівноваги та больцманівського розподілу населеності рівнів, визначено ефективну температуру збудження атомів FeI та кількість випромінюючих атомів FeI в метеорній комі за дослідженнями спектра метеора, спостереженого 2 серпня 2011 року. Отримано криву блиску спектральної лінії заліза FeI (2) ($\lambda 4427 \text{ \AA}$).
5. Виявлено нелінійну зміну температури метеорного тіла, спостереженого 2 серпня 2011 року, з висотою та з часом. Спостерігається підвищення температури збудження атомів FeI перед і одразу після спалахів та її зниження безпосередньо під час спалахів, що є ознакою руйнування метеороїда з подальшим викидом речовини.

Удосконалено:

6. Каталог для 329 ліній спектральних мультиплетів атомів заліза FeI, 23 ліній іонів заліза FeII, 12 ліній атомів магнія MgI і 4 ліній іонів магнія MgII, що містить всі необхідні дані для ідентифікації спектральних ліній і кількісного аналізу метеорних спектрів, на основі зведення даних існуючих каталогів спектральних ліній хімічних елементів. Каталог доповнено діаграмами Гротріана для ліній мультиплетів заліза FeI і магнія MgI, які відображають переходи між електронними станами цих хімічних елементів.

Отримали подальший розвиток:

Дослідження спектрів двох метеорів потоку Оріоніди (21 і 22 жовтня 1958 року) і одного метеора потоку Персеїди (10 серпня 1965 року) на основі сучасних методів обробки спектрів метеорних явищ.

Практичне значення одержаних результатів. Дані, отримані в результаті обробки представлених в роботі метеорних спектрів є цінними для фундаментальних наукових досліджень фізико-хімічних властивостей речовини метеорів. Представлений в роботі каталог ліній спектральних мультиплетів хімічних елементів та діаграми Гротріана можуть бути використані дослідниками для вивчення метеорних явищ. Дані про хімічний склад метеорів є важливими для розв'язання питань космогонії і хімічної еволюції Сонячної системи.

Достовірність і обґрунтованість результатів досліджень. Результати досліджень метеорних спектрів, представлені в роботі, детально проаналізовані та порівняні з даними в працях провідних спеціалістів в галузі метеорної спектроскопії за попередні роки, зокрема використовувалися роботи І. Боровічки, З. Цеплехи, Г.І. Кохірової і каталоги спектральних ліній. Ідентифікація спектральних ліній здійснювалася згідно загальновідомих каталогів Ш. Мур, А.Н. Зайделя і NIST ASD. Створення каталогу ліній спектральних мультиплетів хімічних елементів, що спостерігаються в метеорних спектрах, здійснено на основі робіт Ш. Мур і NIST ASD. Результати досліджень були апробовані на міжнародних конференціях та семінарах в Україні, опубліковані у фахових рецензованих виданнях, в тому числі з бази SCOPUS [1–8].

Особистий внесок здобувача: здобувач виконала обробку спостережуваного матеріалу, представленого в роботі, здійснила інтерпретацію отриманих результатів, представляла результати досліджень на міжнародних конференціях та семінарах в Україні, а саме:

– в роботах [1–4, 7–8] дисертант приймала участь у постановці задачі, обробці спектрального матеріалу, аналізі отриманих результатів, написанні тексту публікацій;

– в роботах [5–6] здобувач приймала участь у постановці задачі і написанні тексту публікацій.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідались на наукових конференціях та семінарах: 20th Young Scientists' Conference of Astronomy and Space Physics, April 22–27, 2013, Kyiv; XV Міжнародна наукова конференція "Астрономічна школа молодих вчених", 15–17 травня 2013 р., Біла Церква; 21th Young Scientists' Conference of Astronomy and Space Physics, April 28–May 3, 2014, Kyiv; 14-th Odessa International

Astronomical Gamow Conference-School, August 17–24, 2014, Odessa; International Conference “Astronomy and Space Physics”, May 27–30, 2014, Kyiv; VI Міжнародна конференція "САММАС–2014", Жовтень 29 – Листопад 2 2014 р., Вінниця; International Conference “Astronomy and Space Physics”, May 25–29, 2015, Kyiv; IV Міжрегіональна науково-практична конференція “Астрономія і сьогодні”, 9 квітня 2015 р., Вінниця; 5-th Gamow Memorial International Conference dedicated to 111-th anniversary of George Gamow and 15-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School, August 16–23, 2015, Odessa; V Міжрегіональна науково-практична конференція “Астрономія і сьогодні”, 12 квітня 2016 р., Вінниця; Міжнародний науковий семінар “Радіометеори, метеори й міжпланетна складова: поблизу та на відстані” пам'яті Б.Л. Кащеєва, 15 березня 2016 р., Харків; International Conference “Astronomy and Space Physics”, May 24–27, 2016, Kyiv; XVIII Міжнародна наукова конференція "Астрономічна школа молодих вчених", 26–27 травня 2016 р., Київ; VI Міжрегіональна науково-практична конференція “Астрономія і сьогодні”, 12 квітня 2017 р., Вінниця; VII Міжнародна конференція "САММАС–2017", 26 – 28 вересня 2017 р., Вінниця; 17-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School, August 13–20, 2017, Odessa. Крім того, результати досліджень представлялися у вигляді доповідей на наукових семінарах сектору астрометрії та малих тіл Сонячної системи Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка та на розширеному науковому семінарі дистанційних аерокосмічних досліджень у Національному авіаційному університеті.

Публікації. За матеріалами дослідження опубліковано 29 наукових праць, де повністю показані основні результати дисертації, з них 6 статей [1, 2, 4, 6–8] у наукових фахових виданнях України, 1 стаття [3] у закордонному науковому виданні, яке включене до міжнародних наукометричних баз, 1 стаття [5] в інших виданнях України, 21 тези доповідей в матеріалах наукових конференцій [9–29].

Структура роботи. Дисертаційна робота складається з переліку умовних позначень та скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 163 сторінки, з них 127 сторінок основного тексту, 37 рисунків, із яких 8 рисунків на окремих сторінках та 7 таблиць, список літературних джерел обсягом 138 найменувань, викладений на 16 сторінках, додатки викладені на 20 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. Обґрунтовано актуальність досліджень спектрів метеорних явищ, що відбуваються в атмосфері Землі. Сформульовано мету, основні задачі та методи їх вирішення. Відображено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів. Описано особистий внесок автора, вказано відомості про апробацію та публікації результатів роботи за темою дисертації.

Розділ 1. Спектри метеорів. Містить огляд публікацій за тематикою досліджень. В розділі розглянуто основні хімічні елементи, ототоженні в спектрах метеорів. Описано особливості спектрів метеорів потоку Персеїди. Представлено

класифікації метеорних спектрів. Здійснено порівняння спектрів метеорів зі спектрами комет.

Визначити хімічний склад метеорних тіл і фізико-хімічні параметри метеорного явища та пов'язаних з ним явищ в атмосфері Землі можна лише із спектрального аналізу випромінювання метеорної речовини. В результаті досліджень декількох тисяч метеорних спектрів виявлено лінії емісії наступних хімічних елементів: нейтральні атоми: FeI, CrI, NiI, CoI, TiI, OI, CaI, NI, MnI, MgI, NaI, CI, SiI, BaI, HI, AlI, LiI, KI, SrI, MoI; іони: FeII, OII, NII, AlII, CrII, SiII, CaII, MgII, TiII, SrII, BaII; молекули: N₂, CN, FeO, C₂, CH, MgO, CaO, AlO; молекулярний іон: N₂⁺.

Спектри метеорів класифікують у залежності від потоку, структури спектра, за характером світіння ліній. Персеїди – найбільший метеорний потік в північній півкулі небесної сфери. Завдяки своїм характеристикам Персеїди є одним з найбільш придатних об'єктів для метеорних спостережень, включаючи спектроскопію. Всі фотографічні спостереження метеорів потоку Персеїди дають схожі спектри. Найяскравішими емісіями є лінії H і K іонізованого кальцію з довжинами хвиль $\lambda 3934 \text{ \AA}$ і $\lambda 3968 \text{ \AA}$, відповідно. Яскравими є також лінії іонізованого магнію на $\lambda 4481 \text{ \AA}$, триплету нейтрального магнію в діапазоні $\lambda 5167\text{--}5184 \text{ \AA}$, дублету нейтрального натрію $\lambda 5890\text{--}5896 \text{ \AA}$ і триплету нейтрального кисню $\lambda 7772\text{--}7775 \text{ \AA}$. У спектрах присутня велика кількість ліній нейтрального заліза.

В результаті порівняння спектрів метеорів зі спектрами комет встановлено, що вони мають певну схожість. В спектрах комет, близьких до Сонця, зареєстровано емісії деяких металів із тих, які реєструються в спектрах метеорів.

Розділ 2. Методи спостережень метеорів та їх обробки. У розділі наведено характеристики астрономічних інструментів та фотоматеріалів, що використовуються для отримання спектрів метеорів. Розглянуто особливості застосування оптичних призм і дифракційних ґраток. Описано фотографічні методи отримання і дослідження метеорних спектрів, ідентифікації спектральних ліній, метод кривих росту, що застосовується для визначення температури збудження атомів та концентрації атомів і іонів хімічних елементів в метеорній плазмі.

Основним завданням кількісного аналізу метеорних спектрів є визначення концентрації атомів і іонів хімічних елементів. Головною проблемою цього завдання є те, що метеорна плазма не перебуває в стані термодинамічної рівноваги. Більше того, випромінювання в кожній лінії певного елемента має різну оптичну товщину. У кількісному дослідженні цих ліній необхідно враховувати ефект самопоглинання в емісійних лініях. Дослідники розвивали і застосовували різні методи кількісного аналізу. Найбільш відомим і розвиненим є метод кривих росту, який ґрунтується на припущенні стану локальної термодинамічної рівноваги в об'ємі випромінювання і враховує ефект самопоглинання в спектральних лініях [30, 31].

Метод кривих росту полягає в наступному. Нехай для деякого об'єму випромінювання справедливе припущення про стан локальної термодинамічної

рівноваги. Тоді інтенсивність випромінювання i_ν на частоті ν в межах профілю спектральної лінії, в розрахунку на 1 см^2 випромінюючої поверхні, на одиницю тілесного кута і одиничний інтервал частот, буде дорівнювати:

$$i_\nu = B_\nu (1 - e^{-\tau_\nu}), \quad (1)$$

де B_ν – функція Планка, τ_ν – оптична товщина, яка в разі однорідного шару дорівнює:

$$\tau_\nu = k_\nu l n_i, \quad (2)$$

де k_ν – коефіцієнт поглинання на 1 атом, l – довжина випромінюючого стовпа поперечним перерізом 1 см^2 , n_i – число атомів в нижньому збудженому стані. Інтенсивність випромінювання в лінії в усіх напрямках з урахуванням її профілю виражається наступним чином:

$$I = 4\pi \int_0^\infty i_\nu d\nu, \quad (3)$$

Припустимо, що в об'ємі випромінювання реалізується больцманівський розподіл населеності рівнів:

$$n_i = \frac{n}{U} g_i e^{-\chi_i / kT}, \quad (4)$$

де g_i – статична вага рівня i , χ_i – його потенціал збудження, U – сума за станами, n – загальне число атомів даного елемента в 1 см^3 , k – стала Больцмана, T – температура.

За відсутності самопоглинання інтенсивність спектральної лінії можна представити у вигляді:

$$I_{ki}^0 = N_k A_{ki} h \nu_{ki}, \quad (5)$$

де N_k – загальне число атомів в випромінюючому об'ємі в стані з верхнім рівнем k , індекс "0" означає відсутність самопоглинання, A_{ki} – коефіцієнт Ейнштейна, рівний:

$$A_{ki} = \frac{g_i}{g_k} \frac{8\pi^2 e^2 \nu_{ik}^2}{mc^2} f_{ik}, \quad (6)$$

де f_{ik} – сила осцилятора, m і e – маса і заряд електрона, c – швидкість світла. Якщо N загальне число атомів даного елемента в випромінюючому об'ємі, то з формул (4)–(6) отримаємо:

$$\frac{I_{ki}^0 \lambda^3}{g_i f_{ik}} = \frac{8\pi^2 e^2 h}{mg_k} N_k = \frac{8\pi^2 e^2 h}{mU} N e^{-\chi_k / kT}, \quad (7)$$

$$\frac{I_{ki}^0}{\lambda B_\lambda} = \frac{4\pi^2 e^2}{mc^2 U} N_k = g_i f_{ik} \lambda_{ik} N e^{-\chi_i / kT}, \quad (8)$$

де $B_\lambda = B_\nu c / \lambda^2$ – функція Планка. Логарифмуючи вирази (7) і (8) і вводячи позначення:

$$\theta = \frac{1}{kT} \lg e = \frac{5040}{T}, \quad (9)$$

де k – виражено в еВ/град, отримаємо наступні логарифмічні рівняння:

$$\lg \frac{I_{ki}^0 \lambda^3}{g_i f_{ik}} = -\theta E_k + \lg \frac{8\pi^2 h e^2 N}{mU}, \quad (10)$$

$$\lg \frac{I_{ki}^0}{\lambda B_\lambda} = \lg g_i f_{ik} \lambda_{ik} - \theta E_i + \lg \frac{4\pi^2 e^2}{mc^2 U} N. \quad (11)$$

Перше з цих рівнянь – рівняння прямої, що виражає больцманівський розподіл за відсутності самопоглинання. Друге рівняння представляє початкову ділянку кривої росту, коли оптичний шар ще досить тонкий і інтенсивність лінії прямо пропорційна числу випромінюючих атомів.

У міру зростання оптичної товщини τ_ν змінюється I за певним законом. Зростання інтенсивності лінії визначається тепер вже не стільки зростанням числа випромінюючих атомів, скільки доплерівським розширенням лінії в результаті теплових рухів атомів зі швидкістю v_t . Вигляд формули, що виражає $I/\lambda B_\lambda$, залежить тепер від прийнятої моделі випромінюючого об'єму.

Практичне застосування методу кривих росту полягає в наступному. Для певного значення температури T знаходимо θ . Для кожної спектральної лінії обчислюється значення $(\lg g_i f_{ik} \lambda_{ik} - \theta E_i)$ і відкладається по осі абсцис. Величина $\lg(I/\lambda B_\lambda)$ відкладається по осі ординат. За формулою (11) для даного T будуються теоретичні криві росту, а потім, зміщуючи їх по осях, намагаються домогтися найкращого збігу однієї з них зі спостереженнями. Після того як таке поєднання досягнуто, для кожної лінії знаходять поправку $\Delta \lg I$ до оптично тонкого шару. На графіку кривої росту вона дорівнює відстані від цієї кривої по ординаті до прямої, що відповідає випромінюванню оптично тонкого шару. Одночасно будують інший графік, на якому значення $\lg(I\lambda^3/gf)$ відкладають по аргументу E_k . Кожна точка переноситься потім вгору на величину $\Delta \lg I$ таким чином, що по $I\lambda^3/gf$ ми отримуємо $I^0\lambda^3/gf$. Точки з координатами $\lg(I^0\lambda^3/gf)$ повинні лягти на пряму, тангенс кута нахилу якої до осі абсцис дорівнює уточненому значенню θ . Рівняння прямої знаходиться методом найменших квадратів [31]. Метод кривих росту дозволяє отримати число випромінюючих атомів, їх сумарну масу, температуру збудження і цілий ряд інших величин.

Розділ 3. Результати досліджень фотографічних спектрів вибраних метеорів. Досліджені в роботі фотографічні спектри метеорів були отримані 21 і 22 жовтня 1958 року, 10 серпня 1965 року, 2 і 27 серпня 2011 року, 20 лютого і 11 серпня 2012 року за допомогою метеорних патрулів, розміщених в Ашхабадській астрофізичній лабораторії, на спостережній станції Крижанівка Одеської астрономічної обсерваторії та в Астрономічній обсерваторії Астрономічного інституту Академії наук Чеської Республіки в м. Ондржейов. Три спектри було отримано за допомогою оптичної призми і зафіксовано на фотоплівці, а чотири – з використанням дифракційних ґраток та фотопластинок.

Спектри метеорів, отримані за допомогою дифракційної ґратки, дозволяють здійснити детальну ідентифікацію спектральних ліній, визначити їх інтенсивності, розрахувати фізичні параметри метеорних тіл, побудувати моделі метеорних явищ, виконати пошук нових емісійних ліній.

В основі обробки та подальшого дослідження спектрів метеорів лежать методика та програмне забезпечення (ПЗ), розроблене спеціально для досліджень фотографічних спектрів метеорів головним науковим співробітником відділу

міжпланетної матерії Астрономічної обсерваторії Академії наук Чеської Республіки доктором Їрші Боровічкою.

До робочого пакету програм належать наступні програмні засоби:

- програма Fishscan призначена для обробки знімків метеорів та метеорних спектрів, фотометрії зір, отримання спектрограм метеорів та їх кривих блиску;
- програма Spsal розроблена для ідентифікації спектральних ліній та калібрування інтенсивностей;
- програма Bin2csv дає можливість конвертувати вихідні файли ПЗ Fishscan і Spsal у файли з розширенням .csv та .xls для роботи в табличних редакторах.

Таблиця 1

Дані спектральних спостережень метеорів, отриманих за допомогою дифракційної ґратки.

Дата	Тривалість експозиції, UT	Координати проекції початку і кінця метеора	Висота появи та затухання метеора, км	Дифракційна ґратка, штрих/мм
02.08.2011	20 ^h 10 ^m 06 ^s – 02 ^h 00 ^m 26 ^s	$\lambda_{\text{п}}=15.76993^{\circ}\text{E}$ $\varphi_{\text{п}}=49.38140^{\circ}\text{N}$ $\lambda_{\text{к}}=15.61661^{\circ}\text{E}$ $\varphi_{\text{к}}=49.13797^{\circ}\text{N}$	115.71 – 80.62	600
27.11.2011	19 ^h 42 ^m 30 ^s – 02 ^h 50 ^m 28 ^s	$\lambda_{\text{п}}=16.27402^{\circ}\text{E}$ $\varphi_{\text{п}}=49.75529^{\circ}\text{N}$ $\lambda_{\text{к}}=16.00572^{\circ}\text{E}$ $\varphi_{\text{к}}=49.63438^{\circ}\text{N}$	110.08 – 75.85	600
20.02.2012	17 ^h 40 ^m 20 ^s – 04 ^h 50 ^m 40 ^s	$\lambda_{\text{п}}=14.45623^{\circ}\text{E}$ $\varphi_{\text{п}}=50.18538^{\circ}\text{N}$ $\lambda_{\text{к}}=14.4547^{\circ}\text{E}$ $\varphi_{\text{к}}=50.31717^{\circ}\text{N}$	69.63 – 41.95	400
11.08.2012	19 ^h 50 ^m 30 ^s – 02 ^h 20 ^m 30 ^s	$\lambda_{\text{п}}=16.17354^{\circ}\text{E}$ $\varphi_{\text{п}}=50.61855^{\circ}\text{N}$ $\lambda_{\text{к}}=15.905^{\circ}\text{E}$ $\varphi_{\text{к}}=50.49733^{\circ}\text{N}$	109.52 – 76.05	600

Фотопластинки і фотоплівки було проскановано з роздільною здатністю 1280×1280 dpi. Перед початком вимірювань поле зображення було вирівняне, тобто зведене до однорідності в межах всієї площі. Для цього використовувався фактор він'єтування, значення якого становило 2×10^{-3} .

Характеристична крива для переведення почорнінь в інтенсивності будувалася з використанням нульових порядків спектрів зір, зафіксованих на платівці. Гранична зоряна величина 4^m. Червоні зорі (спектральний клас M) були виключені. На Рис. 1 показано лише лінійну частину характеристичної кривої. Оскільки не було можливості отримати незалежну форму характеристичної кривої, то область переекспонованих зображень тут не представлена. Через це калібрування дуже яскравих ліній залишається невідомим. Враховуючи це, оцінки фізичних параметрів досліджених метеорів робились лише по тих спектральних лініях, які не були переекспонованими на спектрограмах, тобто для яких було отримано надійні профілі спектральних ліній.

Відносна спектральна чутливість системи визначалася за допомогою спектрів першого порядку Юпітера та Полярної зорі, зафіксованих на тих же пластинках,

що і спектр метеора. Розподіл енергії в спектрі Юпітера було взято з роботи [32]. Співвідношення обох спектрів дали функцію спектральної чутливості, представлену на Рис. 2. Видно, що максимум чутливості лежить в області $\lambda 4500 \text{ \AA}$, а мінімум – в області $\lambda 5200 \text{ \AA}$.

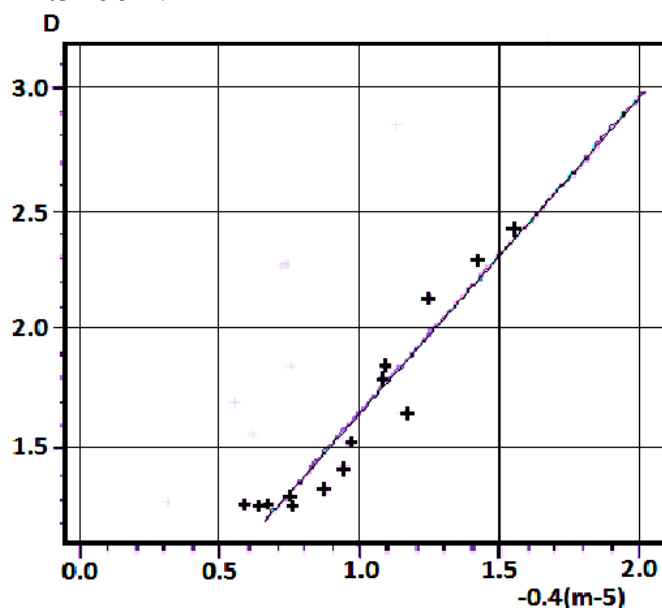


Рис. 1. Характеристична крива платівки, що відображає залежність густини почорніння D від величини падаючого потоку випромінювання зір, що мають зоряну величину m . Хрестиками позначено фотометричні дані для окремих зір.

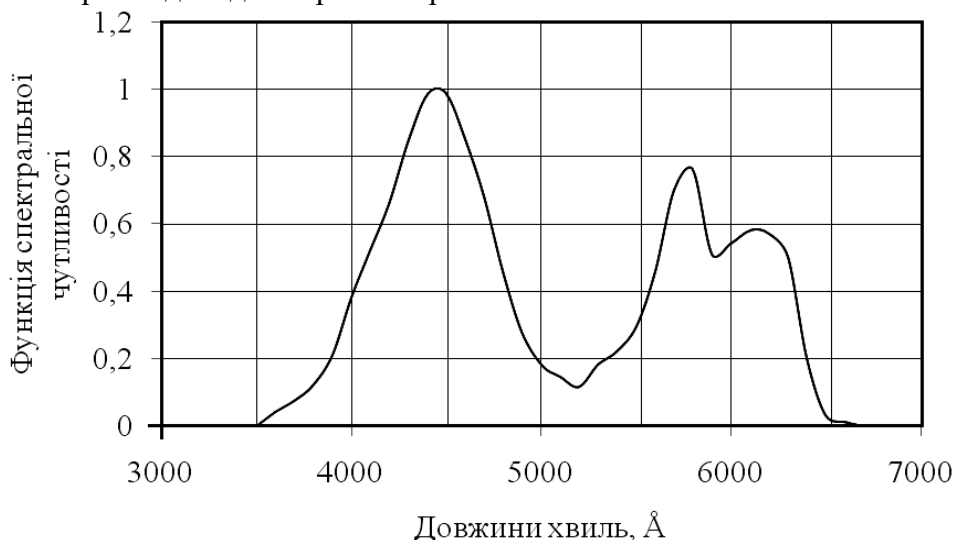


Рис. 2. Відносна спектральна чутливість спектрографа. Максимум чутливості лежить в області $\lambda 4500 \text{ \AA}$, а мінімум – в області $\lambda 5200 \text{ \AA}$.

Абсолютне калібрування досліджуваних спектрів здійснювалось поетапно:

1. Видимий діапазон $\lambda 3500\text{--}7000 \text{ \AA}$ спектра Сонця, отриманий за межами атмосфери Землі, використовувався як фотометричний стандарт.

2. Спектр порівняння визначався із спектрів Сонця і Юпітера: для кожної довжини хвилі в спектрі Сонця з кроком 10 \AA брались відповідні значення альbedo Юпітера [32].

3. Оскільки спектр Юпітера і спектр метеора отримані з однією і тією ж апаратурою, то за спектрограмою порівняння проведено ототожнення емісійних ліній в спектрі метеора.

4. Після цього спектр метеора ділився на спектр порівняння, таким чином було зроблено нормування спектра метеора.

5. Оскільки фіолетова область спектра Юпітера є нечіткою, то в цій області для порівняння використовували спектр Полярної зорі. Знайдена функція спектральної чутливості використовувалася для калібрування інтенсивностей емісійних ліній в спектрі метеора.

Для ідентифікації спектральних ліній досліджувались найяскравіші частини перших спектральних порядків – під час основного спалаху. Величина фону визначалася в областях, чистих від спектрів метеора чи зір. Спектри містять багато окремих емісійних ліній, що належать атомам різних хімічних елементів. У синій області спектра лінії не чіткі, однак вони також ідентифіковані. В дисертації представлені детальні спектрограми, за допомогою яких проводилися ототожнення спектральних ліній в досліджених метеорних спектрах. По осі абсцис відкладено довжини хвиль емісійних ліній в \AA , а по осі ординат – інтенсивності спектральних ліній в $\text{erg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{\AA}^{-1}\text{sr}^{-1}$. Проведено калібрування і вимірювання довжин хвиль, масштаб яких визначався за відомими лініями в спектрі [33, 34]. Поліном третього степеня було використано для переходу від інструментальних довжин хвиль до довжин хвиль емісійних ліній в \AA .

В досліджуваних спектрах метеорів виявлено емісійні лінії атомів CrI, FeI, MgI, SiI, AlI, MnI, CaI, TiI, NaI та іонів FeII, CaII, MgII, TiII, SiII. Створено каталог спостережених емісійних ліній в спектрі кожного метеора, який містить спостережену і теоретичну довжини хвиль емісійних ліній, назву атома і номер мультиплету, інтенсивність ліній у відносних та абсолютних одиницях. Через відсутність детальних даних спостережень для призмових спектрів метеорів визначено лише якісно хімічний склад метеорних тіл. Для визначення температури збудження атомів заліза FeI досліджено спектр метеора, отриманий 2 серпня 2011 року, в якому зареєстровано найбільше ліній заліза (Рис. 3).

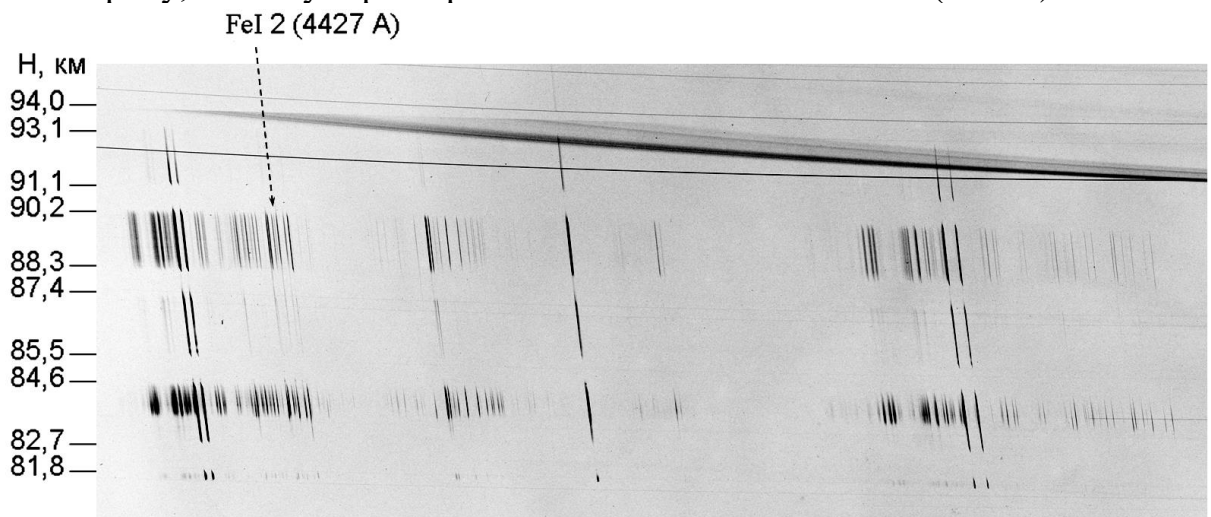


Рис. 3. Спектр метеора, який спостерігався 2 серпня 2011 року. Напрямок польоту метеора проходив згори донизу. Спектр поділений на фрагменти через перекриття сліду метеора обтюратором. В лівій частині спектра видно перший спектральний порядок, посередині – частина другого спектрального порядку. Горизонтальні смуги – це зображення нульових спектральних порядків зір. У центрі знімка спостерігається спектр зорі α Ori.

Використовуючи метод кривих росту, визначено температуру збудження атомів заліза FeI для різних висот польоту метеора. Частина результатів цих розрахунків представлено на Рис. 4: по осі абсцис – значення енергії E_2 найвищого рівня у атомі в eV, по осі ординат – відповідні значення $\lg(I^3/gf)$, де I – інтенсивність випромінювання в спостережених спектральних лініях, gf – сила осцилятора. Також на Рис. 4 вказано висоти, для яких проводилися розрахунки, і відповідні значення температур. Для покращення точності та достовірності результатів проведено аналіз для 57 окремих спектральних ліній FeI.

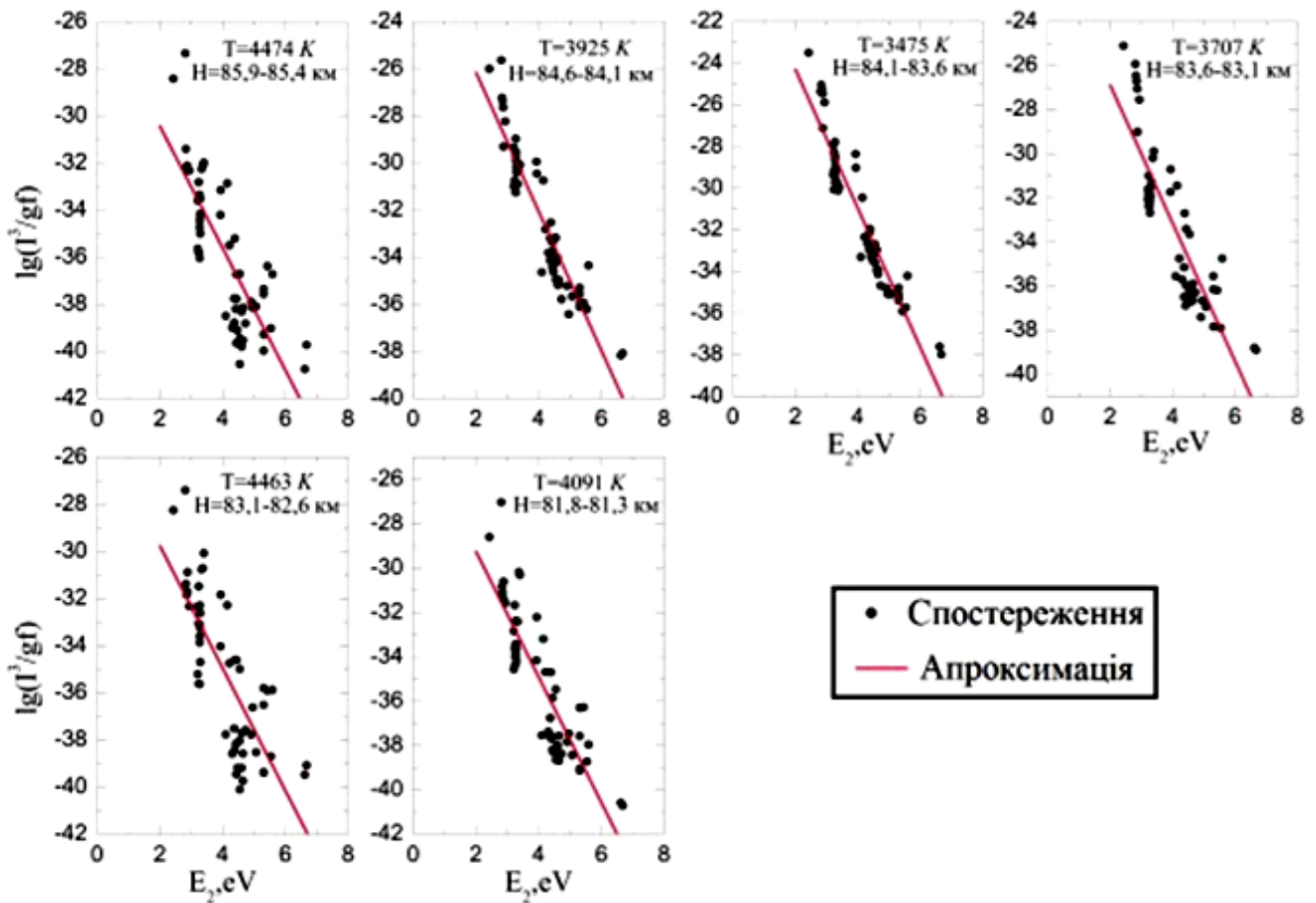


Рис. 4. Визначення температури збудження атомів FeI в метеорній комі.

Результати визначення температури збудження атомів FeI в метеорній комі та її зміна з висотою представлені в Таблиці 2 та на Рис. 5, відповідно. На Рис. 5 також показана крива блиску емісійної лінії FeI (2) ($\lambda 4427\text{ \AA}$). Положення даної лінії в спектрі метеора вказане на Рис. 3. Одночасно було визначено і кількість атомів в стовпі на промені зору. Результати розрахунків представлено в Таблиці 2.

Увагу привертає те, що під час різких спалахів яскравості метеора на висотах 89.5 і 83.9 км у точці максимуму інтенсивності температура збудження атомів заліза має найменше значення (див. Рис. 5). До того ж температура збудження змінюється відносно повільніше, ніж інтенсивність. На таку закономірність неодноразово вказували й інші дослідники. Зокрема в роботі [30] відзначається, що для метеорів без спалахів блиску залежність температури збудження від висоти має регулярний характер і повторює криву блиску, а для метеорів зі

спалахами ця залежність змінюється стрибкоподібно. Причому, температура збудження атомів FeI, MgII і CaII падає при збільшенні блиску метеора, тобто при посиленні випаровування. Це ж саме показує й розрахована концентрація іонів CaII уздовж шляху метеора: вона має мінімальне значення на ділянці кривої блиску, де випаровування і блиск досягають максимуму.

Таблиця 2

Температура збудження атомів FeI за спектром метеора, отриманого 2 серпня 2011 року.

Висота, км	Температура, К	Кількість атомів
91.6–91.1	4600 ± 440	1.13×10 ¹⁹
90.2–89.7	3870 ± 250	2.42×10 ²¹
89.7–89.2	3770 ± 230	4.52×10 ²¹
89.2–88.7	3830 ± 240	3.53×10 ²¹
88.7–88.2	4080 ± 320	7.61×10 ²⁰
87.4–86.9	4300 ± 380	1.25×10 ²⁰
86.9–86.4	4160 ± 400	8.18×10 ¹⁹
86.4–85.9	4170 ± 380	3.92×10 ¹⁹
85.9–85.4	4470 ± 410	1.79×10 ¹⁹
84.6–84.1	3930 ± 190	2.66×10 ²¹
84.1–83.6	3480 ± 150	3.68×10 ²²
83.6–83.1	3710 ± 260	1.83×10 ²¹
83.1–82.6	4460 ± 450	3.58×10 ¹⁹
81.8–81.3	4090 ± 290	9.58×10 ¹⁹

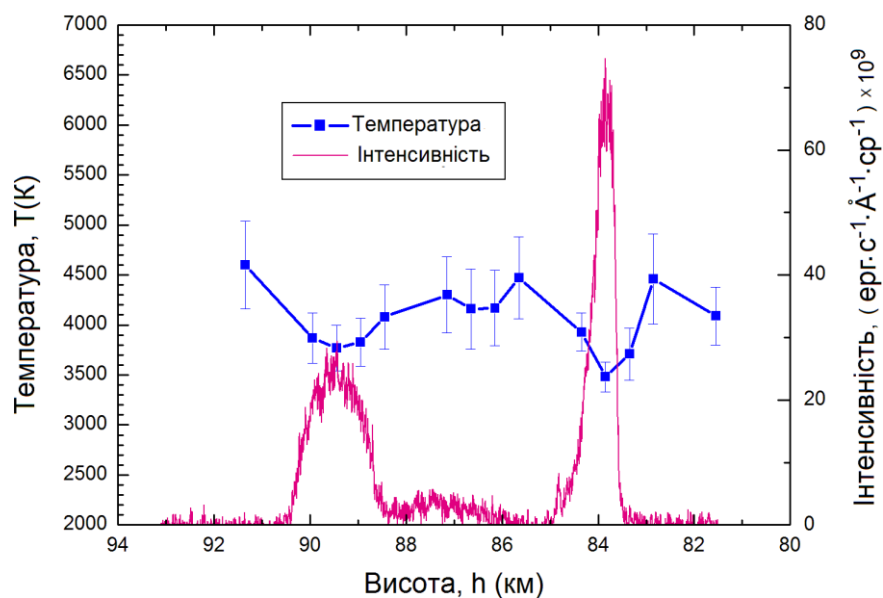


Рис. 5. Зміна температури збудження атомів FeI в метеорній комі з висотою та крива блиску спектральної лінії FeI (2) ($\lambda 4427 \text{ \AA}$).

В роботі Г.І. Кохірової [30] це явище пояснюється тим, що з посиленням випаровування відносно холодні пари не встигають прогріватися за рахунок

взаємодії з молекулами набігаючого повітря. За аналогією можна припустити, що при цьому слабшає й процес іонізації, або ж розширення пару приводить до зменшення концентрації іонів в одиниці об'єму.

3. Цеплеха [31] висунув інше пояснення виявленого ефекту. Він прийшов до висновку, що причиною цього може бути явище накладання випромінювання метеорного “хвоста”, у якого підвищується яскравість у спалахах, а температура збудження має більш низькі значення, порівняно з ефектами, які спричиняє “голова” метеора.

Подібний ефект спостерігається і в наших результатах. Як видно на Рис. 5, більшому спалаху (тобто більшому викиду речовини) відповідає менше значення температури, порівняно з попереднім менш інтенсивним спалахом. Фізичний механізм, що приводить до різких спалахів яскравості метеорів, дотепер погано вивчений і вимагає накопичення спостережних даних. Деякі із ймовірних механізмів розглянуті в монографії [35].

Для визначення температури збудження в даній роботі методом кривих росту вважалось, що випромінювання в лініях заліза відбувається в оптично тонкому середовищі. А для цього випадку при сталій інтенсивності випромінювання існує залежність: чим менша густина газу тим вища його температура, і навпаки [35]. Таким чином можна стверджувати, що під час обох спалахів відбувалося суттєве руйнування метеорного тіла з подальшими викидами метеорної речовини і розсіянням її в просторі навколо метеороїда. Внаслідок активного руйнування відкривалися менш нагріті ділянки метеорного тіла і відносно холодні пари не встигали прогріватися за рахунок взаємодії з молекулами атмосфери і температура збудження атомів в метеорній комі під час спалахів виявилася нижчою.

Очевидно, що збільшення роздільної здатності при подальших дослідженнях спектрів метеорів, а також врахування того, що у метеорній комі відсутня локальна термодинамічна рівновага і не виконується больцманівський розподіл населеності рівнів дозволить більш точно визначати температуру збудження атомів різних хімічних елементів в комі метеора.

Розділ 4. Каталог мультиплетів і діаграми Гротріана. Спектри метеорів – це переважно спектри випромінювання атомів, з яких складається метеорне тіло. У метеорних спектрах спостерігається велика кількість емісійних ліній атомів різних хімічних елементів, для яких характерна мультиплетна структура. Вивчення мультиплетних структур дає можливість досліджувати властивості і поведінку атомів речовини метеорного тіла. Результати можна використовувати для побудови моделей фізико-хімічних процесів, що відбуваються під час метеорних явищ в атмосфері Землі.

Для деяких завдань метеорної фізики необхідно знати не тільки довжину хвилі тієї чи іншої лінії та її приналежність до даного мультиплету, але і потенціали збудження верхнього і нижнього рівнів. Ця інформація може бути використана, наприклад, при вивченні розподілу атомів по рівнях і відмінності його від больцманівського, при побудові емісійних кривих росту, для визначення температури збудження атомів в метеорній комі та ін.

Тому перед нами постало завдання створити каталог ліній мультиплетів хімічних елементів, які спостерігаються в спектрах метеорів, із зазначенням довжини хвилі кожної лінії, термів, енергетичних рівнів (в електронвольтах), ймовірностей електронних переходів в атомах і сили осцилятора. Оскільки випромінювання атомів заліза в метеорній комі дають найбільшу серед всіх елементів кількість мультиплетів емісійних ліній – 329, а магній дає найбільш яскраві емісійні лінії в спектрах метеорів, тому саме ці елементи були взяті до уваги в першу чергу. Таблиці 3 і 4 є частиною створеного каталогу, в яких приведено список ліній мультиплетів магнія MgI і MgII, а список ліній мультиплетів заліза FeI і Fe II – в Додатках до дисертації. В таблицях указано номери мультиплетів, лабораторні довжини хвиль найбільш інтенсивної спектральної лінії даного мультиплету в Å з точністю до 0.01 Å, назви спектральних термів, найнижчий та найвищий енергетичні рівні в eV, квантове число J , значення $\log gf$, де gf – сила осцилятора, відповідно до каталогів Ш. Мур, А.Н. Зайделя і NIST ASD.

Таблиця 3

Мультиплети MgI, виявлені в метеорних спектрах.

№ мультиплету	Довжина хвилі, Å	Терми	Енергетичні рівні, eV	J	$\log gf$
1	4571.10	$3^1S - 3^3P^0$	0.00 – 2.71	0–1	–5.623
2	5183.60	$3^3P^0 - 4^3S$	2.71 – 5.11	2–1	–0.167
	5172.68		2.71 – 5.11	1–1	–0.393
	5167.32		2.71 – 5.11	0–1	–0.87
3	3838.29	$3^3P^0 - 3^3D$	2.71 – 5.95	2–3	0.397
	3832.30		2.71 – 5.95	1–2	0.125
	3829.36		2.71 – 5.95	0–1	–0.227
	3838.29		2.71 – 5.95	2–2	–0.351
	3832.30		2.71 – 5.95	1–1	–0.353
8	5711.09	$3^1P^0 - 5^1S$	4.35 – 6.52	1–0	–1.724
9	5528.41	$3^1P^0 - 4^1D$	4.35 – 6.59	1–2	–0.498
10	4730.03	$3^1P^0 - 6^1S$	4.35 – 6.97	1–0	–2.347
11	4702.99	$3^1P^0 - 5^1D$	4.35 – 6.98	1–2	–0.440
14	4351.91	$3^1P^0 - 6^1D$	4.35 – 7.19	1–2	–0.583
15	4167.27	$3^1P^0 - 7^1D$	4.35 – 7.32	1–2	–0.745
16	4057.51	$3^1P^0 - 8^1D$	4.35 – 7.40	1–2	–0.900
17	3986.75	$3^1P^0 - 9^1D$	4.35 – 7.45	1–2	–1.060
23	6318.72	$4^3S - 6^3P^0$	5.11 – 7.07	1–2	–2.103

Таблиця 4

Мультиплети MgII, виявлені в метеорних спектрах.

№ мультиплету	Довжина хвилі, Å	Терми	Енергетичні рівні, eV	J	$\log gf$
4	4481.33	$3^2D - 4^2F^0$	8.86 – 11.63	$1\frac{1}{2} - 2\frac{1}{2}$	0.594
	4481.13		8.86 – 11.63	$2\frac{1}{2} - 3\frac{1}{2}$	0.749
9	4433.99	$4^2P^0 - 6^2S$	10.00 – 12.79	$1\frac{1}{2} - \frac{1}{2}$	–0.907
	4427.99		10.00 – 12.79	$\frac{1}{2} - \frac{1}{2}$	–1.208
10	4390.56	$4^2P^0 - 5^2D$	10.00 – 12.82	$1\frac{1}{2} - 2\frac{1}{2}$	–0.523
	4384.64		10.00 – 12.82	$\frac{1}{2} - 1\frac{1}{2}$	–0.776
18	4739.59	$4^2D - 8^2F^0$	11.57 – 14.18	$2\frac{1}{2} - 3\frac{1}{2}$	–0.662

Каталог доповнено діаграмами Гротріана, які показують дозволені переходи електронів між рівнями енергій в атомах, що супроводжують випромінювання в тому чи іншому мультиплеті в метеорних спектрах. Їх використовують для графічного зображення електронної структури атомів хімічних елементів. В роботі побудовано повні, на скільки це можливо, діаграми Гротріана для FeI і MgI. Діаграми представлено в Додатках до дисертації. Результати роботи опубліковано в [1, 3, 7].

ВИСНОВКИ

У дисертації представлено дослідження фотографічних спектрів вибраних метеорів, частина з яких отримана із спектрографом з дифракційною ґраткою, а частина – з призмовим спектрографом. Проведено аналіз ототожнених емісійних ліній та мультиплетів в спектрах метеорів і створено відповідні каталоги. Досліджено деякі фізичні характеристики метеорного явища та їх просторовий і часовий розподіли. В ході роботи виконано аналіз та узагальнення фізичних властивостей досліджуваних метеорів і отримано наступні результати:

1. Оброблено і проаналізовано фотографічні спектри трьох спорадичних метеорів, двох метеорів потоку Оріоніди та двох метеорів потоку Персеїди. Проведено порівняльний аналіз отриманих результатів.

2. Визначено речовинний склад досліджуваних метеорних тіл за їхніми спектрами. Найбільш інтенсивні лінії в спектрах метеорів належать атомам CrI, FeI, MgI, SiI, AlI, MnI, CaI, TiI, NaI, іонам FeII, CaII, MgII, TiII, SiII та молекулам N₂, які характерні для залізних та залізо-силікатних метеороїдів.

3. Створено каталог спостережених емісійних ліній в спектрі кожного метеора (257 ліній), який містить спостережену і теоретичну довжини хвиль емісійних ліній, назву атома і номер мультиплету, інтенсивність ліній у відносних та абсолютних одиницях. Складено каталог для 329 ліній спектральних мультиплетів атомів заліза FeI, 23 ліній іонів заліза FeII, 12 ліній атомів магнія MgI і 4 ліній іонів магнія MgII, що містить всі необхідні дані для ідентифікації спектральних ліній і кількісного аналізу метеорних спектрів. Грунтуючись на створеному каталозі емісійних ліній спектральних мультиплетів, побудовано, по можливості, повні діаграми Гротріана для ліній мультиплетів заліза FeI і магнія MgI, які наочно демонструють переходи між електронними станами в атомах заліза та магнія.

4. В наближенні термодинамічної рівноваги та больцманівського розподілу населеності рівнів, визначено ефективну температуру збудження атомів FeI та кількість випромінюючих атомів FeI в метеорній комі за дослідженнями спектра метеора, спостереженого 2 серпня 2011 року. Отримано криву блиску спектральної лінії заліза FeI (2) ($\lambda 4427 \text{ \AA}$).

5. Виявлено нелінійну зміну температури метеорного тіла, спостереженого 2 серпня 2011 року, з висотою та з часом. Спостерігається підвищення температури збудження атомів FeI перед і одразу після спалахів та її зниження безпосередньо під час спалахів, що є ознакою руйнування метеороїда з подальшим викидом речовини.

Проведені дослідження разом з існуючими літературними даними, по-перше, показали відмінності в поведінці і властивостях метеорів, по-друге, підтвердили ефективність спектральних досліджень метеорних явищ важливість спектрів з високими спектральними, просторовими та часовими роздільними здатностями для пояснення фізико-хімічних процесів в метеорах. Такий спостережний матеріал можна отримати завдяки сучасному багатофункціональному спостережному комплексу, який буде реєструвати метеори в інтегральному світлі з різними фільтрами і фіксувати спектри метеорів вздовж всього проміжку часу метеорного явища.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бронштэн В.А. Каталог и диаграммы Гротриана для линий мультиплетов железа FeI і FeII, наблюдаемых в метеорных и кометных комах / В.А. Бронштэн, К.И. Чурюмов, В.А. Пономаренко, В.Г. Кручиненко, Т.К. Чурюмова, А.В. Мозговой, **А.М. Мозговая**, М.И. Сербова // Вісник Астрономічної Школи. – 2011. – Т. 7. – № 1–2. – С. 195–201.
2. **Мозгова А.М.** Часова еволюція спектра метеора 9-10 серпня 1965 року / А.М. Мозгова, К.І. Чурюмов, В.О. Смірнов // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Астрономія. – 2013. – № 1 (50). – С. 49–52.
3. **Mozgova A.M.** Iron multiplets in meteor comas / A.M. Mozgova, K.I. Churyumov, M.V. Melnyk // *Astronomische Nachrichten*. – 2015. – V. 336. – № 10 – С. 961–967.
4. **Mozgova A.M.** Identification of emission lines in a meteor spectrum obtained on August 2, 2011 / A.M. Mozgova, J. Borovicka, P.Spurny, K.I. Churyumov // *Odessa Astronomical Publications*. – 2015. – V. 28/2. – С. 289–291.
5. Горбанев Ю.М. Украинская метеорная оптическая сеть / Ю.М. Горбанев, Е.Ф. Князькова, А.В. Шульга, Н.А. Куличенко, П.Н. Козак, **А.М. Мозговая**, А.В. Голубаев // *Радиотехника*. – 2016. – № 185. – С.5–8.
6. Козак П. Концепція створення багатофункціонального мобільного автоматизованого комплексу для спостережень метеорів / П. Козак, **А. Мозгова** // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Астрономія. – 2016. – № 2(54). – С. 51–55.
7. **Мозгова А.** Діаграма Гротріана для ліній мультиплетів MgI, що спостерігаються в метеорних спектрах / А. Мозгова // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Астрономія. – 2016. – № 2 (54). – С. 49–51.
8. **Мозгова А.М.** Визначення температури збудження атомів FeI за спектром метеора 2 серпня 2011 року / А.М. Мозгова, В.В. Клецонок, О.В. Голубаєв, І. Боровічка // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Астрономія. – 2017. – № 2 (56). – С. 44–47.
9. **Mozgova A.M.** The spectrum of a meteor of 9/10 August 1965 / A.M. Mozgova, K.I. Churyumov, N.S. Kovalenko, V.O. Ponomarenko // 20th Young Scientists' Conference of Astronomy and Space Physics: Book of Abstracts, April 22–27, 2013, Kyiv. – 2013. – P. 51.

10. **Mozgova A.M.** Optical meteor spectrum observed on 9/10 August 1965 / A.M. Mozgova, V.A. Smirnov, K.I. Churyumov, V.O. Ponomarenko // *Астрономічна школа молодих учених. Актуальні проблеми астрономії і космонавтики: тези доп. міжнародної конференції*, 15 – 17 травня 2013 року, Біла Церква. – 2013. – С. 61.

11. **Mozgova A.M.** The temporal evolution of the meteor spectrum of 21 October, 1958 / A.M. Mozgova, K.I. Churyumov, V.O. Smirnov // *21th Young Scientists' Conference of Astronomy and Space Physics: Book of Abstracts*, April 28 – May 3, 2014, Kyiv. – 2014. – P. 14–15.

12. **Мозговая А.М.** Спектр метеора 22 октября 1958 года / А.М. Мозговая, В.О. Смирнов, К.И. Чурюмов // *XIV Одесская Международная Гамовская астрономическая конференция-школа “Астрономия на стыке наук: астрофизика, космофизика, космология и гравитация, радиоастрономия и астробиология”*: тезисы, 17–24 августа, 2014 года, Одесса. – 2014. – С. 48.

13. **Мозгова А.М.** Спектр метеора 2- 3 серпня 2011 року / А.М. Мозгова, Ї. Боровічка, К.І. Чурюмов // *Астрономія та фізика космосу в Київському університеті: тези доп. міжнародної конференції*, 27 – 30 травня 2014 року. – Київ: КНУ. – 2014. – С. 85.

14. **Мозгова А.М.** Ідентифікація спектральних ліній в спектрі метеора 2-3 серпня 2011 року / А.М. Мозгова, Ї. Боровічка, К.І. Чурюмов // *VI Міжнародна меморіальна конференція САММАС – 2014: тези доп. міжнародної конференції*, 29 вересня – 02 жовтня 2014 року, Вінниця. – 2014. – С.64.

15. **Мозговая А.М.** Предварительные результаты спектральных телескопических наблюдений метеоров в Одессе 2014 года / А.М. Мозговая, Ю.М. Горбанев, И.И. Кимаковская // *Астрономія та фізика космосу в Київському університеті: тези доп. міжнародної конференції*, 25 – 29 травня 2015 року. – Київ: КНУ. – 2015. – С.72–73.

16. Козак П.М. Концепція створення багатofункціонального мобільного телевізійного комплексу для спостережень метеорів / П.М. Козак, О.О. Рожило, **А.М. Мозгова** // *Астрономія та фізика космосу в Київському університеті: тези доп. міжнародної конференції*, 25 – 29 травня 2015 року. – Київ: КНУ. – 2015. – С. 80–83.

17. Ваколюк Г.А. Місце метеорної спектроскопії в сучасній науці / Г.А. Ваколюк, Я.В. Марисик, **А.М. Мозгова** // *IV Міжрегіональна науково-практична конференція. Астрономія і сьогодні: тези доп. конференції*, 9 квітня 2015 року. – Вінниця: ДПУ імені М. Коцюбинського. – 2015. – С. 52–54.

18. **Mozgova A.M.** The comparative analysis of meteor spectra processing / A.M. Mozgova, K.I. Churyumov, J. Borovichka, Yu.M. Gorbanev // *15-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School: Book of abstracts*, August 16-23, 2015, Odessa. – 2015. – P. 67.

19. **Мозгова А.М.** Дослідження мультиплетних структур в метеорних спектрах / А.М. Мозгова, Г.А. Ваколюк // *V Міжрегіональна науково-практична конференція. Астрономія і сьогодні: тези доп. конференції*, 12 квітня 2016 року. – Вінниця: ДПУ імені М. Коцюбинського. – 2016. – С. 62–64.

20. **Мозговая А.М.** Каталог и диаграммы Гротриана для линий мультиплетов железа и других химических элементов, наблюдаемых в метеорных

и кометних комах / А.М. Мозговая, К.І. Чурюмов // Радіометеори, метеори і міжпланетна складова: поблизу та на відстані: тези доп. Міжнародного наукового семінару пам'яті Б.Л.Кащеєва до 96-річчя з дня народження, 15 березня 2016 року. – Харків: ХНУРЕ. – 2016. – С. 19–20.

21. **Mozgova A.M.** The investigation of multiplet structures in meteor spectra / А.М. Mozgova // *Астрономія та фізика космосу в Київському університеті: тези доп. міжнародної конференції*, 24 – 27 травня 2016 року. – Київ: КНУ. – 2016. – С. 65.

22. **Мозгова А.М.** Каталог і побудова діаграм Гротріана для ліній мультиплетів заліза FeI і FeII, що спостерігаються в спектрах метеорних ком / А.М. Мозгова // *Астрономічна школа молодих вчених: тези доп. міжнародної конференції*, 26 – 27 травня 2016 року. – Київ: НАУ. – 2016. – С. 73–74.

23. **Мозгова А.М.** The investigation of multiplet structures in meteor spectra / А.М. Mozgova, К.І. Churyumov // *41st COSPAR Scientific Assembly: Book of Abstracts, July 30 – August 7, 2016, Istanbul, Turkey.* – 2016. – В0.4-39-16.

24. **Мозгова А.М.** Методи отримання спектрів метеорів / А.М. Мозгова, Г.А. Ваколюк // *VI Міжрегіональна науково-практична конференція. Астрономія і сьогодні: тези доп. конференції*, 12 квітня 2017 року. – Вінниця: ДПУ імені М. Коцюбинського. – 2017. – С. 145–148.

25. **Мозгова А.М.** Визначення температури збудження атомів FeI за спектром метеора 2 серпня 2011 року / А.М. Мозгова, І. Боровічка, В.В. Клещонок, О.В. Голубаєв // *VII Memorial International conference SAMMAC 2017: Book of abstracts, September 26 – 28, 2017, Vinnytsia.* – 2017. – С. 88–90.

26. Голубаєв О.В. Термічна десорбція речовини метеороїдів в близькосонячному просторі / О.В. Голубаєв, **А.М. Мозгова** // *VII Memorial International conference SAMMAC 2017: Book of abstracts, September 26 – 28, 2017, Vinnytsia.* – 2017. – С. 54–58.

27. **Мозгова А.М.** Дослідження метеорних явищ в лабораторії вищого навчального закладу / А.М. Мозгова, О.В. Мозговий // *VII Memorial International conference SAMMAC 2017: Book of abstracts, September 26 – 28, 2017, Vinnytsia.* – 2017. – С. 132–134.

28. Белєвцев Р.Я. Основні результати досліджень боліда EN171101 “Тур’ї Ремети” в Закарпатті / Р.Я. Белєвцев, К.І. Чурюмов, **А.М. Мозгова**, Є.В. Соботович, С.Д. Співак, В.І. Блажко, Е.Е. Лазаренко, С.В. Кузенко, А.С. Бондаренко // *VII Memorial International conference SAMMAC 2017: Book of abstracts, September 26 – 28, 2017, Vinnytsia.* – 2017. – С. 103–106.

29. **Mozgova A.M.** Some results of four meteor spectra research / А.М. Mozgova, V.V. Kleschonok, J. Borovichka // *17-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radioastronomy and Astrobiology”*: Book of abstracts, August 13–20, 2017, Odessa. – 2017. – P. 40.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

30. Кохирова Г.И. Исследование физических характеристик метеоров по спектральным наблюдениям / Г.И. Кохирова // дис. канд. физ.-мат. наук.: Москва. – 1999. – 147 с.
31. Ceplecha Z. Study of a bright meteor flare by means of emission curve of growth / Z. Ceplecha // Bull. Astron. Inst. Czechosl. – 1964.–V. 15. – P. 102–112.
32. Karkoschka E. Spectrophotometry of the Jovian Planets and Titan at 300- to 1000-nm Wavelength: The Methane Spectrum / E. Karkoschka // Icarus. – 1994. – V. 111. – P. 174–192.
33. Borovicka J. Line identifications in a fireball spectrum / J. Borovicka // Astron. Astrophys. Suppl. Ser. – 1994. – V. 103. – P. 83–96.
34. Borovicka J. A fireball spectrum analysis / J. Borovicka // Astron. Astrophys. – 1993. – V. 279. – P. 627–645.
35. Бронштэн В. А. Физика метеорных явлений / В. А. Бронштэн. – М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. литературы. – 1981. – 416 с.

АНОТАЦІЯ

Мозгова А.М. Речовинний склад вибраних метеорів за дистанційними спектральними спостереженнями. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 05.07.12 «Дистанційні аерокосмічні дослідження» (104 – Фізика та астрономія). – Національний авіаційний університет, Київ, 2018.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню фотографічних спектрів яскравих метеорів, отриманих за допомогою оптичної призми (21 і 22 жовтня 1958 року, 10 серпня 1965 року) та дифракційної решітки (2 і 27 серпня 2011 року, 20 лютого і 11 серпня 2012 року).

Основний результат роботи: визначено речовинний склад досліджуваних метеорних тіл. Найбільш інтенсивні лінії в спектрах метеорів належать атомам CrI, FeI, MgI, SiI, AlI, MnI, CaI, TiI, NaI та іонам FeII, CaII, MgII, TiII, SiII, які характерні для залізних та залізо-силікатних метеороїдів. Створено каталог спостережених емісійних ліній в спектрі кожного метеора і каталог (352 лінії) спектральних мультиплетів атомів заліза FeI, FeII та магнія MgI, MgII. Побудовано діаграми Гротріана для ліній мультиплетів заліза і магнія, які відображають переходи між електронними станами в атомах заліза та магнія. В наближенні стану термодинамічної рівноваги та больцманівського розподілу населеності рівнів, визначено ефективну температуру збудження атомів заліза FeI та кількість випромінюючих атомів FeI в метеорній комі за дослідженнями спектра метеора, спостереженого 2 серпня 2011 року. Виявлено нелінійну зміну температури метеорної коми з висотою та з часом, що є ознакою руйнування метеорного тіла під час спалахів з подальшим викидом речовини.

Практичне значення полягає в тому, що дані, отримані в результаті обробки представлених в роботі метеорних спектрів є цінними для фундаментальних наукових досліджень фізико-хімічних властивостей речовини метеорів. Представлений в роботі каталог ліній спектральних мультиплетів хімічних

елементів та діаграми Гротріана можуть бути використані дослідниками для вивчення метеорних явищ. Дані про хімічний склад метеорів є важливими для розв'язання питань космогонії і хімічної еволюції Сонячної системи.

Ключові слова: метеори, метеороїди, спектри, дистанційні спектральні спостереження, мультиплети, діаграми Гротріана.

ANNOTATION

Mozgova A.M. Material composition of meteors by remote spectral observations. – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of physical and mathematical sciences by the specialty 05.07.12 «Remote Aerospace Researches» (104 – Physics and astronomy). – National Aviation University, Kyiv, 2018.

The thesis is devoted to the study of photographic spectra of bright meteors obtained with the help of an optical prism (October 21 and 22, 1958 and August 10, 1965) and a diffraction grating (August 2 and 27, 2011, February 20 and August 11, 2012).

The main result is the material composition of the investigated meteor bodies is determined. The most intensive lines in the meteor spectra belong to the CrI, FeI, MgI, SiI, AlI, MnI, CaI, TiI, NaI atoms and FeII, CaII, MgII, TiII, SiII ions, which are characteristic of iron and iron-silicate meteoroids. A catalog of the observed emission lines in the spectrum of each meteor and catalog of spectral lines of the iron FeI and FeII and magnesium MgI and MgII multiplets (352 lines) were created. The Grotrian diagrams for spectral lines of multiplets of iron and magnesium, illustrating the transitions between electronic states in atoms, were constructed. In the approximation of the thermodynamic equilibrium state and the Boltzmann distribution of energy level population, an effective temperature of the excited states of neutral iron FeI and the number of radiating atoms of FeI in the meteor coma were determined from the August 2, 2011 meteor spectrum. A nonlinear change in the meteoric coma temperature with a height and over time has been detected. This is a sign of the destruction of the meteoric body during outburst with subsequent release of the substance.

The practical value of this work is that the data obtained as a result of the processing of the meteoric spectra presented in the work are valuable for fundamental research of physical and chemical properties of meteors matter. The catalog of spectral multiplets lines of chemical elements and the Grotrian diagrams presented in the work can be used by researchers to study meteoric phenomena. The data of the meteors chemical composition are important for resolving cosmogony questions and chemical evolution of the Solar system.

Key words: meteors, meteoroids, spectra, remote aerospace researches, multiplets, Grotrian diagrams.