

Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Міністерство освіти і науки України

Національний авіаційний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Мозгова Альона Михайлівна

УДК 523.68:520.35:520.8

ДИСЕРТАЦІЯ

Речовинний склад вибраних метеорів за дистанційними спектральними спостереженнями

05.07.12 – Дистанційні аерокосмічні дослідження

104 – Фізика та астрономія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ (А.М. Мозгова)

Науковий керівник:

Чурюмов Клим Іванович
член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук,
професор

КИЇВ – 2018

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.

Список публікацій здобувача

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. Клещенок, 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”: тезиси, 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 багатофункціонального 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 / А.М. Mozgova, К.І. 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 кометных комах / А.М. Мозговая, К.И. Чурюмов // Радиометеори, метеори і міжпланетна складова: поблизу та на відстані: тези доп. Міжнародного наукового семінару пам'яті Б.Л.Кашеєва 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 / A.M. 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 / A.M. Mozgova, K.I. Churyumov // 41st COSPAR Scientific Assembly: Book of Abstracts, July 30 – August 7, 2016, Istanbul, Turkey. – 2016. – B0.4-39-16.
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. Клещонюк, О.В. Голубаєв // VII Memorial International conference CAMMAC 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 CAMMAC 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 CAMMAC 2017: Book of abstracts, September 26 – 28, 2017, Vinnytsia. – 2017. – С. 132–134.
28. Бєлевцев Р.Я. Основні результати досліджень боліда EN171101 “Тур’ї Ремети” в Закарпатті / Р.Я. Бєлевцев, 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 CAMMAC 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.

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.

References

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 багатofункціонального 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 багатофункціонального 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 / А.М. Mozgova, К.І. 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 кометных комах / А.М. Мозговая, К.И. Чурюмов // *Радіометеори, метеори і міжпланетна складова: поблизу та на відстані: тези доп. Міжнародного наукового семінару пам'яті Б.Л.Кашеєва 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 / A.M. 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 / A.M. Mozgova, K.I. Churyumov // *41st COSPAR Scientific Assembly: Book of Abstracts, July 30 – August 7, 2016, Istanbul, Turkey.* – 2016. – B0.4-39-16.
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. Клещенок, О.В. Голубаєв // *VII Memorial International conference*

- CAMMAC 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 CAMMAC 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 CAMMAC 2017: Book of abstracts, September 26 – 28, 2017, Vinnytsia. – 2017. – С. 132–134.
28. Бєлевцев Р.Я. Основні результати досліджень боліда EN171101 “Тур’ї Ремети” в Закарпатті / Р.Я. Бєлевцев, 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 CAMMAC 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.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	16
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1. СПЕКТРИ МЕТЕОРІВ.....	26
1.1. Особливості спектрів метеорних явищ.....	28
1.2. Спектри метеорів потоку Персеїди.....	34
1.3. Класифікація спектрів метеорів.....	39
1.4. Порівняння спектрів метеорів зі спектрами комет.....	41
Висновки до розділу 1.....	45
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ МЕТЕОРІВ ТА ЇХ ОБРОБКИ.....	48
2.1. Астрономічні інструменти для спостережень метеорів.....	48
2.2. Характеристики фотоматеріалів для фотографічних спостережень метеорів.....	57
2.3. Оптичні призми та дифракційні ґратки.....	61
2.4. Методика обробки метеорних спектрів та ототожнення емісійних ліній.....	68
2.5. Метод емісійних кривих росту.....	74
Висновки до розділу 2.....	81
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ФОТОГРАФІЧНИХ СПЕКТРІВ ВИБРАНИХ МЕТЕОРІВ.....	83
3.1. Обробка спектрів метеорів та їх аналіз.....	83
3.1.1. Спостережний матеріал.....	83
3.1.2. Фотометрична обробка спектрів досліджуваних метеорів.....	90
3.2. Ототожнення спектральних ліній.....	93
3.3. Зміна спектра метеора з часом і висотою.....	106
3.4. Визначення температури збудження атомів заліза FeI.....	109
Висновки до розділу 3.....	116

РОЗДІЛ 4. МУЛЬТИПЛЕТНА СТРУКТУРА І ДІАГРАМИ	
ГРОТРІАНА.....	117
4.1. Мультиплетна структура спектрів метеорів і діаграми Гротріана.....	117
4.2. Спектральні мультиплети Fe I, Fe II, MgI і MgII.....	118
4.3. Діаграми Гротріана для мультиплетів Fe I і Mg I.....	121
Висновки до розділу 4.....	124
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	125
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	128
ДОДАТКИ.....	144

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

АЦП (Analog-to-digital converter, ADC) – аналого-цифровий перетворювач, електронний пристрій, що перетворює вхідний аналоговий сигнал у дискретний код (цифровий сигнал);

ЕКР – емісійні криві росту;

ЕОП – електронно-оптичний перетворювач, вакуумний фотоелектронний прилад для перетворення невидимого оком зображення (в ближньому інфрачервоному, ультрафіолетовому або рентгенівському спектрі) у видиме або для посилення яскравості видимого зображення;

КМОП (CMOS – Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) – комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПЗЗ (CCD – Charge-Coupled Device) – прилад із зарядовим зв'язком;

ССТV (Closed Circuit Television) – система телебачення замкнутого контуру;

UTC (Coordinated Universal Time) – всесвітній координований час.

ВСТУП

Метеори являють собою світлові явища і фізичні процеси, які є результатом руху метеорних тіл з високими швидкостями у газовій атмосфері. В атмосфері Землі метеорні явища зазвичай відбуваються на висотах 120–80 км, іноді вони спостерігаються на висотах вище 120 км і нижче 80 км.

Джерелами метеорних тіл, або метеороїдів, можуть бути пилові частинки кометних хвостів, уламки астероїдів чи космічний пил. Розміри частинок, що здатні спричинити явище метеора, становлять від 10^{-6} м до десятків метрів [1], а маси таких тіл можуть бути в межах $10^{-6} \div 10^7$ г [2]. Діапазон швидкостей метеорних тіл становить $10 \div 70$ км/с. Влітаючи в атмосферу Землі з такими швидкостями, космічна частинка починає взаємодіяти з шарами атмосфери. Взаємодіючи із зустрічними молекулами повітря, метеорне тіло підвищує їхні теплові швидкості, спричиняє руйнування молекул та іонізує атоми; стискаючи перед собою повітря, воно передає йому значну частину своєї кінетичної енергії. Розділяючи і переміщуючи електричні заряди, метеор породжує магнітні і електричні явища, іонізує земну атмосферу, впливаючи на поширення радіохвиль [1]. Метеорне тіло в свою чергу теж зазнає впливу з боку атмосферного середовища: відбувається його руйнація з виділенням енергії, яку ми спостерігаємо як метеорне явище. Його тривалість може становити доли секунди, більш яскраві метеори – боліди – можуть спостерігатися протягом кількох секунд.

Дослідження метеорних явищ – це виділений напрямок у фізиці космосу і в астрономії. Спочатку метеори спостерігали візуально. З появою фотографії розвитку набули фотографічні спостереження метеорних явищ. Останнім часом переважають відео спостереження. Головними особливостями метеорів є їх короткотривалість та непередбачуваність місця прольоту на небі.

Спостерігаючи метеори фотографічно в інтегральному світлі, радіолокаційними, фотоелектричними або телевізійними методами, ми можемо отримати інформацію про кінематичні характеристики метеорного тіла: його орбіту, тривалість та швидкість польоту, висоту початку і кінця явища, а також інтенсивність випромінення та її зміну з висотою, спостерігати наявність або відсутність спалахів тощо.

Детальніше вивчити метеорні явища дозволяє метеорна спектроскопія, тобто дослідження метеорних спектрів. Цей напрям в метеорній астрономії бере свій початок з 1864 року, коли вперше візуально спостерігався спектр метеора. Саме дослідження метеорних спектрів може дати відповідь на питання про природу випромінення метеорного явища.

Актуальність дослідження. 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 щею 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 [3–6].

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 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:

7. 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 [7–11] і каталоги спектральних ліній [8, 12–14]. Ідентифікація спектральних ліній здійснювалася згідно загальновідомих каталогів [12–14]. Створення каталогу ліній спектральних мультиплетів хімічних елементів, що спостерігаються в метеорних спектрах, здійснено на основі робіт [12–15]. Результати досліджень були апробовані на міжнародних конференціях та семінарах в Україні, опубліковані у фахових рецензованих виданнях, в тому числі з бази SCOPUS [16–23].

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

- в роботах [16–19, 22–23] дисертант приймала участь у постановці задачі, обробці спектрального матеріалу, аналізі отриманих результатів, написанні тексту публікацій;
- в роботах [20–21] здобувач приймала участь у постановці задачі і написанні тексту публікацій.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідались на наукових конференціях та семінарах:

1. 20th Young Scientists' Conference of Astronomy and Space Physics, April 22–27, 2013, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine.

2. XV Міжнародна наукова конференція "Астрономічна школа молодих вчених", 15–17 травня 2013 р., Біла Церква, Україна.
3. 21th Young Scientists' Conference of Astronomy and Space Physics, April 28–May 3, 2014, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine.
4. 14-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School "Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radioastronomy and Astrobiology", August 17–24, 2014, Odessa I.I. Mechnikov National University, Odessa, Ukraine.
5. International Conference "Astronomy and Space Physics", May 27–30, 2014, Astronomical observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine.
6. VI Міжнародна конференція "САММАС–2014", Жовтень 29 – Листопад 2 2014 р., Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського, Вінниця, Україна.
7. International Conference "Astronomy and Space Physics", May 25–29, 2015, Astronomical observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine.
8. IV Міжрегіональна науково-практична конференція "Астрономія і сьогодні", 9 квітня 2015 р., Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського, Вінниця, Україна.
9. 5-th Gamow Memorial International Conference dedicated to 111-th anniversary of George Gamow "Astrophysics and Cosmology after Gamow: progress and perspectives" and 15-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School "Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radioastronomy and Astrobiology", August 16–23, 2015, Odessa I.I. Mechnikov National University, Odessa, Ukraine.

10. V Міжрегіональна науково-практична конференція “Астрономія і сьогодні”, 12 квітня 2016 р., Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського, Вінниця, Україна.
11. Міжнародний науковий семінар “Радіометеори, метеори й міжпланетна складова: поблизу та на відстані” пам'яті Б.Л. Кащеєва, 15 березня 2016 р., Харківський національний університет радіоелектроніки (ХНУРЕ), Харків, Україна.
12. International Conference “Astronomy and Space Physics”, May 24–27, 2016, Astronomical observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine.
13. XVIII Міжнародна наукова конференція "Астрономічна школа молодих вчених", 26–27 травня 2016 р., Національний авіаційний університет, Київ, Україна.
14. VI Міжрегіональна науково-практична конференція “Астрономія і сьогодні”, 12 квітня 2017 р., Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського, Вінниця, Україна.
15. VII Міжнародна конференція "SAMMAS–2017", 26 – 28 вересня 2017 р., Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського, Вінниця, Україна.
16. 17-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School "Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radioastronomy and Astrobiology", August 13–20, 2017, Odessa I.I. Mechnikov National University, Odessa, Ukraine.

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

[16, 17, 19, 21–23] у наукових фахових виданнях України, 1 стаття [18] у закордонному науковому виданні, яке включене до міжнародних наукометричних баз, 1 стаття [20] в інших виданнях України, 21 тези доповідей в матеріалах наукових конференцій [24–44].

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.

РОЗДІЛ 1. СПЕКТРИ МЕТЕОРІВ

Встановлено, що середній проміжок часу між двома проникненнями космічних частинок масами 10^{-2} г в атмосферу нашої планети становить 7.2×10^{-3} с. Це приблизно 140 частинок за секунду [24]. Тобто відбувається постійна взаємодія метеорної речовини з атмосферою Землі. Завдяки цьому ми маємо можливість досліджувати структуру, визначати фізичні параметри та вивчати хімічний склад міжпланетної матерії.

Вперше спектр метеора спостерігав візуально Олександр Стеват Гершель 18 січня 1864 року за допомогою бінокюляра, обладнаного призмами [3, 46]. Так було започатковано візуальні спостереження метеорних спектрів. Вони проводилися з використанням спектроскопів прямого зору. Дисперсійним пристроєм була оптична призма. Візуальною спектроскопією метеорів займалися Джон Браунінг, А.П.А. Секкі, Ніколас вон Конколі [3, 46]. Результати перших візуальних спостережень показали, що спектри метеорів складаються з емісійних ліній. Це підтверджувало те, що в метеорах світяться пари і гази, а не тверде чи рідке тіло. У спектрах яскравіших метеорів спостерігалось більше емісійних ліній, ніж у слабких. Їх ідентифікацію проводили за кольорами. Оранжеву лінію, яка спостерігалася в більшості метеорних спектрів, приписували натрію з $\lambda 5893 \text{ \AA}$, зелену лінію – магнію $\lambda 5173 \text{ \AA}$. Поблизу лінії літію з $\lambda 6708 \text{ \AA}$ часто помічали дві червоні лінії, а поруч з ними, а іноді і окремо, ще дві невідомі зелені лінії. Крім того в спектрах містилося багато інших ліній, які ідентифікувати під час візуальних спостережень метеорів було складно, і вимагало знань з атомної спектроскопії. Разом з емісійним спектром іноді спостерігався неперервний спектр “ядра” [3].

Ширші можливості з'явилися в області досліджень метеорних явищ завдяки фотографічному методу спостережень. Перша фотографія метеорного спектра була випадково отримана 18 червня 1897 року в Арекипі, у південному відділенні Гарвардської обсерваторії [47]. Спектр на знімку

виявила В.Ф. Флемінг. Він містив шість ліній, що спершу помилково приписувалися водню [3].

Першим, хто детально досліджував спектри метеорів, був радянський астроном Сергій Миколайович Блажко. Фотографування метеорних спектрів проводилися в Московській обсерваторії. 11 травня 1904 року він зафіксував на фотопластинці свій перший спектр метеора. Йому належить ототожнення емісійних ліній CaII (H і K), Mg ($\lambda 3836\text{\AA}$), K ($\lambda 4046\text{\AA}$) та Ca ($\lambda 4237\text{\AA}$). Продовжив фотографування метеорних спектрів В.В. Фединський [3].

Згодом спектральні дослідження метеорів проводилися на метеорному патрулі Сталінабадської обсерваторії (Таджикистан), в Сімферополі під керівництвом В.В. Мартиненко і К.А. Любарського, в Ашхабаді.

За кордоном систематичне фотографування метеорних спектрів було розпочато в листопаді–грудні 1931 року в Гарвардській обсерваторії за ініціативи П. Мілмана [3,48]. Спостереження проводилися також на метеорних обсерваторіях Мінукі та Ньюбрук, Канадського астрономічного товариства в Регіні, Національної дослідницької ради в Спрінгхіллі (Канада), в Блаірдені (США) під керівництвом Дж. Рассела [3,49]. Для отримання метеорних спектрів почали використовувати репліки дифракційних решіток.

В 1953 році спектральні спостереження метеорів були розпочаті в Чехословаччині. Заслуга в цьому належить З. Цеплесі та Я. Райхлю. З 1969 року спектри метеорів почали отримувати на станції в Додайра в Японії.

В Україні центром зі спостережень і досліджень метеорних явищ загалом та метеорних спектрів зокрема, була Одеська астрономічна обсерваторія. Тут дослідження метеорних спектрів було розпочато Е.Н. Крамером і В.О. Смірновим в 1951 році. З 60-х років набув поширення телевізійний метод отримання спектрів метеорів.

Останнім часом багато зусиль вчених зосереджено на вдосконаленні технічних засобів спостережень та методик отримання і обробки метеорних спектрів [20–21, 50–53]. Продовжуються дослідження спектрів метеорів в Чехії (І. Боровічка, П. Спурний, П. Котен, Й. Бочек), США (П. Дженіскенс та

ін.), Японії (Т. Касуга та ін.), Іспанії (Дж.М. Мадієдо, Дж.М. Тріго–Родрігес та ін.), а також групами вчених в Італії, Канаді та Словаччині.

1.1. Особливості спектрів метеорних явищ.

Коли метеороїд входить в атмосферу Землі з високою швидкістю, він взаємодіє з атмосферою і починає швидко нагріватися за рахунок зіткнень з молекулами повітря, що приводить до випаровування його поверхні. Ефективна температура збудження в метеорній комі може досягати для різних хімічних елементів 1500–12000 К. Наприклад, атоми Mg і Ca, емісії яких є одними з найпоширеніших в спектрах метеорів, мають температури іонізації 1600–7000 К. Метеорна кома являє собою газову оболонку з суміші повітря і метеорних парів навколо метеороїда, в якій формується випромінювання метеора. В результаті дисоціації та іонізації частинок газу під впливом взаємних зіткнень і зіткнень з молекулами навколишньої атмосфери утворюється метеорна плазма. Хоча плазма спочатку гаряча і щільна, вона поступово дифундує в оточуючому повітрі і швидко охолоджується. Світіння метеора відбувається в основному від метеорної плазми на ранній стадії дифузії. Тривалість метеорного світіння, як правило, дуже коротка. Саме це світіння приводить до виникнення емісійного спектру, який складається з багатьох атомних і молекулярних емісійних ліній, які дають інформацію про хімічний склад метеорного тіла.

Визначення хімічного складу метеорних тіл і фізико-хімічних параметрів метеорного явища та пов'язаних з ним явищ в атмосфері Землі може бути виконано тільки із спектрального аналізу випромінювання метеорної речовини. Спектри метеорів також дають інформацію про умови збудження, світіння та іонізації метеорної плазми. Ступінь іонізації залежить від температури та густини. Хоча густина не має прямого впливу на спектр, вона фактично впливає на інтенсивність ліній, змінюючи вміст нейтральних атомів та іонів [8].

Дослідження спектрів метеорів показало, що іноді дуже важко розрізнити які лінії в спектрі виникають від речовини самого метеора, а які від світіння навколишньої атмосфери. Тим не менше вивчення декількох тисяч метеорних спектрів дозволило виявити в них лінії наступних хімічних елементів [16]:

- **нейтральні атоми:** FeI (329), CrI (65), NiI (54), CoI (48), TiI (38), OI (32), CaI (27), NI (18), MnI (18), MgI (12), NaI (11), CI (6), SiI (5), BaI (2), HI (1), AlI (1), LiI (1), KI (1), SrI (1), MoI (1);
- **іони:** FeII (23), OII (17), NII (16), AlII (12), CrII (8), SiII (5), CaII (4), MgII (4), TiII (2), SrII (1), BaII (1);
- **молекули:** N₂, CN, FeO, C₂, CH, MgO, CaO, AlO;
- **молекулярний іон:** N₂⁺.

У дужках, після позначення кожного атома або іона, вказано число ототожнених мультиплетів (найчастіше це пара або трійка близько розташованих ліній одного хімічного елемента, хоча мультиплет може складатися з однієї або більшого числа ліній, ніж три). Молекули розташовані в порядку збільшення інтенсивності їх випромінювання. Це не стосується атомів і іонів, оскільки велика кількість ліній ще не забезпечує сильного випромінювання.

Розглянемо основні хімічні елементи, ототожені в спектрах метеорів.

Залізо (FeI). Атоми заліза в метеорній комі дають найбільшу серед всіх елементів кількість ліній спектральних мультиплетів, а саме 329 [2]. Залізо хоча і не має дуже яскравих ліній, проте в його спектрі міститься багато середніх і слабких ліній. FeI рідко дає настільки ж яскраві лінії, як CaII, NaI і MgI, але деякі мультиплети, особливо (2), (4), (5), (20), (21), (41), (42), (43), досягають значної інтенсивності. За рахунок великої кількості ліній сумарна інтенсивність випромінювання парів заліза в метеорній комі іноді переважає всі інші емісії [2]. Іноді спостерігаються винятково “залізні” спектри. Вони складаються з ліній заліза, його іона FeII, окису заліза FeO і незмінних супутників заліза – нікелю і кобальту. Лінії FeII в метеорних спектрах дуже

слабкі. Якщо вони і проявляються, то під час метеорних спалахів за рахунок значного загального збільшення інтенсивності випромінювання.

Кобальт (CoI) і нікель (NiI). Зазвичай ці два елемента є супутниками заліза. Вони завжди присутні в спектрах залізних метеороїдів. У кожного з них відомо близько 50 мультиплетів, але серед них немає жодної яскравої лінії. Більшість ліній цих елементів бледують лініями заліза [8]. Більшість ліній CoI лежать у синій частині спектра, лінії NiI характерні для фіолетової частини спектра. Лінії CoII і NiII в спектрах метеорів дуже слабкі.

Хром (CrI). Цей елемент займає друге місце після заліза за кількістю мультиплетів (65) в спектрах метеорів, але має мало яскравих ліній. Найбільш сильні мультиплети (1), (7), (18), (21), (22). Лінії CrII слабкі [2].

Кальцій (CaII). На відміну від всіх інших елементів, у кальція найбільш сильні лінії належать його однократному іону CaII – це знаменитий дублет H ($\lambda=3968\text{Å}$) і K ($\lambda=3934\text{Å}$). Мультиплет CaII (1) спостерігається в більшості досліджуваних спектрів і в більш ніж половині випадків він за інтенсивністю переважає інші хімічні елементи, особливо його інтенсивність збільшується під час спалаху метеора. Типові спектри з сильними лініями H і K дають метеори потоку Персеїди. Лінії нейтрального кальцію значно слабші [2].

Натрій (NaI). Головний мультиплет – дублет $\lambda 5890\text{--}5896\text{Å}$, добре видно в більшості спектрів, а у деяких спектрах інтенсивність його випромінювання перевершує інтенсивність всіх інших ліній. Дуже часто з'являється першим, а зникає останнім. Відсутність дублету натрію вказує на те, що джерелом метеорного явища є залізний метеороїд. Добре представлений в спектрах метеорів потоку Драконіди [8].

Магній (MgI). Третій елемент після NaI і CaII, який дає найбільш сильні емісійні лінії. Найбільш яскравим є триплет MgI (2). Він часто зустрічається в метеорних спектрах і за яскравістю, в більшості випадків, схожий з дублетом H і K кальцію і з D-дублетом NaI. Сильну лінію дає MgI (3) поблизу $\lambda 3885\text{Å}$. Однократний іон MgII (4) також дає дуже яскраву лінію $\lambda 4481\text{Å}$, яка буває чітко виражена в спектрах метеорів потоку Гемініди [2].

Титан (TiI). Цей елемент не має яскравих ліній, але може бути виявлений у спектрах яскравих метеорів [2].

Марганець (MnI). Найбільш яскравим є триплет поблизу $\lambda 4033 \text{ \AA}$, інші лінії значно слабші. Лінії MnII дуже слабкі [8].

Алюміній (AlI). У метеорних спектрах виявлено два мультиплети нейтрального алюмінію – (1) і (6), та 12 мультиплетів іона алюмінію AlII. Однак лінії останніх бледуються більш яскравими лініями інших елементів [8]. Лінії AlII слабкі.

Літій (LiI). В спектрах яскравих метеорів може спостерігатися резонансна лінія $\lambda 6708 \text{ \AA}$ [8].

Калій (KI) і (KII). Ці лінії в межах доступної спостереження області метеорних спектрів дуже слабкі і зазвичай бледуються лініями заліза. Дуже чутливий дублет KI знаходиться в діапазоні поза $\lambda 7600 \text{ \AA}$ [8].

Молібден (MoI). Лінії молібдену (MoI) були виявлені в метеорних спектрах, але вони дуже слабкі і перекриваються лініями заліза [2].

Стронцій (Sr), цирконій (Zr), скандій (Sc), барій (Ba). Емісійні лінії цих хімічних елементів є рідкісними в спектрах метеорів.

Ванадій(VI) і (VII), мідь(Cu), цинк(Zn). Ці лінії можуть бути виявлені в метеорних спектрах, але вони дуже слабкі і зазвичай бледуються лініями заліза [8].

Кремній (SiI). У різний час зареєстровано п'ять мультиплетів SiI: (2), (3), (10), (11), (27). Всі вони слабкі і ототожнення їх непевне. Але сильна лінія кремнію спостерігається близько $\lambda 3906 \text{ \AA}$. Проте впевнено ототожнюються мультиплети SiII, відкриті А.Н. Висотським і П. Міллманом в 1940 році [2]. Серед них помітне місце займає мультиплет SiII (2) $\lambda 6347\text{--}6371 \text{ \AA}$. Найбільш яскрава лінія цього мультиплета 6347 \AA зустрічається досить часто, причому не тільки у швидких метеорів. Часто вона спостерігається раніше, ніж лінії NaI D, CaII H і K та інші лінії з низькими потенціалами збудження, незважаючи на те, що потенціал збудження у неї

12.78 eV (потенціал іонізації SiI – 8.11 eV). Спостерігається ще одна лінія SiII на $\lambda 6371 \text{ \AA}$ [8].

Вуглець (C), фосфор (P), сірка(S). Емісії вуглецю, фосфору і сірки є слабкими в метеорних спектрах. Вони зазвичай можуть бути виявлені у вторинному спектрі, що формується під час спалаху при високих температурах [8].

Водень (H). Деякі автори відмічають присутність водневої серії Бальмера в метеорних спектрах. Лінія H_{α} була виявлена в 1953 році П. Міллманом [2]. Завдяки високому потенціалу іонізації ($E_1=10.15 \text{ eV}$) вони можуть належати вторинному спектру [8].

Азот (N). Нейтральний азот NI виявлено в 1952 році П. Міллманом [2] і зараз відомо 18 його мультиплетів. У 1961 році Я. Холлідей [2] знайшов кілька мультиплетів іона NII (зараз їх відомо 16). Лінії азоту знайдено тільки в спектрах швидких метеорів, а також у спалахах. Слід зазначити високі потенціали збудження ліній NII: від 20.6 до 23.1 eV (є одна сумнівна лінія з верхнім потенціалом 27.8 eV). Це найвищі потенціали збудження в метеорних спектрах. Однак основні азотні емісії представлені не у вигляді атомарних ліній, а у вигляді молекулярних смуг.

Кисень (O). Емісія нейтрального кисню OI була зафіксована П. Міллманом в 1950 році [2]. У метеорних спектрах спостерігається 32 мультиплетів OI, з яких найбільш сильні інфрачервоні мультиплети (1) і (4) та зелений мультиплет (12). Випромінювання OI спостерігається переважно у швидких метеорів, у яких енергія збудження досить велика. Цікава поведінка інфрачервоного триплету O (1) $\lambda 7774 \text{ \AA}$, який, так само як і SiII (2), часто з'являється раніше всіх інших ліній, хоча його потенціал збудження дорівнює 10.69 eV [2]. Можливе пояснення цього полягає в тому, що випромінює атмосферний кисень, в якому порівняно багато атомів, збуджених на верхньому рівні. Я. Холлідей [2] виявив в 1961 році в спектрах швидких метеорів два перших мультиплета іонізованого кисню OII. В даний час відомо 17 мультиплетів OII. Важливим є відкриття Я. Холлідеєм в 1958 р. в

спектрі метеорів забороненої лінії полярних сьйв OI (3F) $\lambda 5577 \text{ \AA}$. Вона особливо виділяється в спектрах “хвостів” метеорів [2].

Молекули в метеорних спектрах можуть бути виявлені двома шляхами. Внаслідок відносно малої роздільної здатності широкі молекулярні смуги спостерігаються як результат неперервного випромінювання. З іншого боку, відомі максимуми молекулярних смуг можуть бути схожими на лінії атомів, які розширені в одному напрямі [8].

Молекулярний азот (N_2). Смуги молекулярного азоту N_2 були виявлені вперше в 1955 році А. Куком і П. Міллманом [2]. Вони належать першій і другій позитивним системам. Потенціали збудження їх в порівнянні з атомарними лініями азоту невисокі: 7.4 і 11.0 еВ. Смуги N_2 є найяскравішими в спектрах метеорів і серед молекулярних компонентів N_2 займає перше місце за інтенсивністю випромінювання. Але якщо смуга $N_2(2+)$ часто буває слабка або невидима, то $N_2(1+)$ присутня майже завжди, часом домінуючи над усіма лініями.

Присутність іона молекулярного азоту N_2^+ була запідозрена в спектрах слабких метеорів на екрані ортikonу в 1971 році А. Куком, П. Міллманом і К. Хеменуєєм [2]. Його присутність було підтверджено в 1977 році С. Мухамедназаровим [2] в спектрах метеорів 3–5^m, отриманих з телевізійною оптикою в астрофізичній лабораторії Фізико-технічного інституту АН Туркменської РСР.

Смуги 1–ї позитивної системи N_2 дуже сильні у багатьох метеорних спектрах. Потенціал іонізації відносно високий ($E_1=6 \text{ eV}$).

FeO. Система смуг молекули FeO може спостерігатися в жовтій та оранжевій областях спектра. І якщо дана молекулярна смуга присутня в метеорному спектрі, то вона спостерігається вздовж всього шляху метеора.

MgO. Сильна система смуг MgO ($\lambda 4980\text{--}5007 \text{ \AA}$) може спостерігатися в області кількох яскравих атомних ліній.

C₂. Ці смуги були виявлені в кількох метеорних спектрах [8].

CN. Яскрава емісійна смуга CN ($\lambda 3883 \text{ \AA}$) інколи спостерігається серед яскравих ліній заліза.

CaO і AlO. Молекулярні смуги цих молекул були виявлені в спектрі метеора Бенешов [8].

1.2. Спектри метеорів потоку Персеїди.

Персеїди – найбільший метеорний потік в північній півкулі небесної сфери. Період його активності триває з 17 липня до 24 серпня кожного року. Максимум активності метеорів потоку Персеїди зазвичай спостерігається 12–13 серпня. Координати радіанта: $\alpha = 48^\circ$, $\delta = +58^\circ$. Спостережувана швидкість становить 60 км/с [54]. Номер в базі даних за метеорами – 00007, код – PER. Зенітне годинне число (тобто розрахована кількість метеорів 6.5 зоряної величини за годину в зеніті) метеорів потоку Персеїди складає 100 [55]. За даними Міжнародної метеорної організації у 2016 році під час максимуму потоку Персеїди спостерігалось до 250 метеорів за годину (Рис. 1.1) [56].

Метеорний потік Персеїди було відкрито в 1834 році [57]. Родоначальником потоку вважається комета 109P/Свіфта–Тутля, відкрита 16 липня 1862 року Льюїсом Свіфтом і Хорасом П. Туттлем [58]. Параметри орбіти комети на епоху 2448960.5 (4 грудня 1992 року) є такими [59]:

- ексцентриситет (e) – 0.963589;
- велика піввісь (a) – 26.316943 а. о.;
- перигелій (q) – 0.958220 а. о.;
- афелій (Q) – 51.675660 а.о.;
- період обертання (P) – 135.0 років;
- кут нахилу орбіти (i) – 113.4265° .

Останнє проходження кометою перигелію відбулося 12 грудня 1992 року, а наступне буде 12 липня 2126 року.

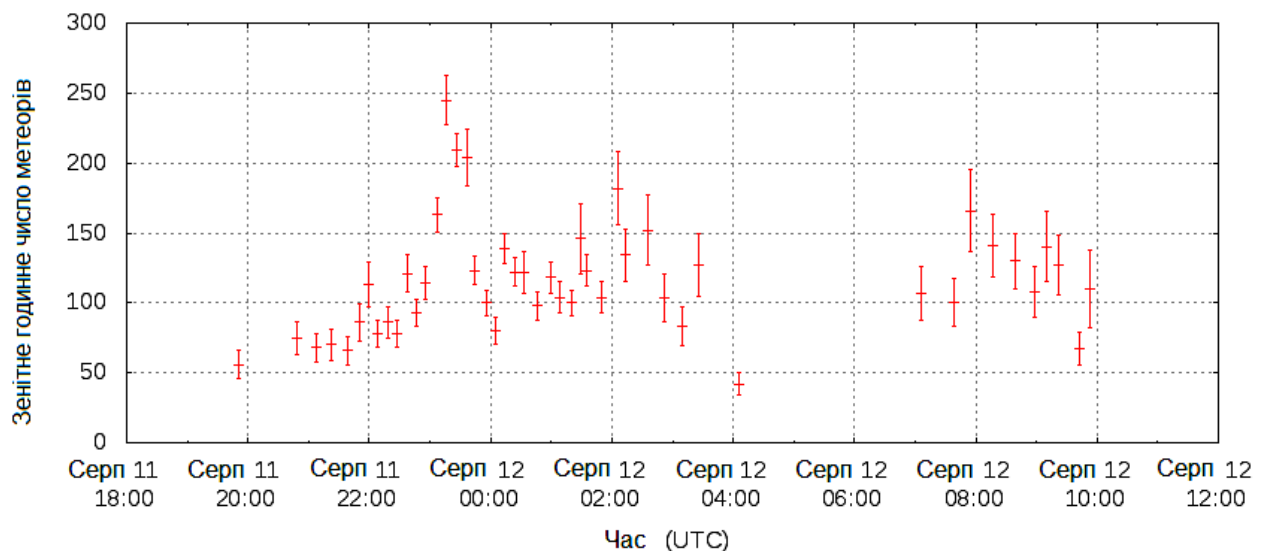


Рис. 1.1. Зенітне годинне число метеорів 11–12 серпня 2016 року за даними Міжнародної метеорної організації [56].

Завдяки своїм характеристикам Персеїди є одним з найбільш придатних об'єктів для метеорних спостережень, включаючи спектроскопію. Час від часу спостерігаються дуже яскраві метеори. Якщо зафіксувати таке явище фотографічною камерою, яка оснащена оптичною ґраткою, то можна досить детально дослідити його спектр.

Я. Холлідей [60] опублікував найбільш повний перелік емісійних ліній, що були ідентифіковані у спектрах метеорів потоку Персеїди. Використовуючи різні фотографічні емульсії і камери з дисперсією 50–120 Å/мм, він ототожнив 229 емісій в області $\lambda 3680\text{--}8710\text{ Å}$ в п'яти спектрах. Пізніше Я. Холлідей [61], досліджуючи спектри метеорів потоків Ліриди і Персеїди, ідентифікував лінії на довжинах хвиль, менших $\lambda 3100\text{ Å}$. У. Харві [62] також склав список емісійних ліній в ультрафіолетовій частині спектра метеорів потоку Персеїди. А. Кук [63] здійснив фотометричне калібрування двох спектрограм метеорів потоку Персеїди і представив інтенсивності спектральних ліній в абсолютних одиницях. Перераховані роботи були виконані для дуже яскравих метеорів, що мали зоряну величину близько -10^m . Спектри слабких метеорів Персеїд (близько 0^m) спостерігалися з меншою дисперсією за допомогою телевізійної техніки [64–65].

Результати всіх фотографічних спектральних спостережень давали подібні спектри метеорів потоку Персеїди. Приклад такого спектра представлено на Рис.1.2. Найяскравішими емісіями є H і K лінії іонізованого кальцію з довжинами хвиль $\lambda 3934$ і $\lambda 3968$ Å, відповідно. Яскравими є лінії іонізованого магнію близько $\lambda 4481$ Å, триплету нейтрального магнію біля $\lambda 5167$ – 5184 Å, дублету нейтрального натрію $\lambda 5890$ – 5896 Å і триплету нейтрального оксигену $\lambda 7772$ – 7775 Å. У спектрах присутня велика кількість ліній нейтрального заліза. Також ідентифіковано атоми та іони HI, NI, NII, AlI, SiII, CaI, CrI, MnI, FeII, NiI і SrII. Можливо, присутні лінії OII, SiI, SrI, BaI і BaII, але їх ототожнення невпевнене. Підтверджено присутність смуг першої позитивної системи молекулярного азоту N₂ [54].



Рис. 1.2. Спектр метеора DMS–85016 [54], що належав до потоку Персеїди. Напрямок траєкторії метеора на зображенні з верхнього лівого кута до нижнього правого кута. Праворуч зафіксовано нульовий порядок. Яскраві лінії синьої частини спектра відносяться до другого порядку (ліворуч).

У слабких метеорів лінії CaII слабші порівняно з лініями OI [66]. У телевізійних спектрах лінії CaII не є домінуючими (якщо вони взагалі присутні), тоді як лінії OI і MgI є яскравими. У яскравих метеорів виявлено,

що інтенсивність ліній CaII у порівнянні з лініями OI зростає вздовж траєкторії і особливо сильними вони стають під час спалаху [60, 66]. А. Кук [63] зазначив, що інтенсивність ліній NI і SiI також зростає відносно інших ліній в спектрі в нижній частині траєкторії метеора.

Ї. Боровічка та Ї. Бочек [65] спостерігали спалах метеора потоку Персеїди з телевізійною камерою. Всі метеорні емісії під час спалаху були набагато сильнішими, ніж емісії атмосферного походження, такі як OI і NI. Інший ефект у спалахах метеорів потоку Персеїди спостерігався Д. Расселом [67]: слабо збуджені лінії нейтрального заліза досягали максимальних інтенсивностей на найнижчих висотах, що узгоджується з іншими лініями.

В загальному випадку, спектри метеорів потоку Персеїди подібні до спектрів інших швидких метеорів [54]. Наприклад, в спектрах метеорів потоку Оріоніди, що мають швидкість 67 км/с, спостерігаються такі ж лінії і подібна еволюція спектра вздовж траєкторії як і в метеорах Персеїд [68]. Оскільки існує більше хороших якісних спектрів метеорів потоку Персеїди, ніж метеорних спектрів інших потоків, то спектри Персеїд можна використовувати для вивчення формування спектрів швидких метеорів і для їхньої інтерпретації. Можливі невеликі відмінності у спектрах дозволяють виявити можливі хімічні чи структурні відмінності серед метеороїдів різних потоків [54].

Кількісного аналізу спектрів метеорів потоку Персеїди в літературі набагато менше, ніж якісного опису. У. Харві [62] у своєму аналізі припускав бальцманівський розподіл населеності рівнів і оптично тонке випромінювання. Він вирахував ефективну температуру випромінювання зі співвідношення інтенсивностей для пар ліній. Температура близько 3000 К була отримана для ліній FeI в спектрі метеора потоку Персеїди, але досить різні температури були отримані для трьох інших атомів. Елементний склад даного метеора був представлений У. Харві пізніше [69]. Однак, припущення про оптично тонке випромінювання є непридатним для метеорів, яскравіших

за -9^m [11] і використаний У. Харві метод не може розглядатися як джерело достовірних результатів.

Лише кілька ліній були виміряні у спектрах метеорів Персеїд і проаналізовані Г. Кохіровою [70]. Вона удосконалила метод У. Харві, використовуючи співвідношення інтенсивностей ліній різних елементів і враховуючи хімічний склад. Однак, іонізація елементів, таких як натрій, не бралася до уваги іотримані температури іонізації у широкому діапазоні 1500–12000 К не мають фізичного сенсу [54].

Новий метод аналізу метеорних спектрів був розвинений Ї. Боровічкою [11] для дослідження слабких метеорних спалахів. Було отримано синтетичний спектр і три параметри – температура збудження, густина різних атомів і ефективний переріз об'єму випромінення – були визначені методом найменших квадратів. До уваги було взято метод кривих росту емісійних ліній З. Цеплехи [71], самопоглинання і припускався больцманівський розподіл населеності рівнів. Було показано, що спектр може бути коректно інтерпретовано, якщо допустити існування двох компонентів з різними температурами [54].

Із аналізу спектрів боліда і ряду метеорів Ї. Боровічка [72] встановив, що голова метеора складається з двох частин, які не можна розрізнити просторово, але вони показують різні спектри, названі основний і вторинний, які відповідають зовсім різним температурам. Для всіх швидкостей більша частина випромінюючого газу навколо метеороїда має температуру близько 4000 К і показує основний спектр. Частина газу має температуру близько 10 000 К і також майже незалежна від швидкості. Проте не виявлено значних відмінностей в хімічному складі між цими двома частинами. Основний спектр містить емісійні лінії нейтральних атомів Na, Mg, Fe, Ca, Cr, Mn, Al та іонізований Ca. У вторинному спектрі більшість металів іонізовані й переважають лінії іонізованих Ca, Mg, Si, Fe і нейтральних O, N, H, які мають високий потенціал іонізації. Головний результат полягає в тому, що відношення маси газу, який спричиняє утворення основного і вторинного

спектрів, відповідно m_1/m_2 , сильно залежить від швидкості метеора. Це відношення становило 3000 для повільних метеорів (17 км/с) і зменшувалося до 15 для метеорів потоку Оріоніди (67 км/с). Різке відношення маси газу первинного і вторинного компонентів є основним фактором, який відрізняє спектри повільних і швидких метеорів. Можливо, що вторинний компонент пов'язаний з ударною хвилею, що формується перед метеороїдом. Аналіз І. Боровічки [72] обмежений дослідженнями тільки чотирьох метеорів.

1.3. Класифікація спектрів метеорів.

Спектр метеора представляє собою сукупність емісійних ліній і слабкий за інтенсивністю неперервний спектр. Якісний аналіз спектрів полягає у визначенні розподілу енергії з довжиною хвилі, визначенні довжин хвиль і ототожненні ліній хімічних елементів, що входять до складу метеороїда, а також навколишньої атмосфери.

Наприкінці XIX століття А.С. Гершель уперше випадково спостерігав спектр метеора, що викликало в нього інтерес до вивчення метеорних явищ, і, як наслідок, організації візуальних спостережень. Хоча візуальні спостереження метеорів надзвичайно складні, А.С. Гершель, а потім А. Секкі, Д. Браунінг, Н. Конколлі, провівши цілі серії таких спостережень, зареєстрували велику кількість спектрів і точно ототожнили в них жовту D-лінію натрію і зелений триплет магнію, а також численні лінії у синьо-фіолетовій частині спектру. Ініціатор першої програми спектрографування метеорів С.М. Блажко [73], ймовірно, ототожнив лінії нейтрального кальцію, іонізованого дублету кальцію H і K CaII та нейтрального магнію.

Класифікація Міллмана. До 1940 року за результатами систематичних спостережень згідно програми, проведеної під керівництвом П. Міллмана у США та Канаді, у фотографічних спектрах метеорів ототожнено й установлено наявність таких елементів як Si, Al, Ca, Cr, Mg, Fe, Ni, Na, Mn. Аналіз спостережень дозволив П. Міллману [74] розробити класифікацію фотографічних метеорних спектрів, що крім опису спектра має

ще й певний фізичний зміст. Результати фотографічних спостережень спектрів метеорів показали, що тип спектра, а отже, і хімічний склад метеороїдів, пов'язаний з потоком, до якого вони належать. Наявні спектри П. Міллман розподілив за характером світіння ліній CaII і виділив 4 типи, позначені ним “X”, “B”, “Z” і “W”:

“X” – спектри метеорів з інтенсивними лініями NaI ($\lambda 5893 \text{ \AA}$) і MgI ($\lambda 5175 \text{ \AA}$), а лінії H і K CaII відсутні;

“B” – спектри метеорів з найбільш інтенсивними лініями H і K CaII;

“Z” – спектри метеорів з найбільш інтенсивними лініями FeI і CrI у жовто-зеленій та синьо-фіолетовій частинах спектру;

“W” – змішаний тип спектрів метеорів, у яких присутні ознаки перших трьох типів.

Типи спектрів “B” і “X” характерні для залізо-кам'яних метеорних тіл, спектри “Z” і “W” спостерігаються у більшості залізних метеороїдів.

Класифікація спектрів метеорів за приналежністю до потоку.

П. Міллман [74], А. Кук [75], а пізніше Я. Райхл [76] проаналізували залежність спектра метеора від потоку, до якого метеор належить. До типу “Y” в основному відносяться спектри метеорів, що належать високошвидкісним метеорам потоків Персеїди, Оріоніди, Леоніди. Спектри низькошвидкісних метеорів потоків Гемініди і Драконіди належать до типу “X”. Спектри типу “Z” зустрічаються найчастіше у спорадичних метеорів. Ще С.М. Блажко у 1907 році [73] вказав на можливість зміни спектра метеора, а потім П. Міллман [74], Я. Райхль [76], В. Смирнов [3] та ін. відзначали зміну типу спектра від типу “X” або “Z” до “B” у того самого метеора при практично незмінній швидкості. Наприклад, зустрічаються слабкі метеори потоку Персеїди, у яких відсутні лінії H і K CaII, але під час спалахів повільних болідів можуть з'явитися ці лінії іонізованого Ca.

Класифікація Мухамедназарова. Оскільки в телевізійних спектрограмах лінії MgI, FeI, CrI, H і K CaII дуже слабкі, через низьку спектральну чутливість апаратури в цій області спектру (за винятком лінії

NaI $\lambda 5893 \text{ \AA}$), важко класифікувати ці метеори за ознаками Міллмана. Тому С. Мухамедназаров [77] у своїй роботі розділив отримані спектри метеорів на 5 класів:

- I – спектри, у яких поряд зі звичайними емісійними лініями спостерігається випромінювання молекулярних смуг у всьому діапазоні довжин хвиль;
- II – спектри, у яких крім деталей, спостережуваних у класі I, появляється емісія зеленої (забороненої) лінії кисню $\lambda 5577 \text{ \AA}$;
- III – спектри, у яких переважають емісії атомів та іонів, а молекулярні смуги слабо виражені;
- IV – спектри, у яких переважає неперервний спектр (континуум);
- V – спектри порівняно слабких метеорів, у яких спостерігається тільки одна або дві атомарні лінії (зазвичай це лінії NaI і MgI).

С. Мухамедназаров [77] отримав довжини хвиль молекулярних смуг N_2 , FeO, CN, а також смуг азоту N_2 . Г.І. Кохірова [78] ототожнила лінії MgI, FeI, NaI, CaI, OI, NI, AlI, CaII, FeII.

1.4. Порівняння спектрів метеорів зі спектрами комет.

Питання про зв'язок метеорних тіл з іншими тілами Сонячної системи, зокрема з кометами, астероїдами та метеоритами, розглядається вже давно. Результати перших досліджень, що підтверджують такий зв'язок, описані в роботах [1, 2, 79].

У 1862 році Джованні Скіапареллі помітив схожість орбіт у комети 1862 III і метеорного потоку Персеїди. У 1866 році було виявлено схожість в орбітах комети 1866 I і метеорного потоку Леоніди. Щоб не чекати появи нових комет, австрійський вчений Е. Вейсс у 1867 році вирішив обернену задачу. За елементами орбіти комет він порахував елементи орбіти “кометних” радіантів і порівняв їх зі спостережними. Так було виявлено зв'язок потоку Ліриди з кометою 1861 I, комети Бієли з радіантом в сузір'ї Андромеди [1]. На сьогодні встановлено зв'язок метеорних потоків із 46

кометами, згідно переліку в базі даних [80], для решти 910 потоків поки що не ідентифіковано батьківські тіла [80].

Однак не лише подібність в елементах орбіт комет і метеорних роїв вказує на їх зв'язок. Іншим критерієм виступають їхні спектри. Однією із задач кількісного аналізу спектрів метеорів є визначення хімічного складу метеороїдів з метою порівняння його зі складом метеоритів і комет. Це не проста задача, тим не менше, були зроблені спроби отримати оцінки вмісту хімічних елементів в метеороїдах на основі аналізу метеорних спектрів [1, 11].

Спектри комет вказують на присутність в кометних атмосферах трьох компонент – нейтрального газу, пилових частинок та іонізованого газу (плазми). Кожна з компонент має своє характерне випромінювання, яке виникає під дією сонячної радіації. Спектри комет складаються з неперервного спектру (континууму) і емісійних ліній молекулярних смуг. В спектрах дуже яскравих і близьких до Сонця комет виявлені численні лінії металів, що підтверджує ідею про присутність в ядрах не тільки крижаних, а й метеоритних мас. Неперервний спектр обумовлений розсіянням сонячного світла ядром комети, пиловими частинками, молекулами кометної атмосфери і вільними електронами. Основний механізм світіння кометних газів – резонансна флюоресценція під дією сонячного випромінювання. Причому самі молекули з'являються в результаті розпаду і дисоціації первинних “батьківських” молекул.

За результатами спектральних спостережень комет в них було виявлено атоми, молекули, іони, пилові частинки [58, дослідження Rosetta]:

Атоми – H, C, [OI], Na, Si, P, S, Ar, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Kr, Xe.

Молекули – H₂O, OH, N₂, NH, NH₂, O₂, C₂, C₃, CN, CH, CH₄, Co, Co₂, CS, H₂S, HF, HCl, HBr, HCN, CH₃CN, CH₃NH₂, H₂CO, HCO, HNCO, HCONH₂, C₂H₅NH₂, C₂H₅CHO, CH₂(OH)CH₂(OH), CH₂OHCHO, CH₃OH, CH₃CHO, CH₃CONH₂, CH₃NCO, CH₃CH₂NH₂, CH₃NH₂, CH₃COCH₃, CH₂NH₂COOH.

Іони – H_2O^+ , H_3O^+ , OH^+ , CO^+ , CO_2^+ , CH^+ , CN^+ , N_2^+ .

Основною легкою складовою ядер комет є водяний лід. При наближенні типового ядра комети до Сонця на відстань ~ 3 а.о. рівень сублімації водяного льоду стає достатнім для утворення газової коми та виносу пилових частинок, з яких формуються пилові коми та хвости. В основному, такий сценарій справджується для більшості комет. І все ж в реальності виявилось, що коми та хвости в значній кількості комет спостерігаються і на більших відстанях від Сонця, перевищуючи інколи 10 а.о. Можливим поясненням розвитку активності ядер на таких відстанях від Сонця може бути сублімація більш легких льодів, ніж водяний, а саме льоди CO_2 та CO . Дослідження комет свідчать, що вміст льодів CO_2 по відношенню до льодів H_2O в ядрах комет може становити 3–30 %, тоді як співвідношення вмісту $\text{CO}/\text{H}_2\text{O}$ в ядрах комет змінюється в діапазоні від $\sim 0.4\%$ до 30%.

Спектр комети, яка знаходиться на далекій відстані від Сонця, в більшості випадків є неперервним. Цей спектр утворюється в результаті відбиття сонячного світла від пилових частинок і/або ядра комети. На відстані близько 3–4 а.о. від Сонця в спектрах комет проявляються емісійні смуги молекул CN , C_2 , C_3 . Проте більшість емісій реєструються в спектрі комети, коли вона опиняється ще ближче до Сонця. Під час проходження комети через сонячну корону, поблизу її ядра спостерігаються лінії різних металів: заліза Fe , нікелю Ni , міді Cu , кобальту Co , хрому Cr , марганцю Mn , ванадію V , характерні для спектрів метеорів, що вказує на зв'язок між ядрами комет і метеороїдами, а отже, на спільність походження цієї групи малих тіл Сонячної системи [58]. Вміст метеоритної речовини в ядрах комет Ф. Уіпл оцінював в одну третину.

Для вивчення складу космічної речовини частинки з астероїдів і комет були доставлені космічними апаратами на Землю для подальшого їх дослідження в лабораторіях.

9 травня 2003 року було запущено космічний апарат Hayabusa Японського агентства аерокосмічних досліджень, ціллю якого був астероїд

Ітокава. Капсулу зі зразками речовини астероїда було успішно доставлено на Землю. Дослідження показали, що значна частина зібраних пилинок складається з олівіну, а сам астероїд Ітокава можна вважати джерелом звичайних хондритів [81].

7 лютого 1999 року стартувала космічна місія Stardust до комети 81P/Wild 2. Stardust стала першою американською автоматичною міжпланетною станцією, спеціально створеною для дослідження комети і доставки кометної речовини на Землю. 132 комірочки капсули апарату, що мав повернутися на Землю, були заповнені силіконовим аерогелем. Ця речовина характеризується наднизькою густиною, тому аерогель здатний загальмувати частинки, що летять з великою швидкістю, без їх перегріву, щоб запобігти руйнуванню органічних молекул, якщо вони виявляться на цих частинках. 15 січня 2006 року капсула зі зразками кометної речовини повернулася на Землю. Після відкриття капсули стало ясно, що місія виконана успішно – було захоплено близько 30 великих і дрібних частинок кометної речовини [82].

Для того, щоб дослідити зв'язок між кометою 81P/Wild 2 і речовиною в примітивних метеоритах, сім кометних частинок з розмірами від 5 до 15 мкм в діаметрі було проаналізовано на вміст в них ізотопу оксигену. Результати досліджень показали схожість частинок з хондритами [83].

2 березня 2004 року було запущено космічний апарат Rosetta до ядра комети 67P/Чурюмова–Герасименко з метою її всебічного дослідження вдовж орбіти навколо Сонця [84]. 12 листопада 2014 року відбулася перша в історії людства успішна посадка космічного модуля Philae на поверхню кометного ядра. Отримано велику кількість даних про комету. Детально досліджено її хімічний склад і відкрито багато нових хімічних елементів та сполук, зокрема дуже складні органічні сполуки.

Відомо, що примітивні метеорити, міжпланетний пил і комети містять складну органіку. Вперше більше сотні амінокислот було знайдено в метеоритах Murchison і Murrey, причому всі вони виявилися лівосторонніми

[85, 86]. Як відомо, всі органічні сполуки на Землі є лівосторонніми. Вперше амінокислоту гліцин $\text{CH}_2\text{NH}_2\text{COOH}$, яка входить до складу багатьох білків і біологічно активних сполук, було виявлено у пилинках, що були взяті біля комети Wild 2 за допомогою космічної місії Stardust і повернуто на Землю в 2006 році. В атмосфері комети Чурюмова–Герасименко також було зареєстровано амінокислоту гліцин. Ці відкриття мають надзвичайно велике значення для вирішення такої фундаментальної проблеми, як виникнення життя на Землі.

За допомогою приладу COSAC в кометі Чурюмова–Герасименко було зареєстровано ще багато органічних сполук: метан CH_4 , ціаніста кислота HCN , чадний газ CO , метиламін CH_3NH_2 , ацетонітрил CH_3CN , ізоціанова кислота HNCO , ацетальдегід (оцтовий альдегід) CH_3CHO , формамід HCONH_2 , етиламін $\text{C}_2\text{H}_5\text{NH}_2$, метілізоціан CH_3NCO , CH_3COCH_3 ацетон, пропаналь $\text{C}_2\text{H}_5\text{CHO}$, ацетамід CH_3CONH_2 , гліколевий альдегід CH_2OHCHO , етиленгліколь $\text{CH}_2(\text{OH})\text{CH}_2(\text{OH})$, причому вперше в кометах були виявлені такі складні молекули як ацетон, ацетамід, метілізоціанат і пропаналь [84].

Висновки до розділу 1.

1. Дослідження та вивчення спектрів метеорних явищ чітко можна поділити на три етапи. Перший етап – від часу першого візуального спостереження О.С. Гершелем (1864 рік) спектра метеора до середини 90-х років ХХ століття. Цей час можна вважати найактивнішим періодом в історії досліджень метеорних явищ взагалі, і метеорних спектрів зокрема. Відбулася велика кількість експедицій, проведено численні ночі спостережень, зібрано величезну кількість спостережного матеріалу, написано багато наукових робіт, які лягли в основу сучасних досліджень метеорів. Другий етап – це 1990-ті роки – етап затишшя в метеорній астрономії. Технічні засоби для спостережень потребують вдосконалення, а разом з тим і сама методика спостережень і обробки спостережного матеріалу. І третій етап – від початку

2000-х років і до сьогодні. Йде відновлення метеорних спостережень. Відбувається перехід на використання сучасних камер для спостережень і комп'ютерів, ПЗЗ-матриць замість фотоплатівок і фотоплівок. Розробляються нові методи обробки отриманого матеріалу. Акцент робиться на вдосконалення теорії, що пояснює фізико-хімічні процеси, що відбуваються під час метеорних явищ. Однак робота йде повільніше, порівняно з першим етапом.

2. В результаті досліджень декількох тисяч метеорних спектрів виявлено лінії емісій наступних хімічних елементів:

нейтральні атоми: FeI (329), CrI (65), NiI (54), CoI (48), TiI (38), OI (32), CaI (27), NI (18), MnI (18), MgI (12), NaI (11), CI (6), SiI (5), BaI (2), HI (1), AlI (1), LiI (1), KI (1), SrI (1), MoI (1);

іони: FeII (23), OII (17), NII (16), AlII (12), CrII (8), SiII (5), CaII (4), MgII (4), TiII (2), SrII (1), BaII (1);

молекули: N₂, CN, FeO, C₂, CH, MgO, CaO, AlO;

молекулярний іон: N₂⁺.

3. Всі фотографічні спостереження метеорів потоку Персеїди давали 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. Також ідентифіковано атоми та іони HI, NI, NII, AlII, SiII, CaI, CrI, MnI, FeII, NiI, SrII. Під сумнівом залишаються лінії OII, SiI, SrI, BaI і BaII. Підтверджена присутність емісійних смуг першої позитивної системи молекулярного азоту N₂.

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

двох кометах також знайдено амінокислоту гліцин. І в спектрах комет, і в спектрах метеорів зареєстровано емісії деяких молекул. Можливо, присутність одних і тих же хімічних речовин є ще одним підтвердженням того, що комети є одним із джерел метеорних тіл.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ МЕТЕОРІВ ТА ЇХ ОБРОБКИ

Спостерігаючи метеорні явища, ми не знаємо наперед точне місце прольоту метеора в атмосфері Землі. Відомою може бути лише ділянка неба, наприклад, під час спостереження метеорних потоків. Для спорадичних метеорів траєкторія ніколи не відома наперед. Саме це ускладнює процес отримання спектрів метеорів. Для отримання спостережного матеріалу для такого типу метеорів необхідні тривалі спостереження.

Процес отримання спектрів метеорів передбачає використання дисперсійних оптичних приладів. До них належать оптична призма та дифракційна ґратка. Випадково було отримано спектр метеора щілинним спектрографом [87]. Однак даний метод не використовується в метеорній спектроскопії. Важливим етапом під час спектральних спостережень метеорів є фіксування спектрів метеорних явищ. Зараз для цього використовують комп'ютерні технології, але довгий час використовували фотоплівки та фотопластинки. З досліджуваних в роботі спектрів метеорів три було зафіксовано на фотоплівці, а чотири – на фотопластинках.

2.1. Астрономічні інструменти для спостережень метеорів.

Оптичні прилади, що використовуються для дослідження метеорних явищ, повинні задовольняти деяким вимогам [1].

Ефективність метеорного патруля. Об'єктиви, які використовуються для спостережень, повинні бути достатньо ефективними, що, за інших рівних умов, визначається діаметром діючого отвору об'єктива (D) і фокусною відстанню об'єктива (F). Об'єктиви повинні бути досить ширококутними, світлосильними та з високою роздільною здатністю. Застосовувані під час зйомки метеорів фотографічні матеріали або електронні приймачі випромінювання (ЕОП підсилювачі, ПЗЗ та КМОН матриці) повинні мати високу чутливість у широкому діапазоні довжин хвиль.

Для спостережень метеорів часто використовують звичайні фотографічні об'єктиви, крім деяких винятків, наприклад, удосконалена конструкція

фотографічної камери Бекер Супер-Шмідт у Гарвардській обсерваторії, або метеорний телевізійний патруль на основі оптичної системи Шмідта в НДІ “Астрономічна обсерваторія” ОНУ імені І.І. Мечникова в Одесі [88]. Тому типові об'єктиви необхідно підбирати з точки зору їх ефективності. Це питання неодноразово піднімалося в наукових публікаціях [89–94]. Аналіз результатів у відповідних публікаціях показує неоднозначність у виборі величини ефективності. Раніше вважалося, що у випадку фотографування точкових джерел (зір) ефективність об'єктива прийнято вважати пропорційною D^2 , а протяжних об'єктів, до яких відносяться метеори, пропорційною D^2/F^2 . В деяких випадках [89–91] автори приходили до висновку, що ефективність об'єктива для спостереження метеорів необхідно оцінювати як пропорційну D^2/F .

У будь-якому разі, оцінюючи ефективність, необхідно враховувати такий параметр як розмір поля зору оптичної системи й чутливість фотоемульсії або коефіцієнт підсилення застосовуваного приймача випромінювання (ЕОП, ПЗЗ або КМОН-детектор). Як видно з наведених вище співвідношень, збільшення роздільної здатності за рахунок збільшення фокусної відстані неминуче приводить до погіршення світлосили (проникної здатності) оптичної системи й навпаки. У роботі одеських астрономів [94] було зроблено висновок, що застосування авторами метеорного патруля на основі телескопа системи Шмідта (діаметр корекційної пластини 17 см, фокусна відстань 53.4 см) у поєднанні з КМОН-приймачем збільшило ефективність оптичної системи на два порядки порівняно з фотографічним методом. При цьому поле зору метеорного патруля становило близько одного градуса, що суттєво відрізняється від зазвичай застосовуваних короткофокусних об'єктивів, які забезпечують поле зору в десятки градусів. Порівняння базувалося на напівемпіричній формулі, запропонованій у монографії [95]:

$$N = 1.15 \times 10^{-7} p^2 t D^{2.87} \left(\frac{D}{F} \right)^{0.21},$$

де N – число зареєстрованих метеорів, D – діаметр об'єктива, F – фокусна відстань об'єктива в см, p – поле зору в градусах, t – час патрулювання в годинах.

Телевізійний метеорний патруль Одеської обсерваторії дозволяє фіксувати метеори слабші 10^m , тоді як короткофокусні широкоформатні об'єктиви в поєднанні з такими приймачами випромінення як фотографічна емульсія, ПЗЗ або КМОН – яскравіші $3^m \div 7^m$.

Таким чином, в ефективності метеорного патруля роль світлосили не є визначальною, а залежить головним чином від розміру діаметра об'єктива та істотно залежить від чутливості приймача випромінення. При цьому необхідно, за можливості, вибирати об'єктиви з якомога більшою фокусною відстанню, щоб забезпечити відносно гарну роздільну здатність.

Необхідно відзначити, що незважаючи на невисоку чутливість фотоемульсія має високу контрастність і дрібнозернистість, що визначає високу фотографічну роздільну здатність.

Ширококутність. Ефективність камери збільшується зі збільшенням її ширококутності. Проте яскравість зображення до країв падає, як $\cos^4 \omega$, де ω – кут між променем світла і оптичною віссю. Для оптимізації спостережень створюють патрулі з декількох камер.

Роздільна здатність. Під роздільною здатністю (ν) розуміють число пар білих і чорних штрихів на 1 мм (міра), які ще розрізняються об'єктивом як окремі. Для різних величин діафрагми роздільна здатність об'єктива різна. Як правило, вона мінімальна при повністю відкритому отворі діафрагми. Із закриттям діафрагми зменшуються залишкові аберації оптичної системи і роздільна здатність зростає. Але при малих світлових отворах (починаючи з величини діафрагми 11 мм) роздільна здатність знижується внаслідок впливу дифракції світла. Якщо оцінювати роздільну здатність об'єктива по фотографічному зображенню міри, то у такому випадку отримаємо фотографічну роздільну здатність, тобто до роздільної здатності об'єктива додається роздільна здатність фотографічної емульсії. Роздільна здатність

фотоемулсій не вище $\nu=60-70$ штрих/мм, що використовують оптики, створюючи об'єктиви, які стають неефективними при зменшенні зерна (зазвичай $\nu=30-50$ штрих/мм в центрі поля, 5–10 штрих/мм до країв). Розсіювання світла в фотоемулсії створює "круги розсіювання" діаметром близько $25\mu\text{m}$; два з них буде видно окремо при відстані між центрами $15\mu\text{m}$. Саме цей фактор обмежує роздільну здатність системи "об'єктив + фотоемулсія". Роздільна здатність для сучасних електронних камер обмежена розміром елемента зображення (пікселя), який частіше знаходиться в межах 5–15 мкм, що дає 35–100 штрих/мм.

Проникна здатність визначається граничною зоряною величиною зір середнього спектрального класу, яка ще може бути отримана в zenіті при фотографуванні даним об'єктивом.

Прозорість оптики залежить від втрат на поглинання і відбивання світла в лінзах. Оскільки відбивання впливає сильніше, то якщо покрити склошаром речовини з показником заломлення $n' = \sqrt{n}$ (для скла $n \sim 1.5$), то відбиті промені від скла і від шару інтерферуючи зникнуть. У цьому полягає "просвітлення" оптики, що практично зменшує втрати в 3–5 разів. Вплив поглинання сильніше проявляється для слабких об'єктів і швидко росте з віддаленням від центру негатива. Під час фотографування метеорів не слід використовувати багатолінзові об'єктиви.

Якість фотографічного зображення визначається правильністю передачі деталей, контрастністю і відсутністю фону. Незначний прогин плівки або перекис пластинки зводить нанівець всі переваги оптики і емулсії.

На якість зображень впливають аберації. П'ять аберацій третього порядку (сферична аберація, кома, астигматизм, кривизна поля і дисторсія) не підлягають повному усуненню в усіх системах – дзеркальних, лінзових і змішаних. Лінзові системи мають ще дві аберації – хроматизм положення і хроматизм збільшення. Якщо застосувати дві лінзи для усунення

хроматичної аберації, то вийде ахромат, якщо три – то апохромат. Якщо астигматизм по осі менше $0.005F$, то об'єктив з такою якістю є анастигматом; при виправленні тільки сферичної аберації і коми виходить апланат; анастигмат завжди є апланат. При дисторсії в кілька десятків мікрон об'єктив буде ортоскопічним. Першокласним є такий об'єктив, де фронт світлової хвилі спотворений не більше, ніж на $1/4 \lambda$ або $0.1 \mu\text{m}$ – умова Релея.

Досліджені в роботі фотографічні спектри метеорів були отримані 21 і 22 жовтня 1958 року та 10 серпня 1965 року за допомогою метеорних патрулів, розміщених в Ашхабадській астрофізичній лабораторії (Рис. 2.1) та на спостережній станції Крижанівка Одеської астрономічної обсерваторії (Рис. 2.2). Патруль встановлюють на нерухомій платформі, що полегшує обробку під час базисної зйомки, або на спільній полярній осі. Якщо використовувати широколопастний обтюратор з малим вирізом, то метеор вийде чітким, а час експозиції можна збільшити в 3–5 разів [1].

Метеорний патруль Ашхабадської астрофізичної лабораторії (Рис. 2.1) складався з 4-х камер з світлосилою 1:2 і фокусом $F=125\text{мм}$ з обтюратором, що давав на знімку метеора 150 штрихів в секунду, тривалістю по 2.5 мілісекунди кожен. Маркування часу, відмітка моменту прольоту метеора, перемотка плівки 18×24 см здійснювалася спостерігачем з пульту керування станцією [1].

Метеорний патруль спостережної станції Крижанівка Одеської астрономічної обсерваторії (Рис. 2.2.) складався з трьох аерофотокамер НАФА 3с/25 з об'єктивами “Уран-9”, дві з яких були оснащені репліками дифракційних ґраток 300 штрих/мм, а одна – 17-градусною об'єктивною призмою. Камери охоплювали значну частину неба, але за рахунок слабкої проникної здатності можна було фотографувати лише яскраві метеори, до 0^m [96]. Аналогічний метеорний патруль використовувався в свій час

для метеорних спостережень в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

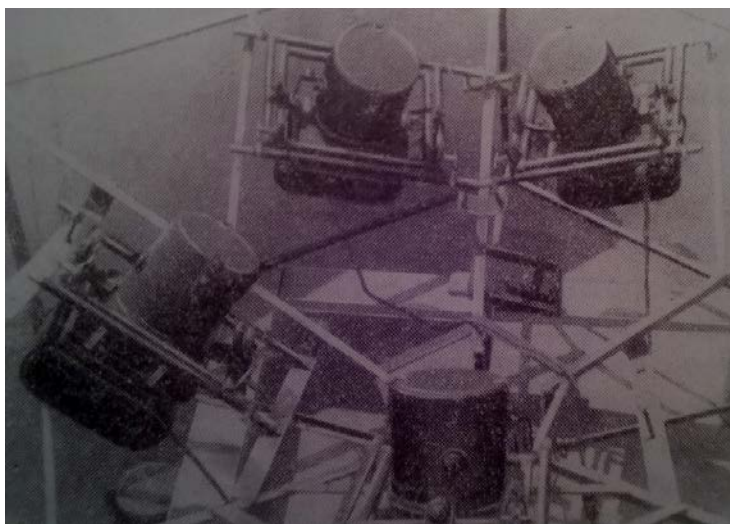


Рис. 2.1. Метеорний патруль Ашхабадської астрофізичної лабораторії (1956 рік) [1].

Частина фотографічних спектрів метеорів, які досліджувались в даній роботі, 2 і 27 серпня 2011 року, 20 лютого і 11 серпня 2012 року за допомогою метеорного патруля, розміщеного на Астрономічній обсерваторії Астрономічного інституту Академії наук Чеської Республіки в м. Одржейов (Рис. 2.3).

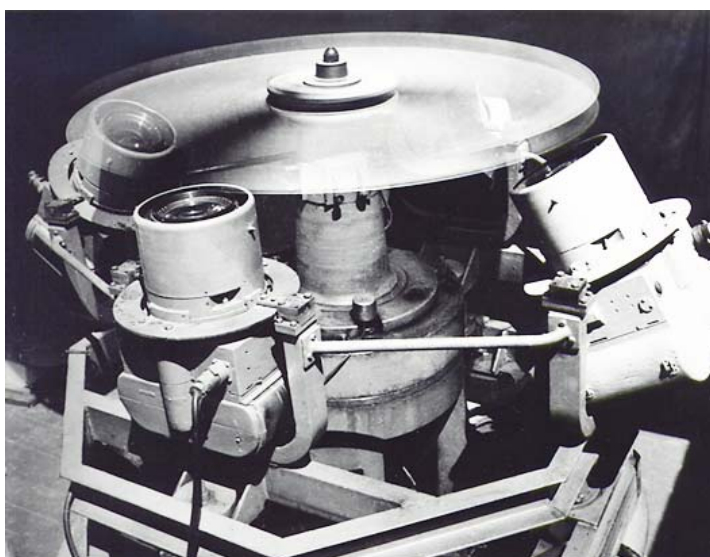


Рис. 2.2. Метеорний патруль (1964 рік) спостережної станції Крижанівка Одеської астрономічної обсерваторії (пункт №17 міжнародної мережі GPS) [3].



Рис. 2.3. Метеорний патруль Астрономічної обсерваторії Астрономічного інституту Академії наук Чеської Республіки в м. Ондржейов. Використовуються камери Tessar (світлосила 1:4.5; $F=360$ мм) [19].

Інформація про метеори отримується із оптичних та радіолокаційних спостережень [97–100]. Оптичні спостереження, в свою чергу, за типом апаратури поділяються на фотографічні, телевізійні та відео спостереження. Класичні фотографічні спостереження [101–104], що дозволяли спостерігати лише яскраві метеори до 0^m , на сьогодні практично не використовуються, за винятком Європейської болідної мережі [105].

У середині ХХ століття реєстрацію метеорів, недоступних фотографічному методу, почали проводити за допомогою телевізійної техніки, основаної на попередньому підсиленні сигналу. Так, установивши електронно-оптичний перетворювач (ЕОП) перед передавальною трубкою (суперортиконом) можна одержати підсилення сигналу в 1000–10000 разів при високій контрастності. Але є ряд недоліків таких систем: геометричні спотворення зображення (результат нелінійності розгортки й дисторсії ЕОП),

високий рівень шумів, низька роздільна здатність ЕОП, інерційність згасання зображення та ін.

Телевізійні спостереження, які було започатковано в 70–80-х роках, використовували високочутливі аналогові передавальні трубки типу ізокон (суперізокон), які на сьогодні більше не виготовляються. Вони дозволяли реєструвати метеори до 6^m , а зараз використовуються лише епізодично [106, 107].

Найбільш поширеним типом спостережень в оптичному діапазоні зараз є відео спостереження (метеори до $1-2^m$) [108], які використовують ПЗЗ-матриці або КМОН-детектори (використовуються у так званих CCTV-камерах) з автоматичним вводом даних в комп'ютер. Причому передача даних від матриці до комп'ютера може здійснюватись як аналоговим шляхом у вигляді відеосигналу та оцифровуватися за допомогою АЦП, так і безпосередньо в цифровому вигляді.

Будь-які панорамні спостереження, як фотографічні так і відео, дозволяють вирішити проблему обчислення траєкторії метеора та елементів його геліоцентричної орбіти, якщо вони проводяться базисно, тобто одночасно як мінімум з двох пунктів спостережень [109–111]. Фотометричні вимірювання дозволяють побудувати криву блиску метеора, а за нею, наприклад, коли метеор видно повністю, розрахувати фотометричну масу метеороїда [107, 112]. Спектральні спостереження [11] дозволяють отримати додатково дані про хімічний склад метеора. Крім того фотометрія спектральних ліній вздовж траєкторії метеора дає змогу отримати композитний склад метеорної частинки та розрахувати густину окремих хімічних елементів. Застосування диспергуючих приладів, однак, знижує чутливість спостережної апаратури на порядки і тому реєструються лише спектри болідів. Окреме місце займає звукова реєстрація електрофонних болідів [1], які є відносно рідкісним явищем.

Таким чином, для збору максимально можливої інформації, необхідної для вивчення фізики, хімії та динаміки метеорів, наразі видається доцільним

розробити концепцію (а в перспективі створити) універсального багатофункціонального спостережного комплексу для реєстрації метеорів, який би використовував усі можливості сучасної оптичної та електронної техніки з одного боку, та при цьому мав би відносно низьку вартість. Бажано, щоб комплекс був компактним для забезпечення його мобільності для участі в експедиціях, включаючи авіа-місії [113]. Також комплекс має бути повністю автоматизованим в частині детектування і реєстрації метеорів та інших динамічних атмосферних явищ [114–115], і частково або повністю автоматизованим в частині обробки спостережних даних [111]. Основні принципи та необхідне обладнання для створення мобільного спостережного багатофункціонального комплексу для метеорних досліджень описано в роботі [21].

Фотографічний метод досліджень метеорів є досить універсальним. Перевагою такого методу є фіксація точного положення метеора, розподіл яскравості вздовж шляху, у разі застосування призми чи дифракційної ґратки і обтюратора – отримання спектрограм метеорів з високою роздільною здатністю, що дають можливість дослідити їх хімічний склад, фізичні та хімічні процеси, що супроводжують метеорне явище в земній атмосфері тощо. ПЗЗ та КМОП приймачі мають кращу чутливість порівняно з фотоемульсією. Крім того вони допускають високу ступінь автоматизації спостережень і оперативність отримання наукової інформації. Головним недоліком напівпровідникових детекторів є менше поле зору порівняно з фотоплівками. Нові методи радіофізики, поступаючись фотографії у точності, мають кращу проникну здатність, більш ефективні, незалежні від погоди і часу доби, але потребують складної апаратури. Тому фотографічний метод досліджень, радіолокація, відео спостереження повинні доповнювати один одного під час комплексного дослідження метеорів.

2.2. Характеристики фотоматеріалів для фотографічних спостережень метеорів.

До того часу поки фотографічний метод спостереження метеорних явищ не витіснився відеоспостереженнями, для масової автоматичної зйомки метеорів використовували фотоплівки і скляні пластинки з нанесеним на них шаром фотоемульсії. Розвиток метеорної фотографії значною мірою визначався успіхами техніки виготовлення фотоемульсій. Отримання знімка метеора являє собою низку операцій і недолік роботи однієї ланки може звести нанівець успіх в інших. Необхідні властивості фотоемульсії для метеорних фотоспостережень описані в роботі [1].

Світлочутливість S – міра здатності фотоемульсії створювати приховане зображення. Оскільки вона різна для різних довжин хвиль, то підвищення S можливе як за рахунок розширення області спектра, так і за рахунок збільшення її на даній довжині хвилі λ . Фотографічна густина D залежить від освітленості E і її тривалості t . На прямолінійній ділянці характеристичної кривої вона зростає пропорційно Et^p , де p – показник Шварцшильда, що має величину близько 0.8.

$$D = \varphi(E \cdot t^p)$$

Нижче прямолінійної ділянки знаходиться область недотримок, куди потрапляє близько 2/3 всіх фотометеорів, а також початки і кінці траєкторій всіх взагалі сфотографованих метеорів. Характеристична крива горизонтальна при густині D_0 , що дорівнює густині вуалі. Більшість слабких фотометеорів, що потрапляють в область до $D=+0,2$, непридатні для фотометрії, проте якщо нема іншої можливості, то фотометрують і такі, але при цьому значно зростають похибки фотометрії. В області перетримок і соляризації потрапляють лише деякі метеори. Недостатньо чутливі емульсії застосовувати недоцільно, високочутливі емульсії зберігаються лише 15–20 днів, тому необхідна гіперсенсibiliзація плівок перед зйомкою.

Максимальна оптична густина D_m фотоемульсій визначається найбільшою кількістю виділеного срібла і дорівнює логарифму відношення коефіцієнтів поглинання найбільш непрозорих і прозорих частин негатива. Зазвичай $D_m = 2.5$, тобто найщільніші частини негативу в 300 разів, або на 6.2^m , щільніші за мінімальні. Типова яскравість фотометеорів лежить в межах від $(0-1)^m$ до $-(1-2)^m$ і не досягає D_m (для $-(5-6)^m$), а видима відмінність фотографій більш яскравих метеорів відбувається через ореоли розсіяння і відбивання від зворотного боку підкладки.

Фотографічна вуаль є неминучою у фотопроцесі, але з нею можна працювати. При її густині, що росте разом з S і рівна 0.18–0.30 при найвищій S , втрачається 0.4–0.75 зоряної величини. Варто відрізнити фотографічну вуаль від вуалі, викликаної спеціальною засвіткою емульсії з метою підвищення загальної чутливості.

Контрастність є властивістю емульсії передавати ступінь відмінності яскравостей. Вона визначається тангенсом кута нахилу прямолінійної ділянки характеристичної кривої γ . При $\gamma = 1$ контрастність нормальна. Але γ зі збільшенням S падає і тому зміни яскравості метеора на більш чутливих емульсіях менш помітні. Енергетичний прояв підвищує γ , але разом з цим збільшує і вуаль. В області недотримок значення γ вкрай мале і тому нелегко розшукати слабкі метеори на негативі. Однак контрастність можна підвищити контратипуванням – це процес виготовлення дублікатів безпосередньо з оригінальних зображень без проміжних технологічних операцій, тобто коли з негативу отримують негатив, а з позитиву – позитив, а також фізичним чи хімічним підсиленням.

Фотографічна широта – здатність фотоемульсії правильно передавати весь інтервал яскравостей. Фотоплівки мають широту до 250, тобто правильно можуть передати яскравість метеора в діапазоні до 6^m , наприклад від 0^m до -6^m . Повільне проявлення фотоматеріалу підвищує широту.

Фотографічне розсіяння світла в фотоемульсії розширює зображення об'єкта. У метеорів це призводить до виникнення помилкових ореолів,

розширення сліду, зникнення деталей, хоча і сприяє змінів яскравості. Одна і та ж кількість люкс-секунд Et^p в залежності від експозиції, коротка (політ метеора) або довга (фотографування слабкої зорі), дасть різний результат, так як $p < 1$, і зоря вийде слабшою. Тому астрономи збільшують витримку втричі, щоб виграти одну зоряну величину. З цієї точки зору фотографування є більш придатним для зйомки метеорів, ніж зір.

Роздільна здатність ν фотоемульсії зазвичай складає 60–65 штрих/мм, але сильно знижуючи S , можна дійти до $\nu = 1000$; такі емульсії для метеорів непридатні. Д.Д. Максудов обчислив ν об'єктива і ока й знайшов їх співвідношення k : для світлосили 1:1, 1:2, 1:5 і 1:100 коефіцієнт k відповідно становить 27, 14, 6 і 1.2, тобто в телескопі видно набагато більше деталей, ніж їх можна ним же сфотографувати.

Зернистість зображення пов'язана з природою фотоемульсії. Через неї проходить розрив деталей зображення. Знижувати зернистість можна повільним проявленням, застосуванням деяких проявників, вибором відповідних типів емульсії.

Спектральна чутливість S_λ відіграє важливу роль, оскільки червоні метеори на нечутливих емульсіях взагалі не видимі. Найкращі емульсії – ізопанхроматичні: вони ближче передають те, що бачить око, і найбільш рівномірно охоплюють спектр. Використання інфрачервоних емульсій в метеорній практиці обмежене тим, що у більшості метеорів максимум випромінення лежить в ультрафіолеті.

Гіперсенсibiliзація підвищує чутливість S фотоемульсії. Є ряд засобів для підвищення S , наприклад, засвічення фотоемульсії на кілька десятків секунд світлом нічного неба, або збільшення експозиції на 10% проти норми, купання протягом 20 хвилин у звичайній воді перед проявленням, застосування проявника, що підвищує S при проявленні. Хороші результати дає витримання кілька днів в “ртутному ящику”: пари ртуті діють через упаковку і підвищують S . Час витримки в парах ртуті сильно залежить від навколишньої температури.

Протиореольність емульсії грає важливу роль, дозволяючи уникнути відображень від задньої поверхні підкладки фотоемульсії, хоча цим самим робить більш слабкими зображення метеорів.

Інші властивості фотоемульсії. Відомий вплив температури T на чутливість S . Вплив T неоднаковий для яскравих і слабких метеорів. Зі збільшенням вологості S падає. Дія червоного світла на експоновану пластинку послаблює приховане зображення. Прагнучи максимального виграшу граничної зоряної величини, необхідно проявляти її в повній темряві.

Проявлення. Проявник повинен "витягати" найслабше зображення метеора, отже, він повинен бути без бромистого калію. Для збереження сталості лужності потрібен тетраборнокислий натрій (бура), що забезпечує буферність (з борною кислотою). Проявник повинен бути дрібнозернистим, контрастним, таким, що не створює вуалі і підвищує S при проявленні. Проявлення має бути повільним, з попереднім розмочуванням у воді.

Фіксування. Фіксування повинне видалити більше 95% галогенного срібла з астрономічного негатива, тому для видалення прозорі, але погано розчинної комплексної солі $\text{Na}_3\text{Ag}(\text{S}_2\text{O}_3)_2$, негатив слід витримувати в тіосульфаті натрію ще стільки ж часу, скільки пройшло до того як він став прозорим; довше цього тримати не можна, оскільки починається розчинення Ag . Для тривалого зберігання потрібно вдруге фіксувати в свіжому розчині, що корисніше навіть тривалої промивки і запобігає пожовтінню. Останнє усувається марганцевокислим калієм або метабісульфітом калію, але при цьому послаблюється зображення. При промиванні, як відомо, важлива не швидкість струменя, а число ванн. Для метеорної фотографії швидке сушіння (вентилятор, спирт) небажане.

2.3. Оптичні призми та дифракційні ґратки.

Оптична призма. Дисперсія призми є результатом того, що різні довжини хвиль випромінення мають різний показник заломлення. Дисперсія залежить від типу скла і кутів між гранями призми.

Залежність між показником заломлення і відхиленням світлового променя визначається за законом Снеліуса:

$$n = \sin i / \sin r \quad (2.1)$$

де n – показник заломлення, i – кут падіння променя, r – кут заломлення променя (Рис.2.4)

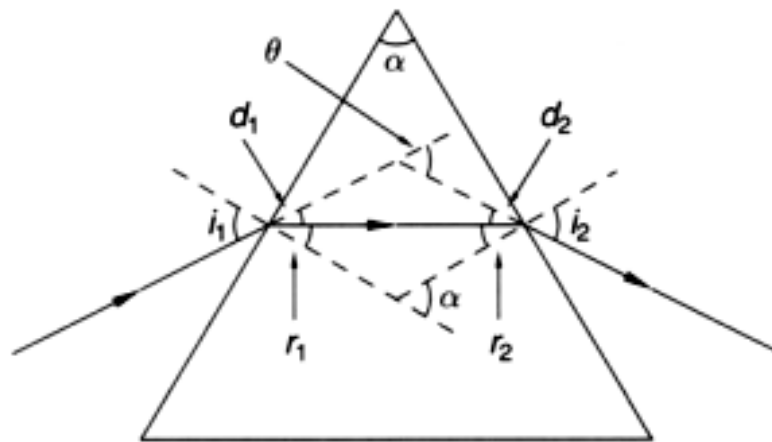


Рис.2.4. Шлях монохроматичного світлового променя крізь оптичну призму [116].

Заломлення світлового променя відбувається в точці падіння і в точці виходу променя з призми. Для отримання мінімального відхилення і оптимальної якості зображення, промінь світла, що проходить крізь призму, повинен бути паралельним до основи призми. Падаючий (i_1) і результуючий кути (i_2) будуть дорівнювати приблизно половині кута при вершині призми (α) (Рис.2.4).

У призмах зі щільного флінту, відхилення синього світла майже в п'ять разів більше за відхилення червоного світла. Більшість з легко доступних

призм виготовлені зі скла ВК7 – чистий крон, який пропускає більше 98% світла в області від $\lambda 3900\text{\AA}$ до інфрачервоної ділянки спектра.

Роздільна здатність призмового спектра, як правило, залежить від розміру зображення або ширини щілини (якщо використовується), довжини основи призми, фокусної відстані об'єктива камери і розміру пікселя ПЗЗ-матриці або зерна емульсії. Для поліпшення спектральної роздільної здатності може бути використано кілька призм, об'єднані в одну, для збільшення ефективної довжини основи призми. Кожна з призм повинна утворювати мінімальний кут відхилення з попередньою. Раніше використовували до шести або навіть восьми призм, щоб отримати максимальну роздільну здатність.

Теоретична роздільна здатність R призми може бути визначена за формулою:

$$R = \Delta n / \Delta \lambda \cdot L \quad (2.2)$$

де $\Delta n / \Delta \lambda$ – дисперсія призми, L – довжина основи призми або призм.

Перевагою у використанні призм є те, що в результаті утворюється лише один спектр, тоді як використання дифракційних ґраток призводить до формування кількох спектральних порядків. Система з однієї призми дає можливість отримати яскравіший спектр. Призми з довгими основами або використання кількох призм призводить до додаткових світлових втрат за рахунок площі поверхні і товщини скла. Часто використовують призмові системи з комбінації трьох призм крон-флінт-крон. У результаті відхилення відсутнє, а дисперсія така ж як у малої призми з крону, що становить половину довжини системи.

Оптична призма дає змогу отримувати спектр з нелінійною дисперсією. Спектральна роздільна здатність у фіолетовій частині спектра краща, ніж у червоній. Як результат, на спектрограмі, отриманій за допомогою призми, не спостерігається чітких емісійних ліній атомів хімічних елементів. Натомість

маємо сукупність смуг, які являють собою поєднання спектральних ліній [116].

Дифракційні ґратки. Дифракційні ґратки широко використовуються в якості альтернативи призм для досягнення майже лінійної дисперсії. Ґратка являє собою оптичну поверхню з металу або прозорого матеріалу, на яку тим чи іншим методом нанесені штрихи, що певним чином розбивають фронт падаючої світлової хвилі на когерентні пучки і змінюють їх амплітуду або фазу. Інтерференція цих когерентних пучків світла визначає результуючий розподіл енергії випромінювання в просторі і спектроскопічні характеристики ґратки.

До останнього часу в спектральних приладах використовувалися головним чином дифракційні ґратки, у яких штрихи нарізалися за допомогою спеціальних ділильних машин з алмазними різцями. Такі ґратки мають рівновіддалені один від одного паралельні штрихи, форма перерізу яких визначається профілем ріжучої грані алмазного різця. Форма штриха може бути різною, але важливим є те, що штрихи повторюються через строго однакові проміжки, які називаються періодом дифракційної ґратки. Таким чином, нарізні дифракційні решітки (або копії з них – репліки) представляють собою одновимірну періодичну структуру.

Існує технологія виготовлення дифракційних ґраток шляхом утворення на спеціальних світлочувливих матеріалах, які змінюють деякі свої властивості під дією світла, інтерференційної картини від випромінювання лазерів. Це так звані голографічні дифракційні ґратки [117].

Принцип дії дифракційної ґратки ґрунтується на дифракції світлових хвиль, які взаємодіють із нею, та подальшій інтерференції цих дифрагованих хвиль (Рис.2.5). У загальному випадку дифракційну ґратку можна уявити як сукупність багатьох паралельних та рівновіддалених прозорих щілин, розділених однаковими непрозорими проміжками. Якщо на таку ґратку падатиме світловий пучок, то світлові хвилі, проходячи крізь щілини ґратки, відхилитимуться. У такому разі кожна точка будь-якої щілини ґратки

виступатиме як вторинне джерело світла. Після взаємодії з ґраткою світлові хвилі будуть поширюватись у різних напрямках. Однак світлові хвилі від різних щілин ґратки інтерферують між собою. Якщо ці хвилі перебувають в однаковій фазі, то вони підсилюють одна одну, якщо ж у протифазі, то гасять. У першому випадку відбувається конструктивна інтерференція, у другому – деструктивна. Напрямки поширення дифрагованих хвиль, на яких відбувається їх конструктивна інтерференція, називають дифракційними максимумами. Таких максимумів зазвичай кілька, їх позначають цілими числами, які називаються порядком дифракції (n). Кількість дифракційних максимумів і напрямки їх поширення залежать від періоду ґратки та довжини хвилі світла й можуть бути визначені за допомогою рівняння дифракційної ґратки:

$$m \lambda = d(\sin \theta_n(\lambda) + \sin \theta_i) \quad (2.3)$$

де θ_i – кут падіння світлового пучка на ґратку, $\theta_n(\lambda)$ – кут дифракції для пучка n -го порядку, λ – довжина хвилі світла, d – період ґратки, n – порядок дифракції. Із цього рівняння випливає, що кут дифракції залежить від довжини хвилі світла. Отже, якщо на ґратку падатиме біле світло, то воно розкладатиметься ґраткою у спектр.

Дифракційні ґратки розрізняють на пропускання і на відбиття, або голографічні. Спектри метеорів, що досліджуються в роботі, отримані за допомогою дифракційних ґраток на пропускання. Тому розглянемо особливості формування спектрів за допомогою саме таких ґраток.

Коли монохроматичний пучок світла проходить через пару дрібних щілин (штрихів), виникають дифракційні та інтерференційні ефекти. На виході зі щілини світлові хвилі взаємодіють під різними кутами від щілини і генерують серію інтерференційних хвиль, де гребінь однієї хвилі підсилює інший, даючи яскраву лінію чи темну, де гребені гасять один одного. Коли розглядається біле світло і дифракційна ґратка має велику кількість щілин, то інтерференційні картини змінюються в залежності від довжини хвилі і

утворюють серію спектрів. За допомогою дифракційних ґраток можна отримати до 10 (іноді більше) спектральних порядків (Рис. 2.6).

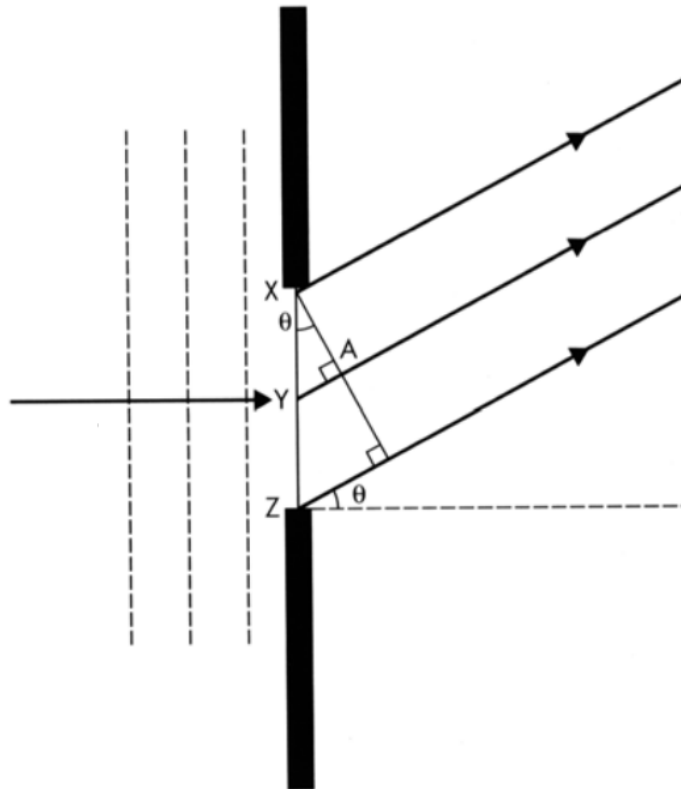


Рис. 2.5. Проходження монохроматичного світлового променя крізь дифракційну ґратку. $XZ = a$ – довжина штриха, $XY = YZ = a/2$. Мінімум інтерференції спостерігається, коли різниця ходу променів становить $YA = \lambda/2$, $\sin\theta = YA/XY = \lambda/2/a/2 = \lambda/a$. Наступний мінімум спостерігатиметься, коли $\sin\theta = n\lambda/2$ [116].

Для дифракційних ґраток на пропускання частина світлових променів від джерела при проходженні крізь ґратку не відхиляється, утворюючи нульовий спектральний порядок. Спектри вищих порядків утворюються симетрично відносно нульового порядку на різних кутових відстанях, перший спектральний порядок є найяскравішим.

Рівняння дифракційної ґратки має вигляд:

$$nN\lambda = \sin i + \sin r \quad (2.4)$$

де i – кут падіння променя, r – кут заломлення променя, n – спектральний порядок, N – кількість штрихів на 1 мм, λ – довжина хвилі світла.

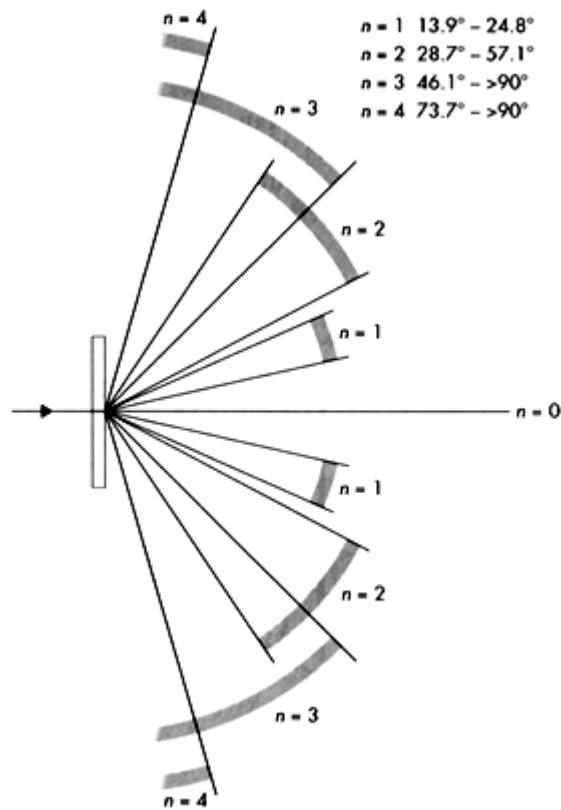


Рис. 2.6. Формування спектральних порядків при проходженні білого світла крізь дифракційну ґратку 600 штрих/мм в області $\lambda 4000\text{--}7000\text{\AA}$ [116].

Оскільки ґратки мають лінійну дисперсію, то другий спектральний порядок вдвічі ширший за перший. Вищі спектральні порядки можуть перекривати один одного (Рис.2.6). Спектральна область ґратки визначається довжиною спектра, що не перекривається.

Для отримання спектрів метеорів, що досліджуються в роботі, використовувалися дифракційні ґратки з 400 і 600 штрих/мм. Охоплювалася спектральна область $\lambda 3500\text{--}7000\text{ \AA}$.

Відхилення спектральних порядків від нульового можна визначити наступним чином. Наприклад, якщо кут падіння променя $i = 0^\circ$, спектральний порядок $n = 1$, кількість штрихів $N = 100$ штрих/мм, а довжина хвилі падаючого світла $\lambda = 550$ нм, то $nN\lambda = \sin r$, $\sin r = 1 \cdot 100 \cdot 550 \cdot 10^{-6}$ і кут

заломлення променя буде $r = 3.15^\circ$. Для $N = 200$ штрих/мм – $r = 6.3$, для $N = 400$ штрих/мм – $r = 12.7^\circ$, для $N = 600$ штрих/мм – $r = 19.3^\circ$.

Дифракційні ґратки на пропускання з малою кількістю штрихів мають малі кути заломлення, що дозволяє використовувати їх у випадку камер з малою дисторсією. Якщо кількість штрихів вище 200 штрих/мм, ґратку слід повернути відносно камери на величину кута заломлення для досягнення найкращого результату.

Спектральна дисперсія визначається як:

$$\Delta\lambda/\Delta r = N \cos r / n \quad (2.5)$$

Для малих кутів $\cos r \approx 1$, тому

$$\Delta\lambda/\Delta r = N/n \quad (2.6)$$

Лінійною дисперсією називається відношення $\Delta l/\Delta\lambda$, де l – відстань між лініями спектра у фокальній площині лінзи, λ – довжини хвиль, між якими вимірюється відстань l . Вона вимірюється як $10^7 \cos r / NnL$ Å/мм, де L – відстань від ґратки до ПЗЗ.

Роздільна здатність спектра R визначається на основі критерію Релея:

$$R = \lambda/\Delta\lambda = nN \quad (2.7)$$

Яскравіші лінії дають кращу роздільну здатність. Використовуючи ґратки з більшою кількістю штрихів, можна досягти максимальної роздільної здатності.

До 50% падаючого світла припадає на нульовий порядок, 15% – на кожен з перших спектральних порядків, 5% – на другий порядок і т.д. Для покращення ефективності, штрихи на ґратки наносять під кутом, що дозволяє значну частину вхідного світла спрямувати в перший спектральний порядок. Існують дифракційні ґратки різного розміру та з різною кількістю штрихів на 1 мм. Чим більша кількість штрихів, тим слабший спектр, але краща роздільна здатність.

Дисперсія ґратки майже лінійна. Спектр формується під деяким кутом відносно нульового порядку. Якщо камера правильно встановлена між синьою і червоною спектральною областями, то частина спектра буде не сфокусованою. Фокусування на нульовому спектральному порядку не дає добре сфокусованого спектра [116].

2.4. Методика обробки метеорних спектрів та ототожнення емісійних ліній.

Після фотографування спектра метеора проводять його ототожнення зі спектром порівняння, довжини хвиль спектральних ліній у якому точно визначені. Важливо, щоб спектр порівняння містив досить багато ліній в ділянці спектру, яку ми досліджуємо.

За допомогою мікроскопа проводиться вимірювання спектрограми. В результаті отримуються, з одного боку, довжини хвиль λ спектральних ліній, а з другого – відповідні відліки міліметрової шкали n_i (відстань від певного нуль-пункта до спектральних ліній). Отриману залежність представляють графічно у вигляді ґрадуваної кривої спектроґрафа $n = f(\lambda)$.

Взаємне положення в спектрі ліній одного і того ж хімічного елемента залежить від застосовуваної для отримання спектра апаратури. Так, якщо спектр отримано за допомогою дифракційної ґратки (дифракційний спектр), то спектральні лінії розміщуються одна від одної на відстані $n_2 - n_1$, що пропорційно різниці довжин хвиль $\lambda_2 - \lambda_1$. Якщо ж спектр отримано з призмовим інструментом (призмовий спектр), то фіолетова ділянка спектра вийде дещо розтягнутою, а червона – стиснутою; відстань між спектральними лініями не буде пропорційна різниці довжин хвиль. Тому при обробці спектрограми необхідно визначати масштаб різних ділянок спектра, тобто інтервал довжин хвиль, що вкладаються на одиницю довжини кожної ділянки спектрограми. Такий масштаб називають оберненою дисперсією ділянки спектрограми, яка визначається наступним чином:

$$D = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{n_2 - n_1} \quad (2.8)$$

і вимірюється, як правило, в ангстремах на 1мм (Å/мм) або нанометрах на 1 мм (нм/мм).

Очевидно, що дифракційний спектр має постійну дисперсію D вздовж всієї спектрограми, тоді як дисперсія призмового спектра поступово зменшується від фіолетової до червоної ділянки спектра (величина D зростає).

Зміну дисперсії спектрограми звичайно подають графічно у вигляді дисперсійної кривої, як залежність оберненої лінійної дисперсії від довжини хвилі. Для її побудови потрібно для кожної послідовно розміщеної пари відомих спектральних ліній λ_i і λ_{i+1} розрахувати:

а) середню довжину хвилі:

$$\langle \lambda_i \rangle = \frac{\lambda_i + \lambda_{i+1}}{2} \quad (2.9)$$

б) відношення $\Delta\lambda/\Delta n$, яке для близько розміщених ліній дорівнює оберненій лінійній дисперсії. Зауважимо, що для розрахунку оберненої лінійної дисперсії необхідно використовувати спектральні лінії, по можливості, із близькими значеннями λ_1 і λ_2 .

За допомогою побудованих графічних залежностей (градувальна та дисперсійна криві) можна обчислювати довжини хвиль невідомих ліній у спектрі. Найпростіше (із невисокою точністю) це реалізується на основі градувальної кривої. Для цього вимірюють відстань від нуль-пункту до невідомої лінії на спектрограмі та відкладають її числове значення на координатній осі n , із кінця відрізка відновлюють перпендикуляр до перетину з градувальною кривою. З отриманої точки опускають перпендикуляр на координатну вісь λ , за масштабом якої визначають довжину хвилі невідомої спектральної лінії.

Суттєво вищу точність забезпечують розрахунки на основі дисперсійної кривої методом лінійної інтерполяції довжин хвиль невідомих ліній. Якщо спектральна лінія з невідомою довжиною хвилі λ_x розміщується між лініями λ_i і λ_{i+1} , відстань між якими $\Delta\lambda_i$, а відстань між λ_i і λ_x дорівнює Δl_x , то

$$\lambda_x = \lambda_i + \frac{\Delta\lambda_i}{\Delta l_x} \Delta l_x \quad (2.10)$$

Величина оберненої лінійної дисперсії може бути визначена за дисперсійною кривою, тому достатньо лише виміряти Δl_x . Внаслідок нелінійності дисперсії метод дає задовільні результати тільки при невеликих відстанях між лініями.

Для оцінки максимально можливого значення $n_2 - n_1$ використовують наступне очевидне правило. Якщо на використовуваному інтервалі $\Delta\lambda$ дисперсія змінюється на $K\%$, то максимальна похибка у визначенні довжини хвилі лінії, що лежить усередині інтервалу, не перевищує $K\%$ від нього. Тобто, якщо $\lambda_2 - \lambda_1 = 10$ нм, а дисперсія змінюється на 2% , то максимальна похибка у визначенні довжини хвилі складає 0.2 нм.

При визначенні довжин хвиль у спектрі метеора зазвичай користуються тими ж методами, що й при вимірюванні звичайних спектрограм. На фотоплатівці вибирають спектр зорі так, щоб він по можливості ближче розташовувався до спектра метеора, що підлягає вимірюванню. Потім за допомогою відповідного атласу зоряних спектрів вибирають ряд ліній у спектрі зорі, довжини хвиль яких добре відомі. Найчастіше такими лініями є лінії водневої серії Бальмера: H_α , H_β , H_γ і H_δ , які при деякому досвіді можна ототожнити й без допомоги атласу. Потім на столику вимірювального приладу пластинку встановлюють так, щоб одна з його осей збігалася з напрямком дисперсії призми, тобто щоб рухлива нитка переміщалася паралельно спектральним лініям. За отриманими відліками для вимірюваних спектральних ліній і відомим для них довжинам хвиль будується дисперсійна крива: по одній з осей відкладаються довжини хвиль, а по іншій – відповідні

відліки. При точних вимірюваннях крива виходить плавною і за своєю формою досить близькою до відрізка гіперболи.

Для вимірювання спектра метеора насамперед відшукуються лінії H і K іонізованого кальцію або інші відомі лінії. Одну з них приймають за вихідну й від неї проводять вимірювання інших спектральних ліній. Покладемо, що в спектрі зорі порівняння лінія H іонізованого кальцію мала відлік n_1 а в спектрі метеора, у якому та ж лінія H прийнята за нуль, відлік для якої-небудь лінії буде n_2 . Тоді в системі відліків, у якій побудована дисперсійна крива, ця лінія буде мати відлік $n = n_1 + n_2$. За цим відліком, користуючись графіком, знаходять відповідну довжину хвилі λ . Подібним чином визначаються довжини хвиль всіх інших ліній у спектрі метеора. Далі, користуючись таблицями спектральних ліній відомих хімічних елементів, проводять їх ототожнення у спектрі метеора. Зазвичай для цієї мети використовуються таблиці Ш. Мур та А.Н. Зайделя [12, 13].

Точність графічного методу невелика й залежить від числа точок, узятих для побудови кривої, і масштабу, але завдяки простоті він часто застосовується для швидких, наближених оцінок довжин хвиль.

Довжини хвиль спектральних ліній можуть бути визначені, як відомо, і аналітичним шляхом, якщо скористатися, наприклад, методом Корню. Для цієї мети користуються формулою:

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{c}{n_0 - n} \quad (2.11)$$

де n – відлік, що відповідає шуканій довжині хвилі λ_0 , а c і n_0 – деякі константи (константи Корню), отримані з вимірювань наступним чином. Для трьох виміряних відомих ліній можна записати:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= \lambda_0 + \frac{c}{n_0 - n_1} \\ \lambda_2 &= \lambda_0 + \frac{c}{n_0 - n_2} \\ \lambda_3 &= \lambda_0 + \frac{c}{n_0 - n_3}.\end{aligned}\tag{2.12}$$

Звідки:

$$\lambda_0 = \frac{n_1 \lambda_1 (\lambda_2 - \lambda_3) + n_2 \lambda_2 (\lambda_3 - \lambda_1) + n_3 \lambda_3 (\lambda_1 - \lambda_2)}{n_1 (\lambda_2 - \lambda_3) + n_2 (\lambda_3 - \lambda_1) + n_3 (\lambda_1 - \lambda_2)}\tag{2.13}$$

$$\begin{aligned}n_0 &= \frac{n_1 (\lambda_1 - \lambda_0) - n_2 (\lambda_2 - \lambda_0)}{\lambda_1 - \lambda_2} = \frac{n_3 (\lambda_3 - \lambda_0) - n_1 (\lambda_1 - \lambda_0)}{\lambda_3 - \lambda_1} = \\ &= \frac{n_2 (\lambda_2 - \lambda_0) - n_3 (\lambda_3 - \lambda_0)}{\lambda_2 - \lambda_3}\end{aligned}\tag{2.14}$$

$$\begin{aligned}c &= -(\lambda_1 - \lambda_0)(n_1 - n_0) = -(\lambda_2 - \lambda_0)(n_2 - n_0) = \\ &= -(\lambda_3 - \lambda_0)(n_3 - n_0)\end{aligned}\tag{2.15}$$

Якщо інтервал $\lambda_3 - \lambda_1$ великий, наприклад, порядку 400 Å або ще більший, то у такому випадку розрахунки за виміряними значеннями n довжини хвилі λ можуть суттєво відрізнятись від спостережених. Відхилення мають систематичний хід, тому можуть бути легко враховані. З врахуванням цієї поправки формула може бути записана у вигляді:

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{c}{n_0 - n - \Delta n}\tag{2.16}$$

Під час обробки спостережень слід мати на увазі, що спектр порівняння необхідно вибирати по можливості ближче до вимірюваного спектру метеора, тому що у протилежному випадку процес обробки в значній мірі ускладнюється.

Успектрограмах, які отримані за допомогою дифракційних ґраток, дисперсія змінюється повільно, тому для них використовуються формули лінійної інтерполяції:

$$\lambda = \lambda_1 + \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{n_2 - n_1} (n - n_1) \quad (2.17)$$

Або для більш довгих ділянок:

$$\lambda = \lambda_1 + a(n - n_1) + b(n - n_1)^2, \quad (2.18)$$

де a і b – постійні, які можна знайти за застосуванням формули (2.17) до відомих ліній. Знайдені довжини хвиль вимірюваних ліній метеорного спектру ототожнюють з таблицями значень довжин хвиль відомих хімічних елементів [79].

Наступними кроками в обробці метеорних спектрів є відносна і абсолютна фотометрія. Метою відносної спектрофотометрії є вимірювання і визначення інтенсивності випромінювання окремих емісій в спектрі метеора у відносних одиницях інтенсивності. Абсолютна спектрофотометрія є продовженням відносної і її метою є отримання інтенсивностей I окремих емісій в абсолютних енергетичних одиницях – зазвичай в одиницях освітленості $[E_\lambda] = \text{ерг/см}^2 \text{сек } \text{\AA}$, а також розподіл енергії в спектрі метеора для вимірюваних моментів вздовж траєкторії метеора $E_\lambda = F(\lambda)$. Крім цього абсолютна спектрофотометрія дає можливість визначити цілий ряд фізичних характеристик метеорів [78].

Обробку цифрових зображень метеорних спектрів, досліджуваних в роботі, здійснено на основі алгоритму і програмного забезпечення, розробленого і призначеного для досліджень фотографічних спектрів метеорів головним науковим співробітником відділу міжпланетної матерії Астрономічної обсерваторії Академії наук Чеської Республіки доктором Їрші Боровічкою [11]. Спочатку проводилася ідентифікація зір на зображенні в

області навколо метеорного явища та їх фотометрія для подальшої побудови характеристичної кривої. Далі будувалася функція спектральної чутливості системи та проводилися вимірювання спектрограм з подальшим визначенням довжин хвиль спектральних ліній, що ототожені в спектрах метеора. Результати обробки спектрів досліджуваних метеорів представлені в Розділах 3 і 4.

2.5. Метод емісійних кривих росту.

Існує два теоретичні підходи до спектрального аналізу метеорного випромінення [78]. Один підхід ґрунтується на детальному дослідженні процесів зіткнень між атомами, що випарувалися з метеороїда (Fe, Mg, Ca, Na, Al тощо), і молекулами повітря (N_2 і O_2), так як метеорне випромінювання відбувається, більшою мірою, за рахунок цих зіткнень. Цей підхід здається найбільш правильним. Але всі дослідження в цьому напрямі були тільки експериментальними [118–120]. Це є наслідком того, що теорія непружних зіткнень між важкими частинками дуже складна і отримати практичні розв'язки важко. На даний час немає точної теорії, яку можна використати в повному об'ємі для дослідження хімічного складу метеорних тіл.

Альтернативний підхід – це застосування теорії термодинамічної рівноваги до метеорного випромінення. Це застосування не завжди можливе, тому що метеорне випромінення не знаходиться в стані термодинамічної рівноваги. І хоча цей метод є умовним і достовірність результатів швидше за все обмежена, майже всі спектральні дослідження метеорів проведені за допомогою цього підходу [62, 69, 71, 121–126].

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 [2, 71, 123]. Більш того, випромінювання в кожній лінії певного елемента має різну оптичну товщину і, як показав

Цеплеха [71], найменшу оптичну товщину має випромінювання Н і К СаII. 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 емісійних кривих росту (ЕКР), який ґрунтується на припущенні локальної термодинамічної рівноваги в об'ємі випромінювання і враховує ефект самопоглинання в спектральних лініях [71].

Метод кривих росту полягає в наступному. Нехай для деякого об'єму випромінювання справедливе припущення про локальну термодинамічну рівновагу. 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:

$$i_\nu = B_\nu(1 - e^{-\tau_\nu}), \quad (2.19)$$

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

$$\tau_\nu = k_\nu l n_i, \quad (2.20)$$

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:

$$I = 4\pi \int_0^\infty i_\nu d\nu \quad (2.21)$$

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

$$n_i = \frac{n}{U} g_i e^{-\epsilon_i / kT}, \quad (2.22)$$

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:

$$I_{ki}^0 = N_k A_{ki} h \nu_{ki}, \quad (2.23)$$

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:

$$A_{ki} = \frac{g_i}{g_k} \frac{8\pi^2 e^2 \nu_{ik}^2}{mc^2} f_{ik}, \quad (2.24)$$

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 (2.22)–(2.24.) отримаємо:

$$\frac{I_{ki}^0 \lambda^3}{g_i f_{ik}} = \frac{8\pi^2 e^2 h}{mg_k} N_k = \frac{8\pi^2 e^2 h}{mU} N e^{-\chi_k / kT}, \quad (2.25)$$

$$\frac{I_{ki}^0}{\lambda B_\lambda} = \frac{4\pi^2 e^2}{mc^2 U} N_k = g_i f_{ik} \lambda_{ik} N e^{-\chi_i / kT}, \quad (2.26)$$

де $B_\lambda = B_\nu c / \lambda^2$ – функція Планка. Логарифмуючи вирази (2.25) і (2.26) і вводячи позначення:

$$\theta = \frac{1}{kT} \lg e = \frac{5040}{T}, \quad (2.27)$$

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

$$\lg \frac{I_{ki}^0 \lambda^3}{g_i f_{ik}} = -\theta E_k + \lg \frac{8\pi^2 h e^2 N}{mU}, \quad (2.28)$$

$$\lg \frac{I_{ki}^0}{\lambda B_\lambda} = \lg g_i f_{ik} \lambda_{ik} - \theta E_i + \lg \frac{4\pi^2 e^2}{mc^2 U} N. \quad (2.29)$$

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_v 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. Для однорідної сфери згідно [127] маємо:

$$\frac{I_{ki}}{\lambda B_\lambda} = \frac{8\pi^2 R^2 v_T}{c} \left[\ln \left(\frac{I_0}{\lambda B_\lambda} \frac{c}{8\pi^2 R^2 v_T} \right) \right]^{1/2}. \quad (2.30)$$

З подальшим ростом τ_v основну роль в розширенні ліній починає грати затухання випромінювання, в тому числі і в результаті зіткнень. Якщо γ – стала затухання, то в цьому випадку отримуємо:

$$\frac{I_{ki}}{\lambda B_\lambda} = \left[\frac{16\pi^3 R^2 e^2 N \gamma}{mc^3 U \lambda} g_i f_{ik} \lambda_{ik} e^{-\chi_i/kT} \right]^{1/2} = \left[\frac{I_{ki}^0}{\lambda B_\lambda} \frac{4\pi R^2 \gamma}{c \lambda} \right]^{1/2}. \quad (2.31)$$

Хід кривої залежить від сталої затухання, точніше від співвідношення $a = \gamma \lambda / 4\pi v$ (Рис. 2.7). Формули (2.30) і (2.31) виводяться шляхом визначення інтеграла (2.21) за заданим профілем лінії.

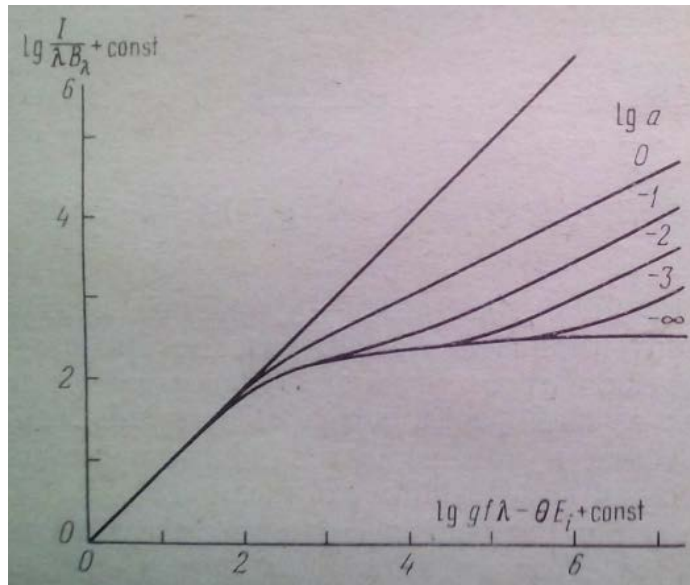


Рис. 2.7. Теоретичні криві росту для однорідної сфери випромінювання для різних значень a [2].

Модель однорідної сфери випромінювання спрощено показує реальну картину світіння метеорної коми. З. Цеплеха [127] розглянув ще дві моделі: модель сфери, що розширюється, і модель циліндричної ударної хвилі. Остання лягла в основу його подальших робіт та його учнів.

Для моделі циліндричної хвилі, що розширюється, З. Цеплеха отримав у випадку доплерівського розширення під час співпадіння напрямку променя зору з віссю циліндра наступні рівняння:

$$\frac{I_{ki}}{\lambda B_\lambda} = \frac{4\pi^2 \nu_m R^2}{c} [1 - e^{-X} (1 + X) - X(2 + X)E_i(-X)], \quad (2.32)$$

$$X = \frac{3e^2 g_i f_{ik} \lambda_{ik} N}{mcU\nu_m R^2} e^{-\chi_i/kT}, \quad (2.33)$$

де $E_i(X)$ – інтегральна степенева функція. Якщо оптична товщина стає досить великою, вираз в квадратних дужках прямує до одиниці. Якщо промінь зору становить з віссю циліндра кут α , то множник перед дужкою повинен бути замінений і формула (2.32) приймає вигляд:

$$\left(\frac{I_{ki}}{\lambda B_\lambda} \right)_{\tau \rightarrow \infty} = \frac{8\pi^2 (R^2 + Rl) v_m \cos \alpha}{c}, \quad (2.34)$$

де R і l – радіус і довжина циліндра, v_m – швидкість метеора. Довжина циліндра l визначається умовою, що на цій відстані від метеороїда швидкість частинок відносно нього дорівнює v_m . Якщо r – відстань від осі циліндра, то швидкість в точці з координатами (r, z) визначається виразом:

$$v' = v_m \left[\frac{z(R-r)}{Rl} \right]^{1/2}, \quad (2.35)$$

а концентрація атомів буде:

$$n = n_0 \left[\frac{Rl}{z(R-r)} \right]^{1/2}, \quad (2.36)$$

де n_0 – концентрація атомів в точці $z=l, r=0$. Загальна кількість атомів в об'ємі циліндра в цій моделі складає:

$$N = \frac{16\pi n_0 R^2 l}{3}. \quad (2.37)$$

Модель циліндричної ударної хвилі, побудована З. Цеплехою, має недоліки:

1. У ній передбачається, що газ на лобовій і бічній поверхнях циліндра нерухомий відносно метеороїда і ударної хвилі. Насправді ні в одній точці як на фронті, так і за фронтом ударної хвилі, така умова не виконується. Швидкість газу за фронтом хвилі поблизу критичної лінії $\sim 0.1 v_m$, а її компонента по осі z на бічній поверхні циліндра близька до v_m .

2. У моделі знехтувано швидкістю розширення циліндра, перпендикулярною до осі z .

3. Попереднє припущення призводить, відповідно до формули (2.34), до висновку, що у метеора, який летить перпендикулярно до променя зору, інтенсивності спектральних ліній мають бути рівними нулю.

4. З формули (2.36) випливає, що на поверхні циліндра концентрація частинок $n \rightarrow \infty$ ($R=r$), тоді як насправді вона має кінцеве значення.

Ці недоліки могли позначитися на результатах її застосування, але вигляд кривої росту слабо залежить 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 $(\lg g f_{ik} \lambda_{ik} - \theta E_i)$ і відкладається по осі абсцис. Величина $\lg(I/\lambda B_\lambda)$ відкладається по осі ординат. За формулами (2.29), (2.32) і (2.31) для даного T і декількох a 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.

Метод кривих росту дозволяє отримати не тільки температуру збудження, але і цілий ряд інших величин. За формулою (2.37) можна знайти N – число випромінюючих атомів, а також їх сумарну масу. Середня частина кривої росту вказує на наявність значного самопоглинання, особливо у резонансних лініях. Для частини кривої, яка визначається затуханням, можна отримати сталу затухання γ тощо [2].

Для побудови повної кривої росту в метеорному спектрі необхідно мати досить велику кількість мультиплетів кожного елемента. Для призмових спектрів, отриманих з низькою дисперсією, ця умова виконується вкрай рідко. Крім того, для оцінки відносного числа атомів і іонів в метеорній плазмі може бути використаний метод Харві [69]. Але цей метод не враховує ефект самопоглинання і тому не є достовірним. Для того, щоб визначити

фізичні характеристики метеорів, дослідники проводять вимірювання спектрів яскравих метеорів та болідів, отриманих за допомогою дифракційних ґраток, що характеризуються високою дисперсією.

Тим не менш є можливість обробляти багатий спостережуваний матеріал, а саме призмові спектри метеорів, для кількісної метеорної спектроскопії, за допомогою методів, використовуваних в зоряній спектроскопії. Ці методи враховують, що випромінювання в лінії не є оптично тонким по всьому профілю спектральних ліній.

Висновки до розділу 2.

1. Вибір дисперсійного елемента для отримання метеорних спектрів залежить від задач, які ставляться дослідником. Перевагою у використанні призми є те, що в результаті утворюється лише один спектр, тоді як використання дифракційних ґраток призводить до формування кількох спектральних порядків, що можуть перекривати один одного. Але оптична призма дає змогу отримати спектр з нелінійною дисперсією. Спектральна роздільна здатність у фіолетовій частині спектра краща, ніж у червоній. Як результат, на спектрограмі, отриманій за допомогою призми, не спостерігається чітких емісійних ліній атомів хімічних елементів. Натомість маємо сукупність смуг, які представляють собою накладення спектральних ліній. Крім того необхідно, щоб призма мала найменші втрати на відбивання і поглинання при мінімальних розмірах. Застосування дифракційних ґраток дає можливість отримати спектри метеорів з лінійною дисперсією.

2. Проблемою кількісного аналізу спектрів метеорів є те, що метеорна плазма не перебуває в стані термодинамічної рівноваги. Більш того, випромінювання в кожній лінії певного елемента має різну оптичну товщину. У кількісному дослідженні цих ліній необхідно враховувати ефект самопоглинання в спектральних лініях. Найбільш відомим і розвиненим є метод емісійних кривих росту, який ґрунтується на припущенні локальної

термодинамічної рівноваги в об'ємі випромінювання і враховує ефект самопоглинання в спектральних лініях.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ФОТОГРАФІЧНИХ СПЕКТРІВ ВИБРАНИХ МЕТЕОРІВ

Одним з найбільш важливих кроків у дослідженні метеорних спектрів є ідентифікація спектральних ліній. Для цього необхідно мати доступ до каталогів чи праць, що містять дані про спектральні лінії різних хімічних елементів. Загально відомими є каталоги Ш. Мур [12, 128] і Н.Л. Візе [129], але вони є не у всіх астрономічних установах і багатьом дослідникам недоступні. Таблиці А.Н. Зайделя [13] містять лише довжини хвиль спектральних ліній та назви мультиплетів, яким ці лінії належать. Доступним є електронний каталог [14]. Однак, згадані каталоги є загальними, тобто містять довжини хвиль всіх можливих спектральних ліній, які належать тому чи іншому хімічному елементу. Пошук необхідних довжин хвиль спектральних ліній, що спостерігаються в спектрах метеорів, у цих каталогах займає багато часу. Саме тому перед нами стояло завдання обробити наявні спектри метеорів, ідентифікувати всі емісійні лінії, що спостерігаються в цих спектрах і скласти компільований каталог, зручний для швидкого ототожнення емісій при дослідженні спектрів метеорів.

3.1. Обробка спектрів метеорів та їх аналіз.

Досліджувалися спектри метеорів, отримані за допомогою реплік дифракційних ґраток і оптичних призм. Спектри метеорів, отримані за допомогою дифракційної решітки, дозволяють здійснити детальну ідентифікацію спектральних ліній, визначити їх інтенсивності, розрахувати фізичні параметри метеорних тіл, побудувати моделі метеорних явищ, виконати пошук нових емісійних ліній.

3.1.1. Спостережний матеріал.

Спостереження досліджуваних в роботі фотографічних спектрів метеорів проводилися на спостережній станції Астрономічної обсерваторії

Астрономічного інституту Академії наук Чеської Республіки (м. Ондржейов).

Координати пункту спостережень:

$$\lambda_{\text{пд}}=14.7800424^{\circ},$$

$$\varphi_{\text{пн}}=49.9101212^{\circ},$$

$$h_{\text{нрм}}=0.526 \text{ км.}$$

Спектри метеорів представлені на Рис. 3.1–3.4. В Таблиці 3.1 приведено дані спостережень. Спектри отримано за допомогою фіксованої ширококутної камери Tessar (світлосила 1:4.5; $F=360$ мм). Використовувалися дифракційні ґратки з 400 і 600 штрих/мм. Метеорні спектри сфотографовано на скляні платівки FOMAPAN 200 розміром 24×18 см. Зображення метеорів поділено на фрагменти за допомогою обтюратора з частотою обертання 15 с^{-1} , що розташовувався перед об'єктивом фотокамери.

Таблиця 3.1.

Дані спектральних спостережень метеорів, отриманих за допомогою дифракційної ґратки.

Дата	Тривалість експозиції, УТ	Координати проекції початку і кінця метеора	Висота появи та затування метеора, км	Дифракційна ґратка, штрих/мм
02.08.2011	20 ^h 10 ^m 06 ^s – 02 ^h 00 ^m 26 ^s	$\lambda_{\text{п}}=15.76993^{\circ}\text{E}$ $\varphi_{\text{п}}=49.38140^{\circ}\text{N}$ $\lambda_{\text{к}}=15.61661^{\circ}\text{E}$ $\varphi_{\text{к}}=49.13797^{\circ}\text{N}$	115.712 – 80.628	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 – 75.852	600
20.02.2012	17 ^h 40 ^m 20 ^s – 04 ^h 50 ^m 40 ^s	$\lambda_{\text{п}}=14.45623^{\circ}\text{E}$ $\varphi_{\text{п}}=50.18538^{\circ}\text{N}$ $\lambda_{\text{к}}=14.4547^{\circ}\text{E}$ $\varphi_{\text{к}}=50.31717^{\circ}\text{N}$	69.636 – 41.958	400
11.08.2012	19 ^h 50 ^m 30 ^s – 02 ^h 20 ^m 30 ^s	$\lambda_{\text{п}}=16.17354^{\circ}\text{E}$ $\varphi_{\text{п}}=50.61855^{\circ}\text{N}$ $\lambda_{\text{к}}=15.905^{\circ}\text{E}$ $\varphi_{\text{к}}=50.49733^{\circ}\text{N}$	109.521 – 76.057	600

Спектр метеора, отриманий 2 серпня 2011 року, показано на Рис. 3.1. Це був спорадичний метеор, що мав дуже ексцентричну орбіту з перигелійною відстанню 0.969 а.о. і кутом нахилу 79.7° . Напрямок польоту метеора – згори донизу. Спектр поділено на фрагменти за допомогою обтюратора. Зліва видно перший спектральний порядок, а посередині – частина другого спектрального порядку. Горизонтальні смуги показують зображення нульових спектральних порядків зір. У центрі знімка спостерігається зоря α Orh (Orphiuchus – Змієносець). На знімку видно місця підвищеної інтенсивності спектральних ліній. Чітко видно лінії першого та другого спектральних порядків. Можна помітити ледь видимі лінії CaII третього спектрального порядку. Дисперсія у першому спектральному порядку становить $45 \text{ \AA}/\text{мм}$. Охоплено спектральний діапазон $\lambda 3500\text{--}7000 \text{ \AA}$.

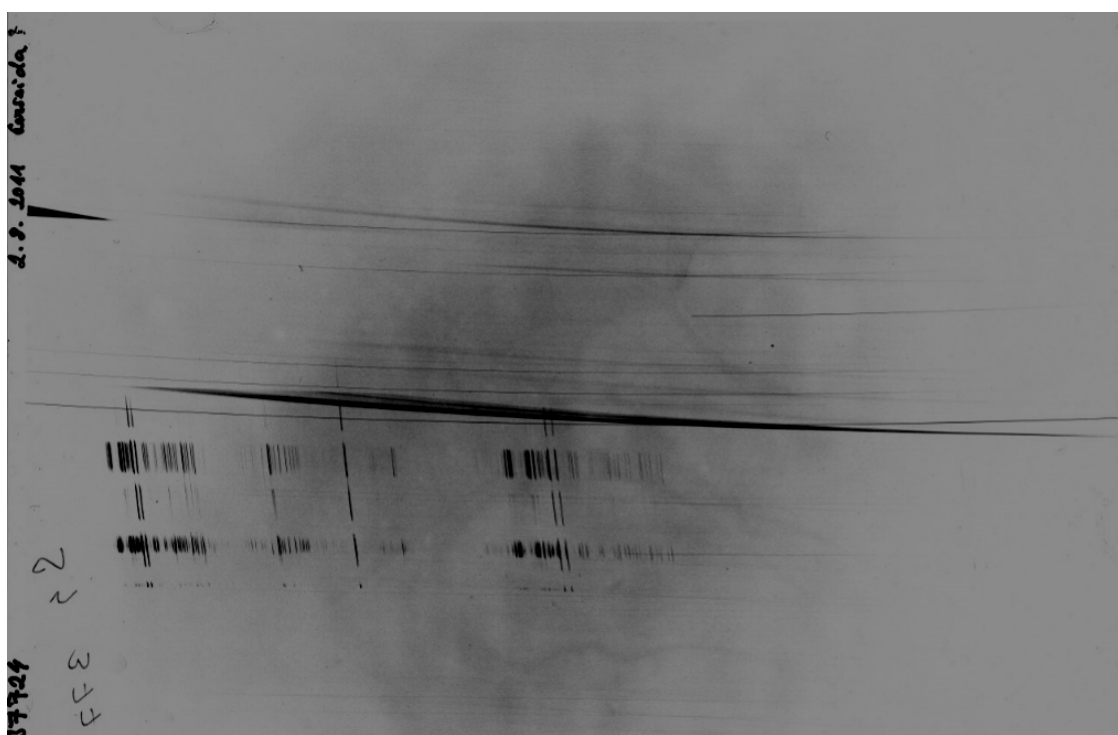


Рис. 3.1. Спектр метеора, спостережений 2 серпня 2011 року.

Спектр метеора, отриманий 27 серпня 2011 року (Рис. 3.2). Напрямок польоту метеора – згори донизу. Метеор був спорадичний. Спектр поділено на фрагменти за допомогою обтюратора. На знімку чітко зафіксовано

нульовий та перший спектральні порядки: ліворуч видно нульовий спектральний порядок, посередині – перший спектральний порядок. Праворуч ще простежується частина другого спектрального порядку. Чітко видно лінії у синій області другого спектрального порядку. Темні смуги – це зображення нульових спектральних порядків зір. У лівому кутку знімка є спектр Юпітера. Дисперсія у першому спектральному порядку становить 55 \AA/мм . Охоплено спектральний діапазон $\lambda 3600\text{--}6500 \text{ \AA}$.



Рис. 3.2. Спектр метеора, отриманий 27 серпня 2011 року.

Спектр метеора, спостережений 20 лютого 2012 року (Рис. 3.3) (праворуч на знімку). Напрямок польоту метеора – згори донизу. За допомогою обтюратора отримано більше 10 фрагментів спектра. Ліворуч видно спектр Полярної зорі. Темні смуги – це зображення нульових спектральних порядків зір. У центрі знімка – Полярна зоря. Метеор був спорадичний. На знімку всі фрагменти майже однакової інтенсивності, що свідчить про відсутність

спалаху. Дисперсія у першому спектральному порядку становить $65 \text{ \AA}/\text{мм}$. Охоплено спектральний діапазон $\lambda 3600\text{--}6500 \text{ \AA}$.

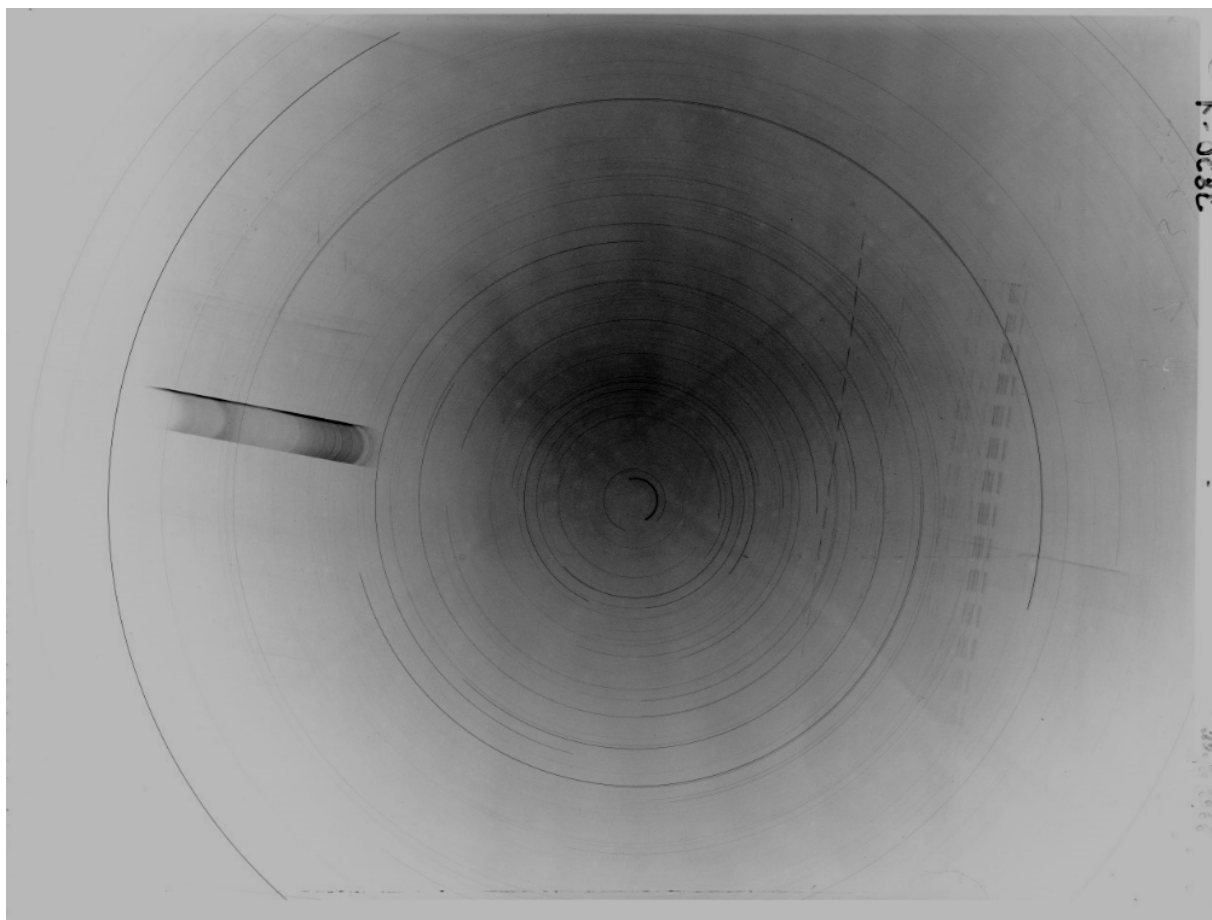


Рис. 3.3. Спектр метеора, отриманий 20 лютого 2012 року (праворуч).

Спектр метеора, який спостерігався 11 серпня 2012 року показано на Рис. 3.4. Метеор рухався згори донизу. Він належав до метеорного потоку Персеїди. Спектр поділений на фрагменти за допомогою обтюратора. На знімку спостерігаються нульовий (зліва) і перший (посередині) спектральний порядки, видно слабкі лінії другого спектрального порядку (праворуч). Дисперсія у першому спектральному порядку становить $65 \text{ \AA}/\text{мм}$. Охоплено спектральний діапазон $\lambda 3600\text{--}6500 \text{ \AA}$. Темні смуги – це зображення нульових спектральних порядків зір. Темні смуги в нижній частині знімка показують спектр Місяця. Найяскравіший фрагмент спектра частково перекривається

спектром Місяця, що ускладнює процес обробки цієї частини спектра, але саме тут міститься найбільша кількість спектральних ліній.

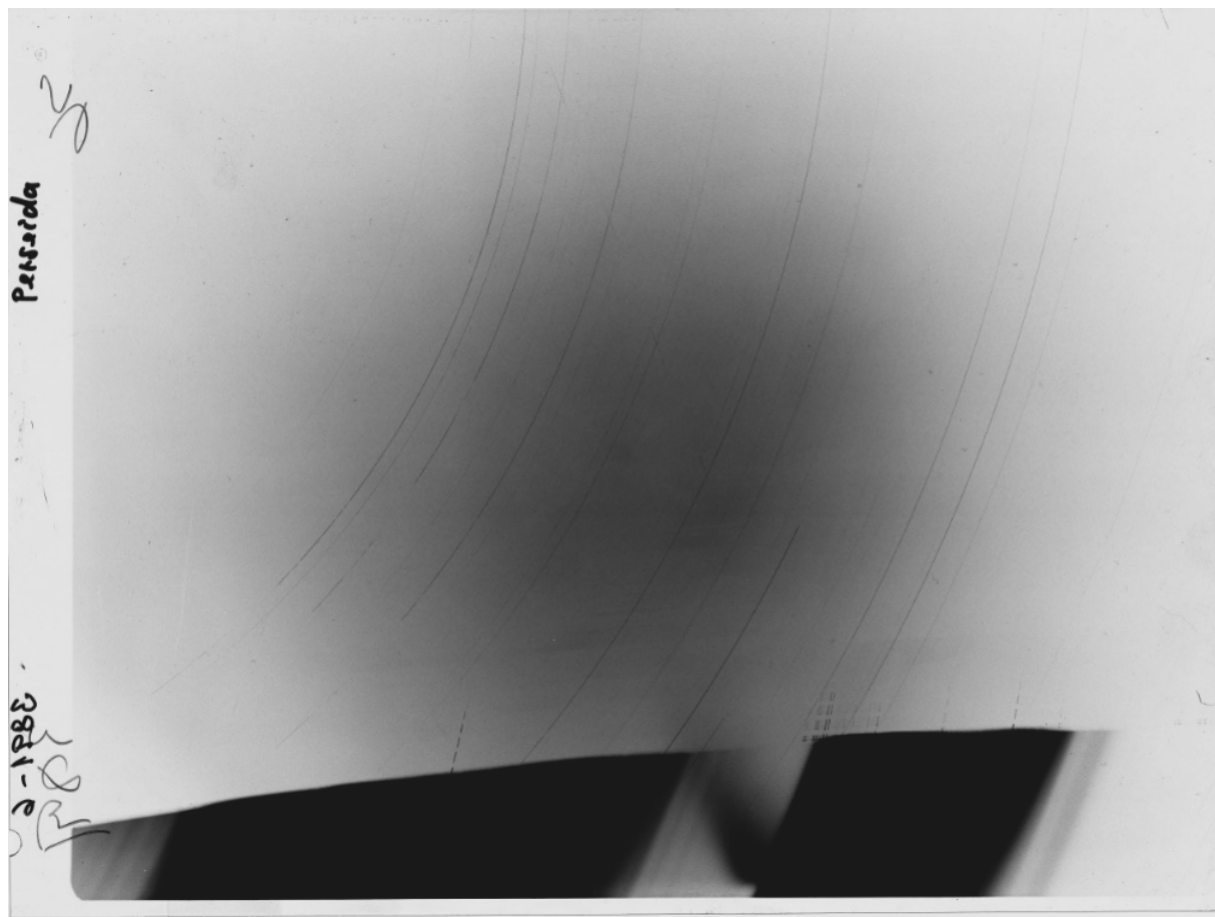


Рис. 3.4. Спектр метеора, який спостерігався 11 серпня 2012 року.

Зображення спектрів досліджуваних метеорів, отриманих за допомогою оптичних призм, представлені на Рис. 3.5–3.6. Спектри отримано досить давно, тому супровідної інформації про умови спостережень майже не збереглося, однак здійснено спробу провести якісний аналіз цих спектрів. Відомо, що спектр метеора 10 серпня 1965 року отримано В.О. Смірновим на спостережній станції Одеської обсерваторії в с. Крижанівці. Знімок метеорного спектра представлений на Рис. 3.5. На жаль, траєкторія польоту та координати початку і кінця видимого шляху метеора не відомі. Проте відомо, що метеор належав до потоку Персеїди. Швидкість його руху в атмосфері становила 60 км/с [3]. Фотографування спектра здійснювалося

метеорним патрулем, що складався з трьох аерофотокамер НАФА 3с/25 з об'єктивами “Уран-9”, дві з яких були оснащені репліками дифракційних ґратокз 300 штрих/мм, а одна – 17-градусною об'єктивною призмою. Саме нею отримано даний спектр. Метеор спостерігався в 01^h15^m за місцевим часом. Тривалість експозиції становила 1^h21^m.



Рис. 3.5. Спектр метеора потоку Персеїди, отриманий 10 серпня 1965 року наспостережній станції Крижанівка Одеської астрономічної обсерваторії (спостерігач В.О. Смірнов).

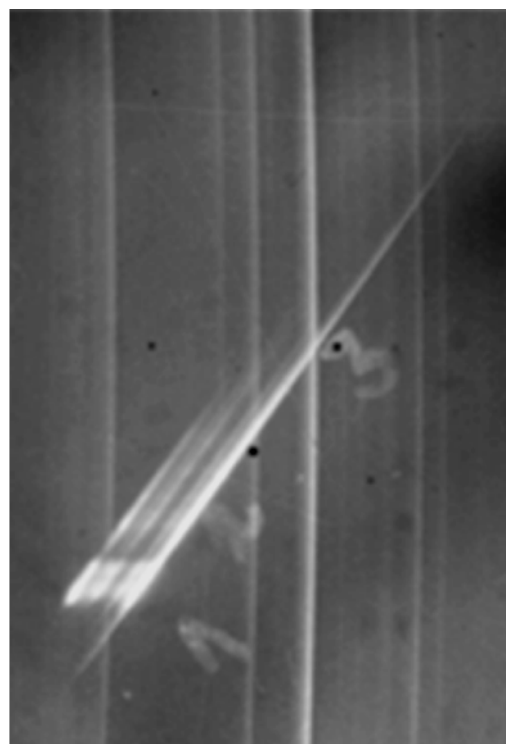
Спектр (Рис. 3.5) частково опрацьований самим спостерігачем. Для даного метеора визначено сумарне випромінення спектра метеора, число випромінюючих атомів, відносні інтенсивності, які отримані за допомогою шкали метеорного спектросенситометра, сконструйованого Смірновим В.О., та “зоряної” характеристичної кривої [3].

Спектри двох метеорів потоку Оріоніди, які спостерігалися К.А. Любарским 21–22 жовтня 1958 року в Ашхабадській астрофізичній лабораторії показано на Рис. 3.6. На знімках траєкторія польоту метеорів згори вниз. Довжини хвиль в спектрі зростають зліва направо.

Всі три призмові спектри метеорів (Рис. 3.5–3.6) відскановано за допомогою сканера Epson Expression 10000XL з роздільною здатністю 1200 dpi в Головній астрономічній обсерваторії НАН України.



21 жовтня 1958 року



22 жовтня 1958 року

Рис. 3.6. Спектри двох метеорів потоку Оріоніди, які спостерігалися 21–22 жовтня 1958 року в Ашхабадській астрофізичній лабораторії (спостерігач К.А. Любарский).

3.1.2. Фотометрична обробка спектрів досліджуваних метеорів.

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 Spscal розроблена для ідентифікації спектральних ліній та калібрування інтенсивностей;

- програма Bin2csv дає можливість конвертувати вихідні файли ПЗ Fishscan і Spscal у файли з розширенням .csv та .xls для роботи в табличних редакторах.

Фотоплатівки 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. 3.7 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 [130]. Співвідношення обох спектрів дали функцію

спектральної чутливості, представлену на Рис. 3.8. Видно, що максимум чутливості лежить в області $\lambda 4500 \text{ \AA}$, а мінімум – в області $\lambda 5200 \text{ \AA}$.

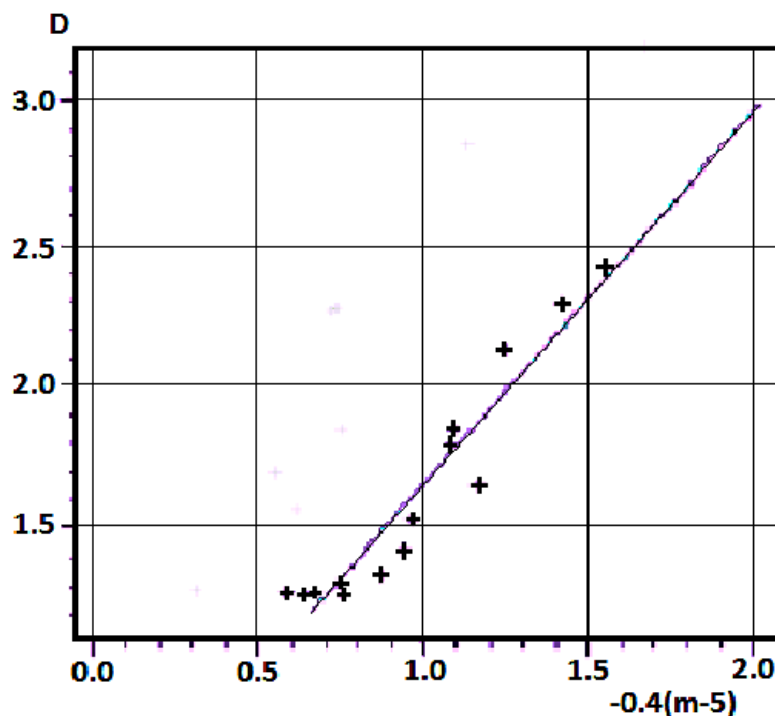


Рис. 3.7. Характеристична крива платівки, що відображає залежність густини почорніння від величини падаючого потоку випромінювання зір, що мають зоряну величину m . Хрестиками позначено фотометричні дані для окремих зір.

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 [130].
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 вспектрі метеора.

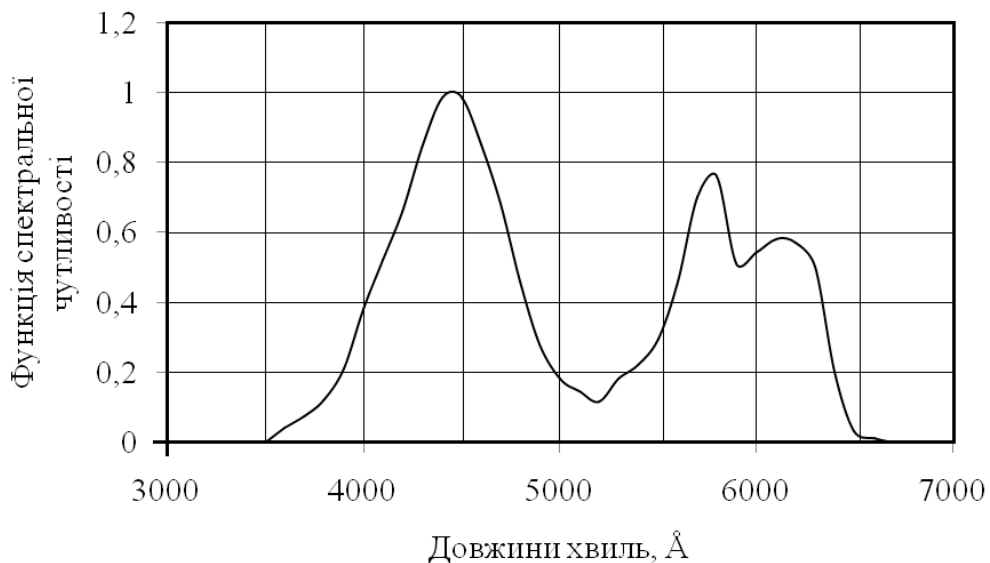


Рис. 3.8. Відносна спектральна чутливість спектрографа. Максимум чутливості лежить в області $\lambda 4500 \text{ \AA}$, а мінімум – в області $\lambda 5200 \text{ \AA}$.

3.2. Ототожнення спектральних ліній.

Для ідентифікації спектральних ліній в спектрі метеора, отриманого 2 серпня 2011 року, досліджувалась найяскравіша частина першого спектрального порядку, тобто під час основного спалаху, що відбувся на висоті $h=83.5\text{--}84.5$ км (Рис.3.9). Величина фону визначалася в областях, чистих від спектрів метеора чи зір. Спектр містить багато окремих емісійних ліній, що належать атомам різних хімічних елементів. У синій області спектра лінії не чіткі, однак вони також ідентифіковані. Детальна спектрограма, за допомогою якої проводилося ототожнення спектральних ліній в дослідженому метеорному спектрі, наведена на Рис. 3.10. По осі абсцис відкладено довжини хвиль емісійних ліній в \AA , а по осі ординат – інтенсивності спектральних ліній в $\text{erg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{\AA}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$. Проведено калібрування вимірювань довжин хвиль. Масштаб довжин хвиль визначався за відомими

лініями в спектрі [8]. Поліном третього степеня було використано для переходу від інструментальних довжин хвиль до довжин хвиль емісійних ліній в Å.

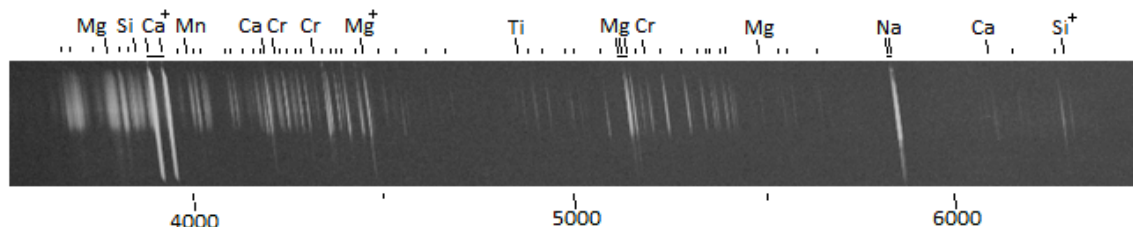


Рис. 3.9. Спектр метеора, спостереженого 2 серпня 2011 року у найяскравішій точці траєкторії, а саме під час основного спалаху на висоті $h=83.5-84.5$. Над спектром указано назви основних емісійних ліній. Штрихами позначено лінії, що належать залізу.

У дослідженому спектрі метеора було ототожнено 125 емісійних ліній. Ідентифікація спектральних ліній здійснювалася на основі створеного й описаного в пункті 4.1 каталогу [18] та з використанням робіт [8, 14, 128]. У спектрі зареєстровано лінії атомів CrI, FeI, MgI, SiI, AlI, MnI, CaI, TiI, NaI та іонів FeII, CaII, MgII, TiII, SiII. Результати ідентифікації спостережених емісійних ліній представлено в Додатку А, де приведено наступні дані: номер і спостережену довжину хвилі λ_{obs} кожної емісійної лінії в Å, довжини хвиль λ спектральних ліній відповідно до каталогів [8, 14, 128] в Å, назву атома і номер мультиплету, інтенсивність I спектральних ліній у відносних одиницях та інтенсивність I_{abs} в $\text{erg s}^{-1} \text{Å}^{-1} \text{sr}^{-1}$, різниця $|\Delta\lambda|$ між спостереженими і теоретичними довжинами хвиль в Å. Результати опубліковано в роботі [19].

Фотометрична обробка та ідентифікація спектральних ліній усіх інших спектрів, представлених в роботі, здійснювалася аналогічно обробці спектра метеора, спостереженого 2 серпня 2011 року.

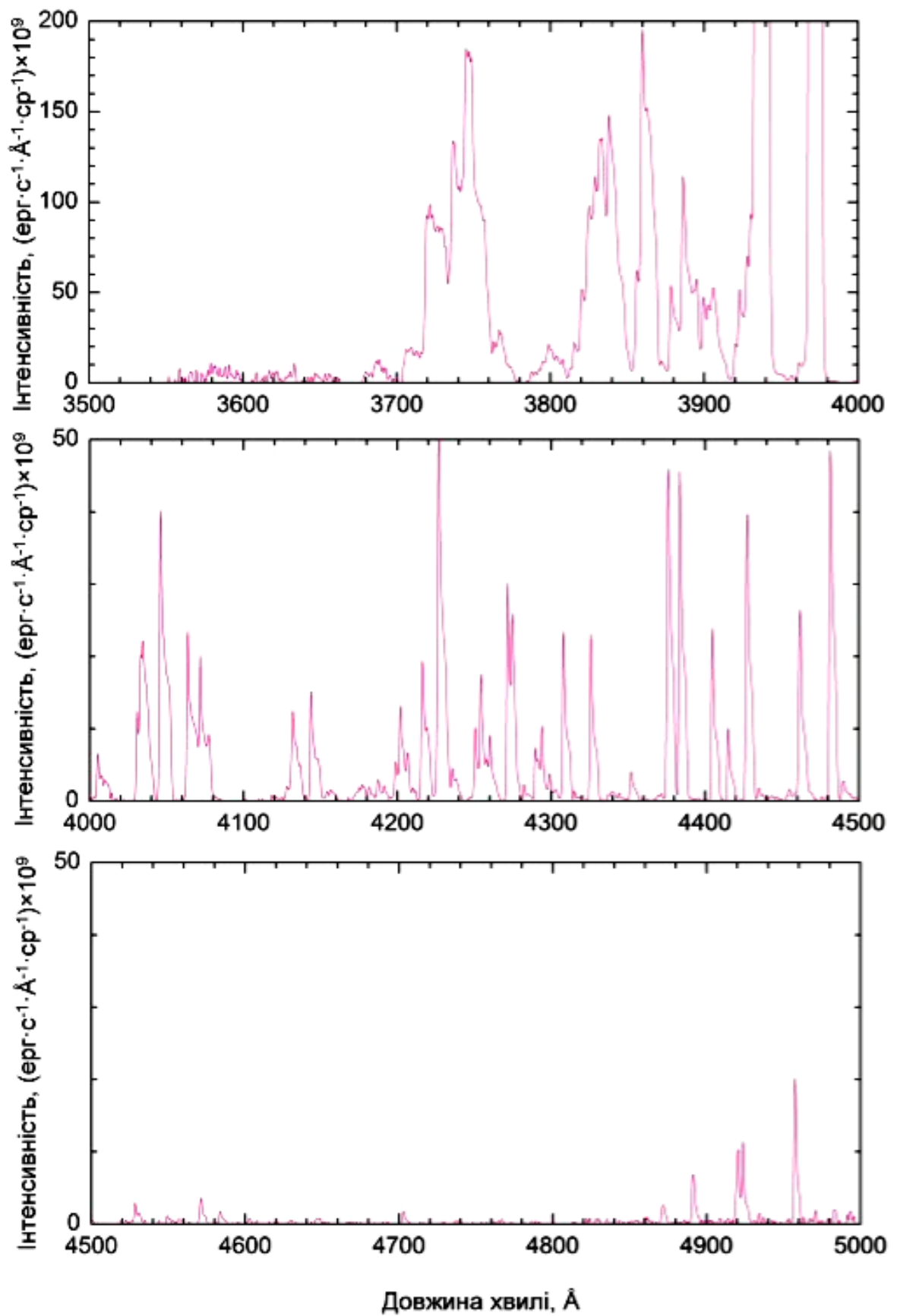


Рис.3.10. Спектрограма метеора, спостереженого 2 серпня 2011 року.

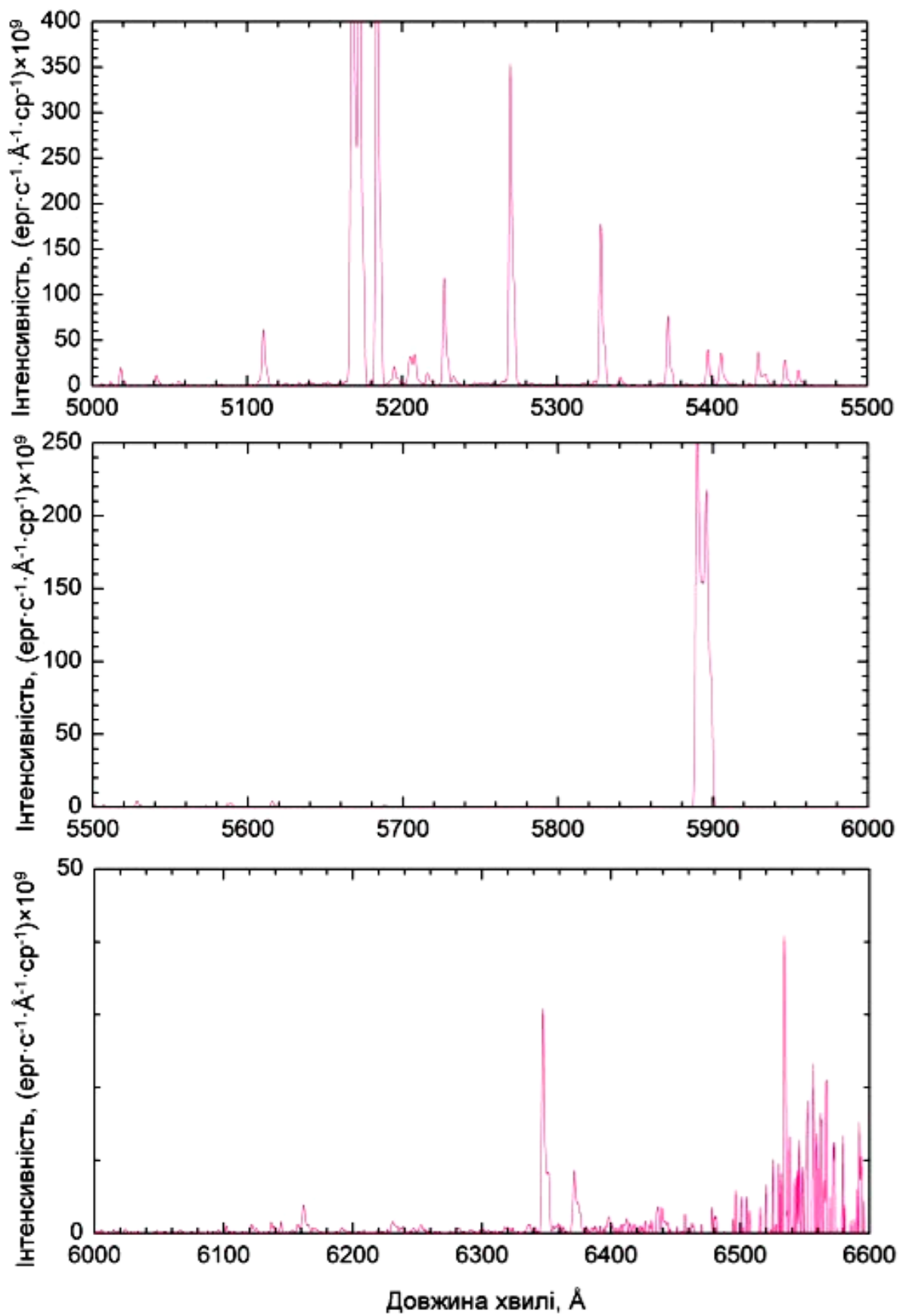


Рис. 3.10. (продовження) Спектрограма метеора, спостереженого 2 серпня 2011 року.

Для ідентифікації спектральних ліній в спектрі метеора, який спостерігався 27 серпня 2011 року, досліджувався фрагмент першого спектрального порядку під час основного спалаху метеора, що відбувся на висоті $h=79.5-82.2$ км (Рис.3.11). Величина фону визначалася також в області між сегментами, чистій від спектрів. Детальна спектрограма представлена на Рис. 3.12.

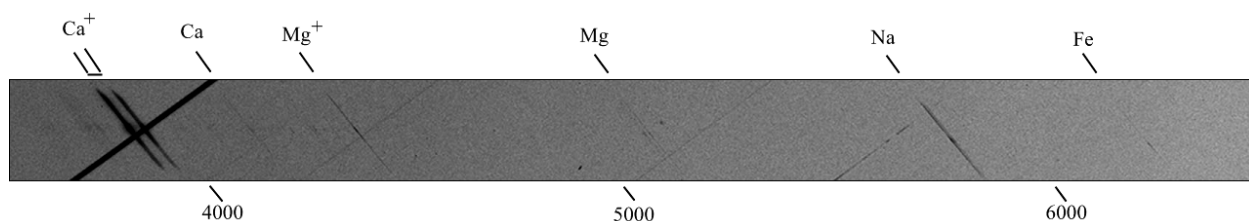


Рис. 3.11. Спектр метеора, який спостерігався 27 серпня 2011 року.

У досліджуваному спектрі метеора було виявлено 25 емісійних ліній. У спектрі виявлено лінії атомів FeI, MgI, CaI, NaI та іонів CaII, MgII, SiII. Результати ідентифікації спостережуваних спектральних ліній подано в Додатку Б.

Детальні спектрограми метеорів, які спостерігалися 20 лютого 2012 року та 11 серпня 2012 року показані на Рис. 3.13 і 3.14, а результати ідентифікації спектральних ліній представлені в Додатках В і Д.

Для призмових метеорних спектрів, що досліджувалися, через відсутність даних спостережень лише якісно визначено хімічний склад метеорних тіл. Спектри отримані з нелінійною дисперсією, в результаті чого спектральна роздільна здатність у фіолетовій частині спектра краща, ніж у червоній. Тому на досліджуваних спектрограмах, отриманих за допомогою призми, не спостерігається чітких емісійних ліній атомів хімічних елементів. Натомість маємо сукупність смуг, які являють собою скупчення емісійних ліній.

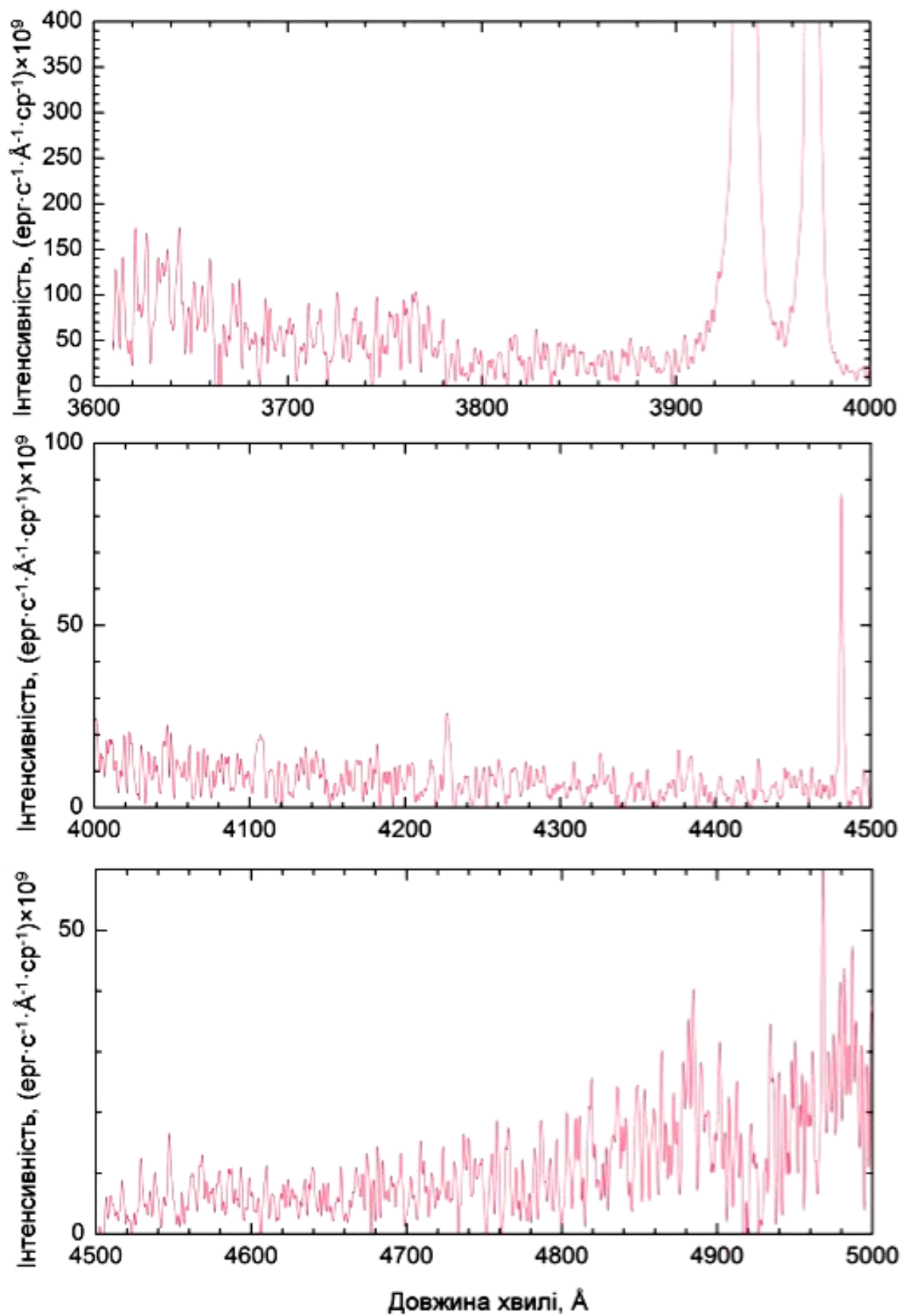


Рис. 3.12. Спектрограма метеора, спостереженого 27 серпня 2011 року.

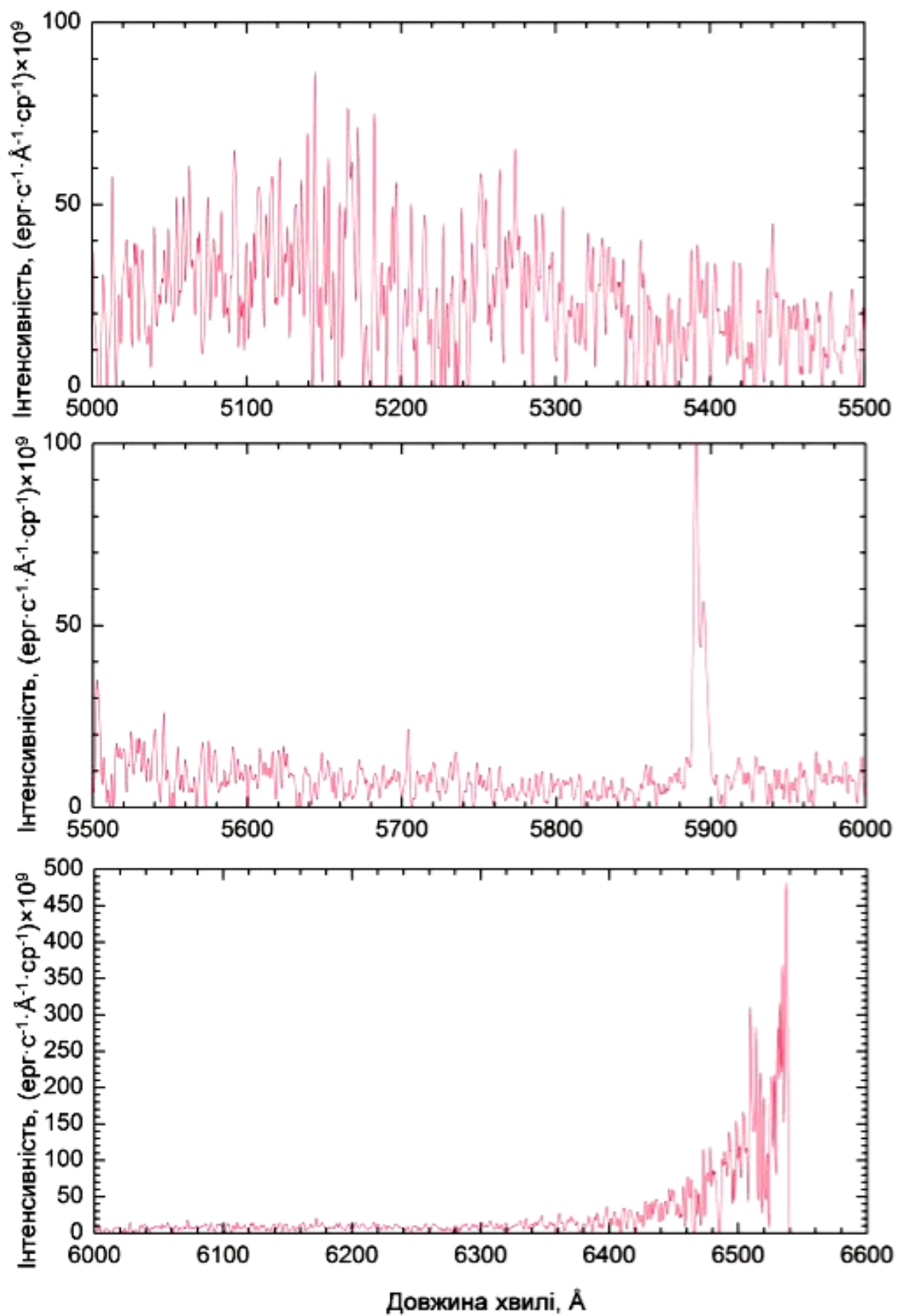


Рис. 3.12. (продовження) Спектрограма метеора, спостереженого 27 серпня 2011 року.

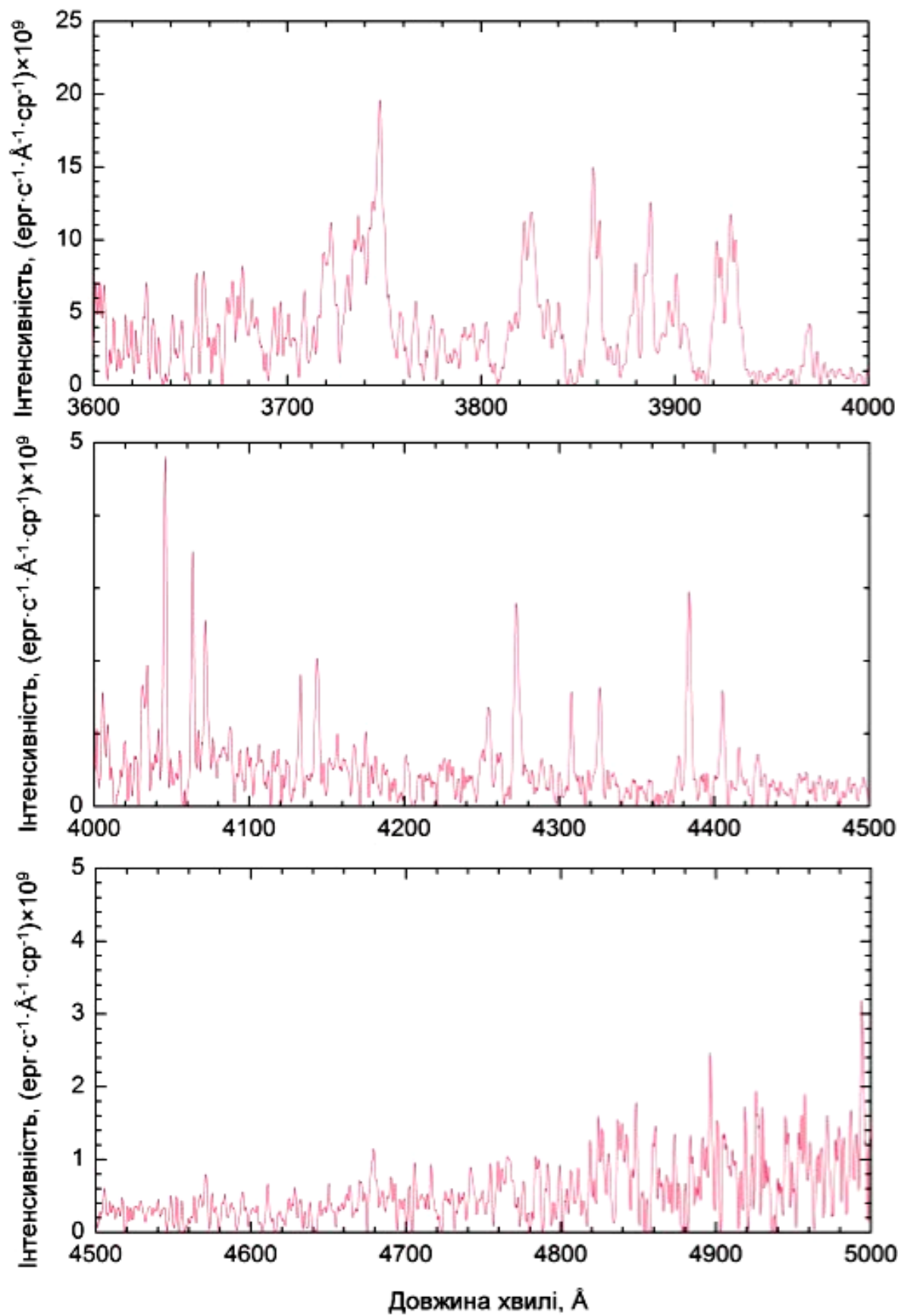


Рис. 3.13. Спектрограма метеора, спостереженого 20 лютого 2012 року.

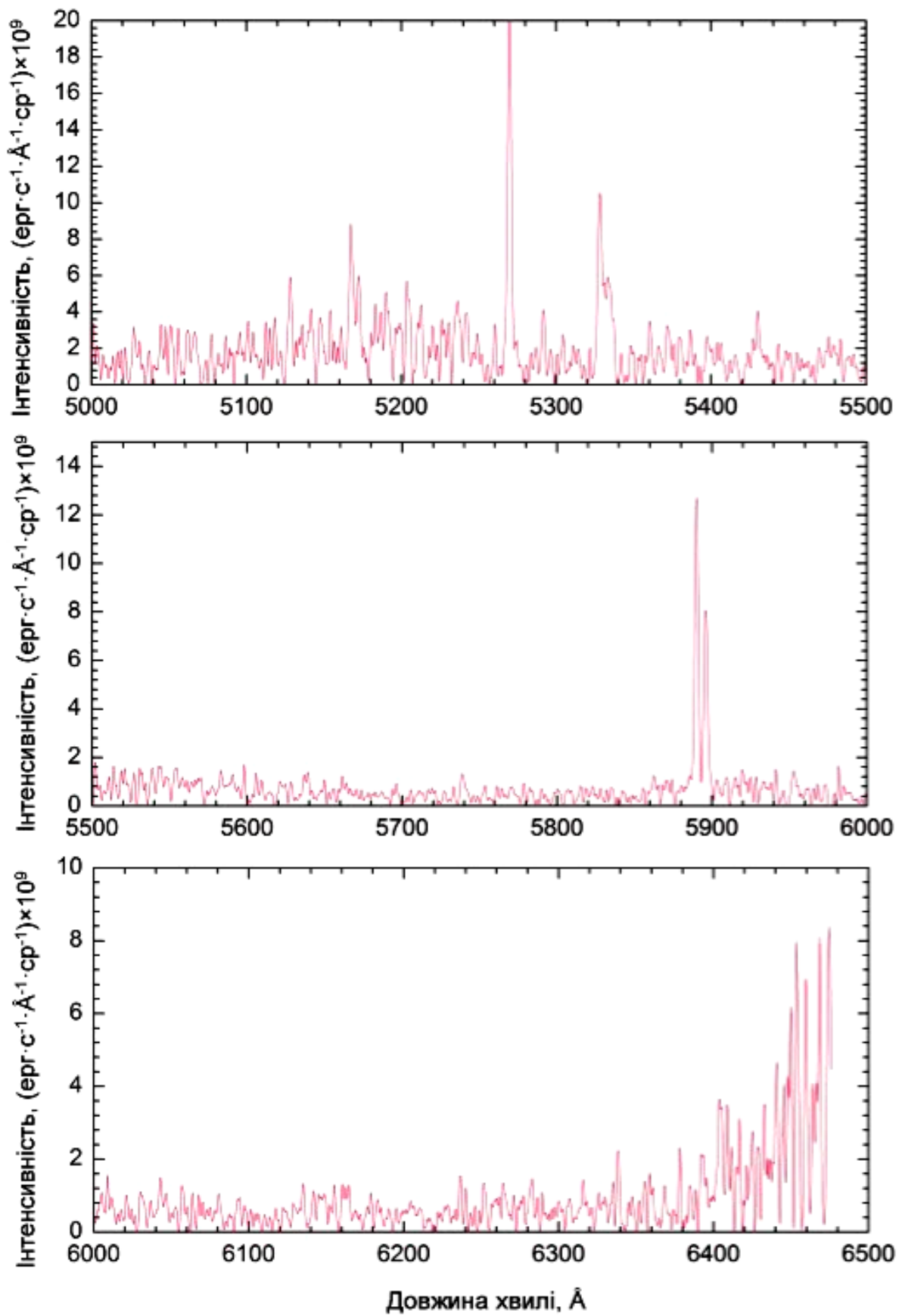


Рис. 3.13. (продовження) Спектрограма метеора, спостереженого 20 лютого 2012 року.

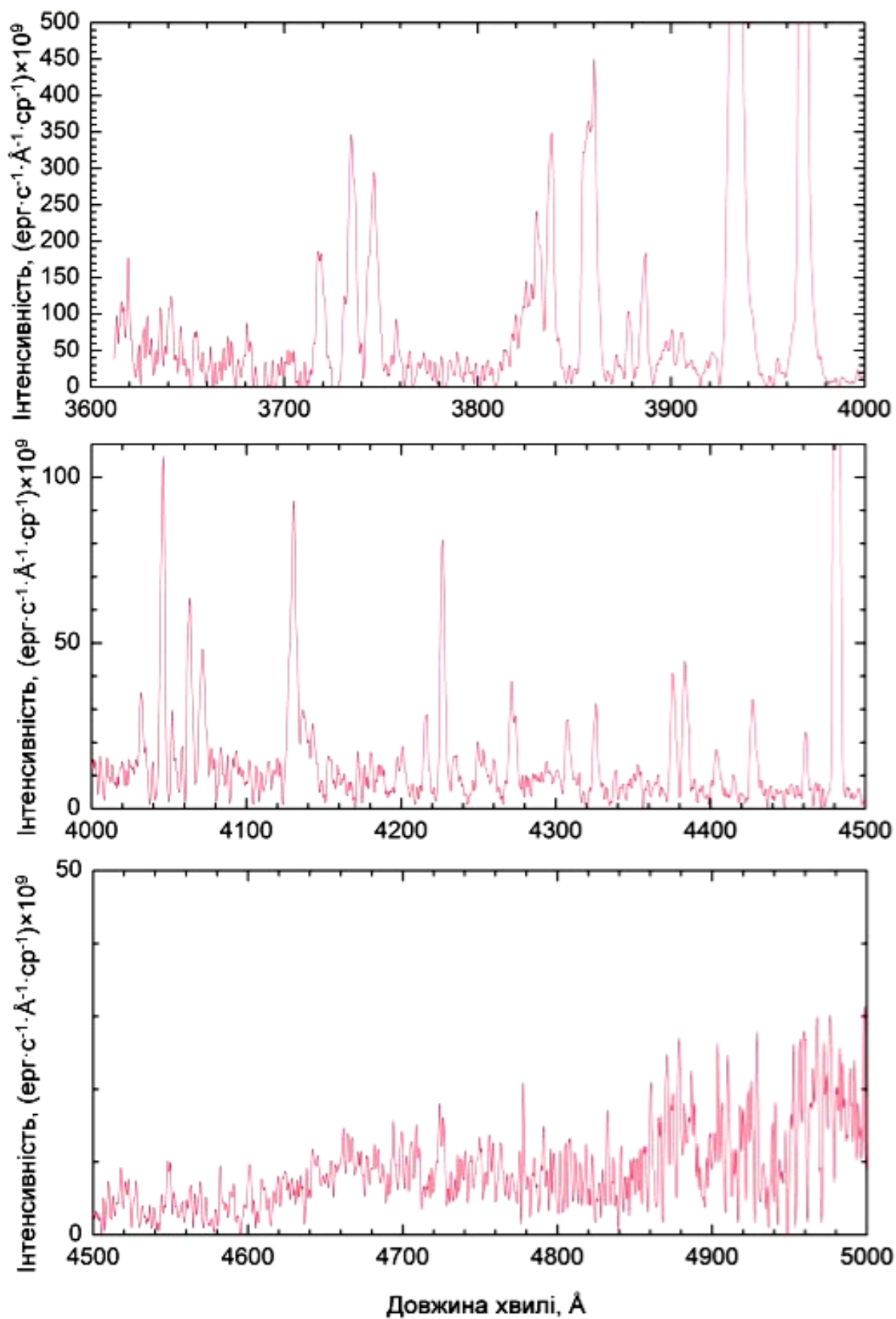


Рис. 3.14. Спектрограма метеора, спостереженого 11 серпня 2012 року.

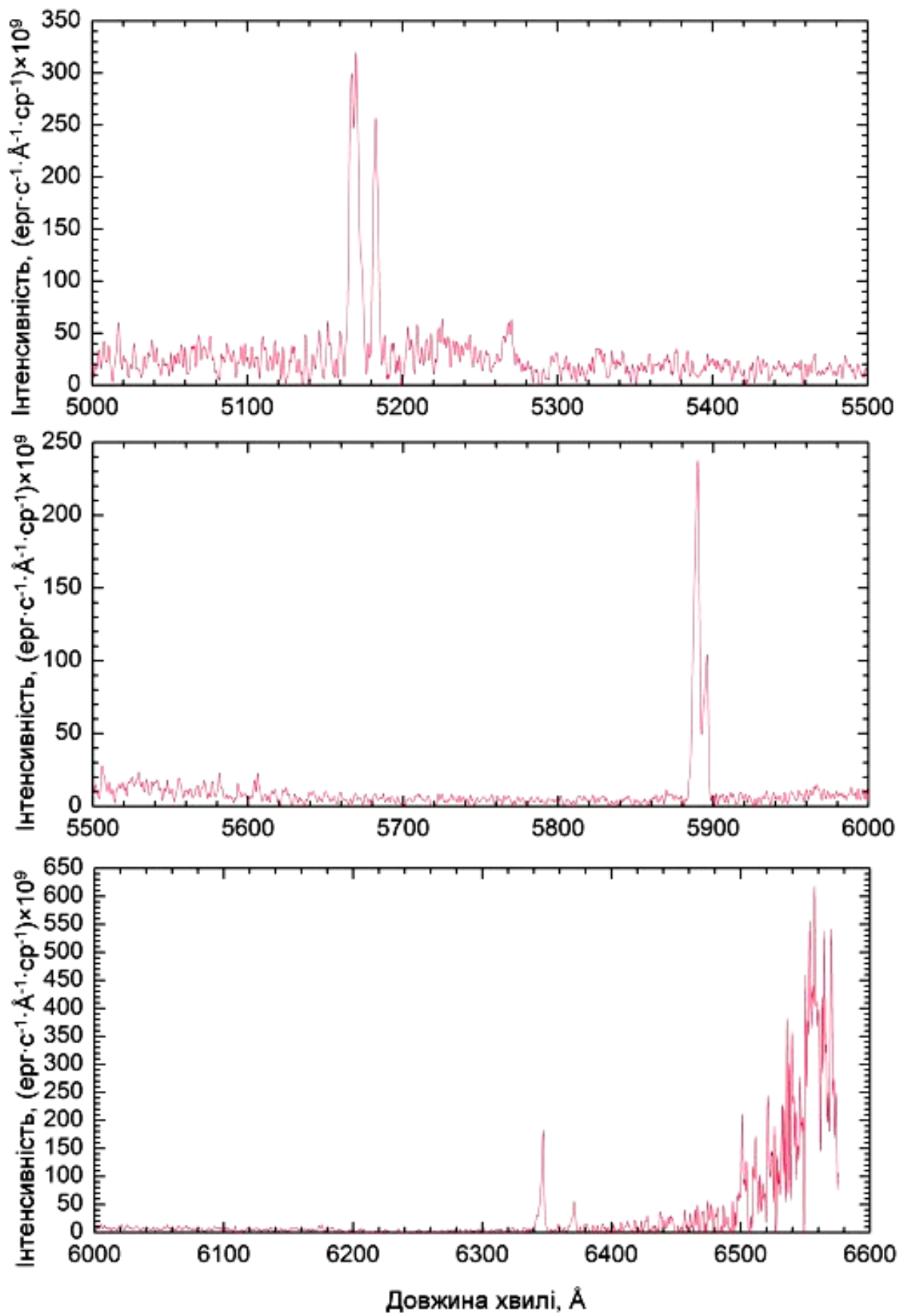


Рис. 3.14. (продовження) Спектрограма метеора, спостереженого 11 серпня 2012 року.

Призмові спектрограми метеорів, які спостерігалися у найяскравішій точці траєкторії, тобто під час спалаху, зображені на Рис. 3.15–3.17. У кожному спектрі спостерігається близько десяти емісій. Їх ідентифікацію здійснено з використанням таблиці спектральних ліній, побудованої для призмового спектра метеора EN 090897, що належав до метеорного потоку Персеїди [10]. Результати ототожнення емісій подано в Таблицях 3.2–3.4. У дужках наведено номери мультиплетів відповідно до [12].

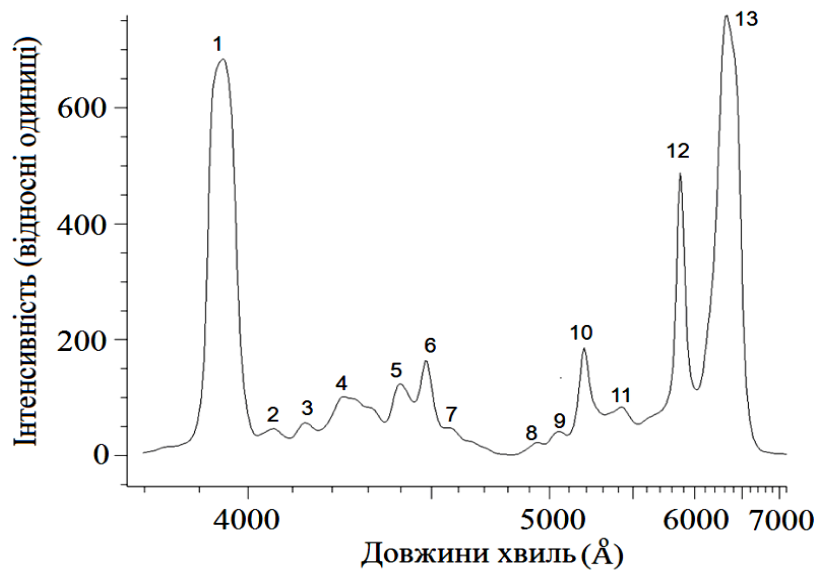


Рис. 3.15. Спектр метеора потоку Оріоніди, отриманий 21 жовтня 1958 року (К.А. Любарский, Ашхабадська астрофізична лабораторія).

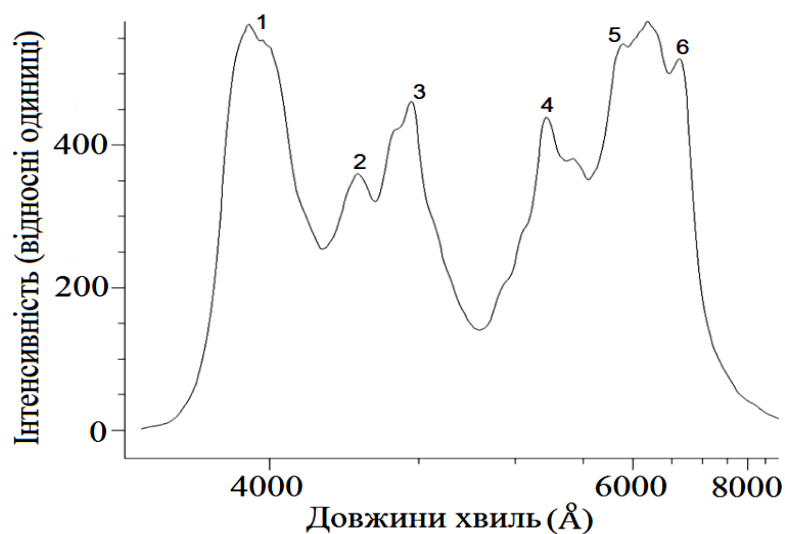


Рис. 3.16. Спектр метеора потоку Оріоніди, отриманий 22 жовтня 1958 року (К.А. Любарский, Ашхабадська астрофізична лабораторія).

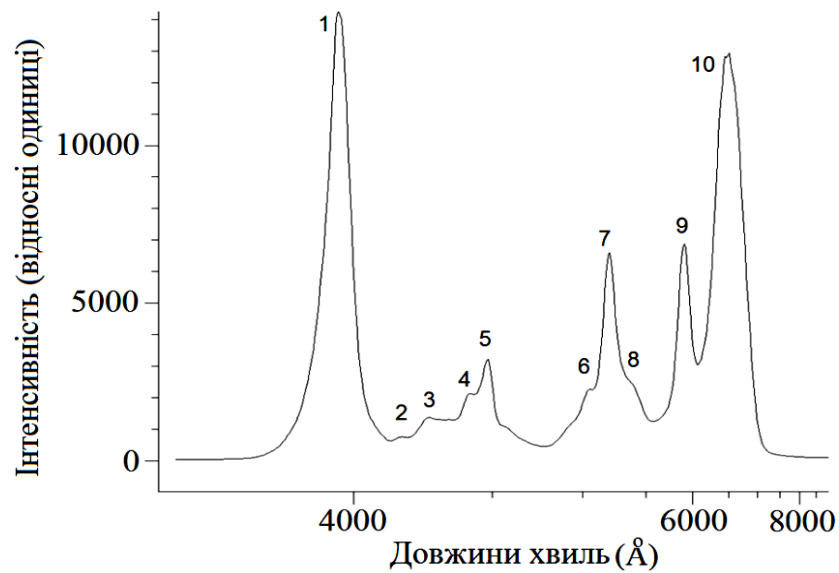


Рис. 3.17. Спектр метеора потоку Персеїди, отриманий 10 серпня 1965 року (В.О. Смірнов, спостережна станція Крижанівка Одеської астрономічної обсерваторії).

Таблиця 3.2.

Основні емісії в спектрі метеора, який спостерігався 21 жовтня 1958 року.

№	Довжина хвилі головного компонента, Å	Головний компонент	Вторинний компонент
1	3934	CaII (1)	
2	4046	FeI (43)	MnI (2)
3	4132	FeI (43)	
4	4227	CaI (2)	FeI (42), CrI (1)
5	4405	FeI (41)	FeI (2)
6	4481	MgII (4)	FeI (2)
7	4529	FeI (68)	MgI (1)
8	4958	FeI (318)	FeII (42)
9	5110	FeI (1)	FeI (16), FeI (36)
10	5167	MgI (2)	FeI (16), FeI (37)
11	5270	FeI (15)	Fe I (37)
12	5890, 5895	NaI (1)	N ₂
13	[6305]	N ₂	SiII (2)

Таблиця 3.3.

Основні емісії в спектрі метеора, який спостерігався 22 жовтня 1958 року.

№	Довжина хвилі головного компонента, Å	Головний компонент	Вторинний компонент
1	3934, 3968	CaII (1)	
2	4128	SiII (3)	FeI (43)
3	4481	MgII (4)	FeI (2)
4	5167	MgI (2)	FeI (1), FeII (42)
5	5890,5895	NaI (1)	N ₂
6	[6305]	N ₂	SiII (2)

Таблиця 3.4.

Основні емісії в спектрі метеора, який спостерігався 10 серпня 1965 року.

№	Довжина хвилі головного компонента, Å	Головний компонент	Вториннийкомпонент
1	3934, 3968	CaII (1)	
2	4128	SiII (3)	FeI (43)
3	4227	CaI (2)	FeI (42), CrI (1)
4	4415	FeI (41)	FeI (2)
5	4481	MgII (4)	FeI (2)
6, 7, 8	5167	MgI (2)	FeI (1), FeII (42)
9	5890,5895	NaI (1)	N ₂
10	[6305]	N ₂	SiII (2)

3.3. Зміна спектра метеора з часом і висотою.

На Рис. 3.18 показано розвиток спектра метеора з часом, який спостерігався 10 серпня 1965 року. По осі ординат відкладено інтенсивність спектральних емісій у відносних одиницях, а по осі абсцис – відповідні довжини хвиль в Å. В приведених спектрограмах спектральна чутливість апаратури не врахована. Основні емісії у спектрі пронумеровані на Рис. 3.18г.

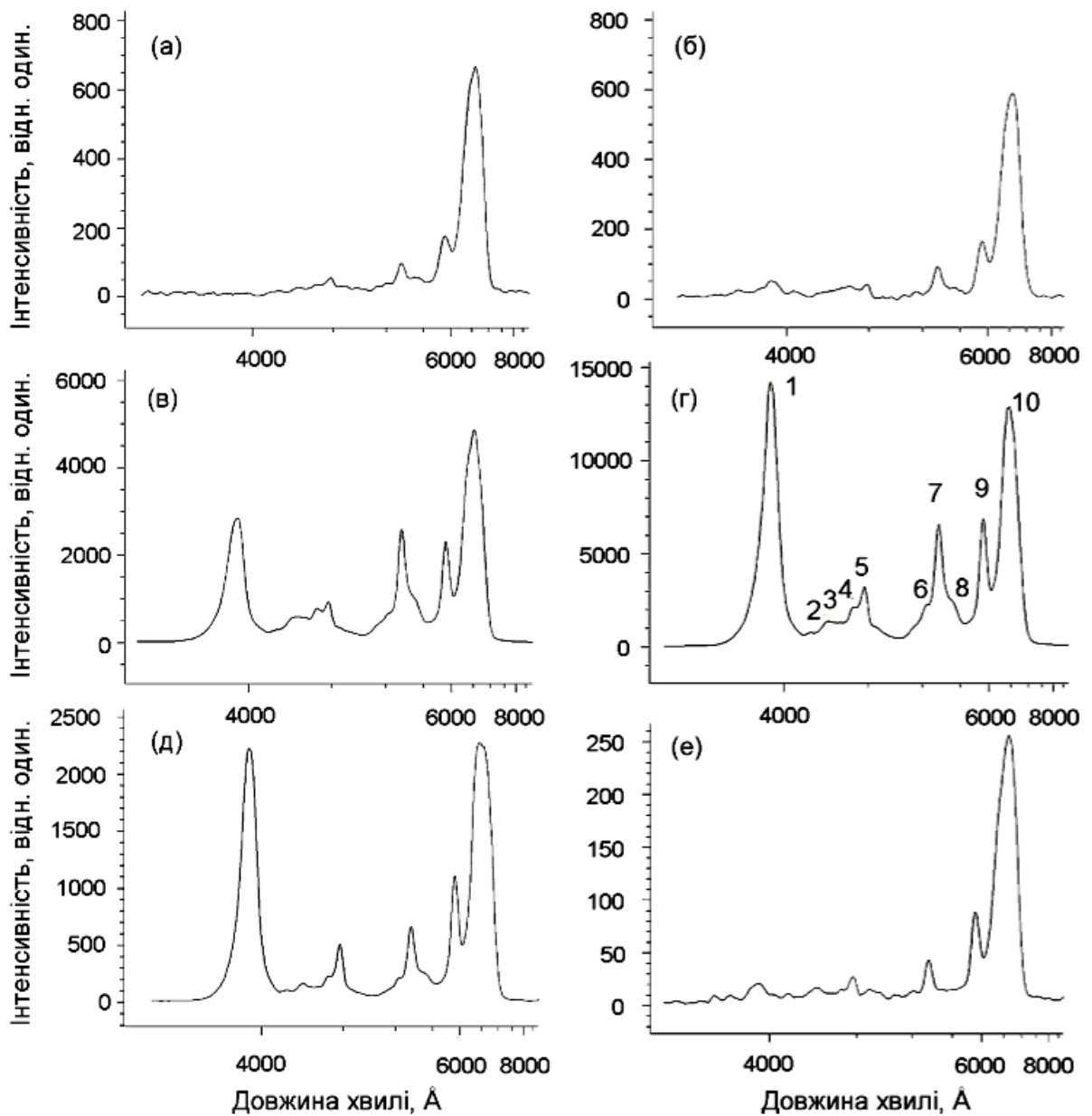


Рис. 3.18. Зміна з часом спектра метеора, який спостерігався 10 серпня 1965 року.

На Рис. 3.18 (а, б, в) представлено спектрограми метеора з моменту початку світіння до моменту спалаху. В них домінує смуга молекули N_2 , що має атмосферне походження. Спостерігається зростання інтенсивностей емісійних ліній в спектрі метеора зі зменшенням висоти.

Більшість особливостей проявляються в спектрі саме під час спалаху метеора (Рис. 3.18г). Інтенсивності емісій досягають максимальних значень.

Як видно на спектрограмі, в ній домінує смуга, що утворена із спектральних ліній різних елементів, серед яких основним компонентом є емісійні лінії іонізованого кальцію. Після спалаху інтенсивності ліній різко зменшуються (Рис. 3.18e).

На Рис. 3.19 представлено еволюцію спектра метеора, який спостерігався 2 серпня 2011 року, вздовж усього видимого шляху метеора.

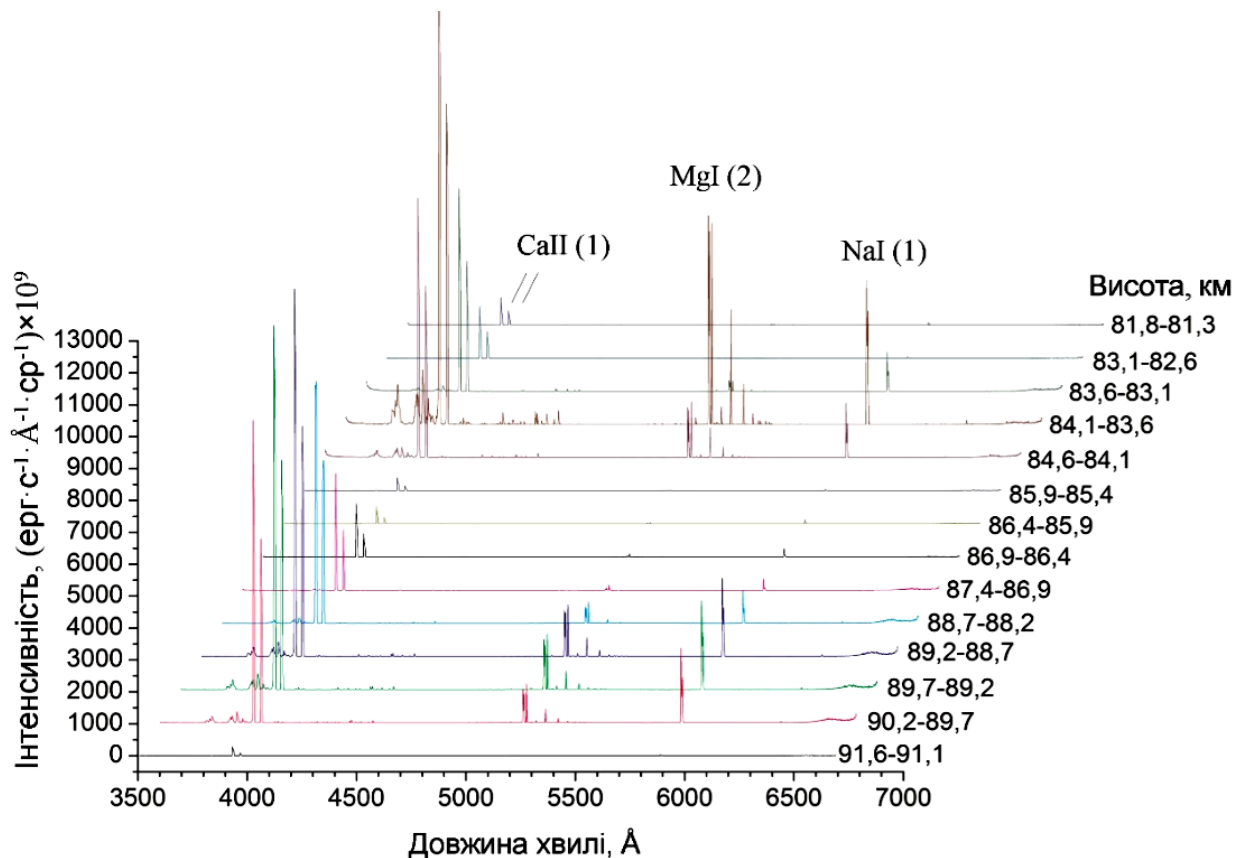


Рис. 3.19. Зміна спектра метеора, спостереженого 2 серпня 2011 року з висотою.

Відповідно до [131], у спектрах метеорів виділяють два компонента: головний компонент, який утворюється за температури ~ 4400 К, та вторинний компонент, або високотемпературний, який появляється при температурі $\sim 10\ 000$ К. До основного компоненту належать лінії нейтральних атомів, до високотемпературного – лінії іонізованих атомів. У червоній частині спектра спостерігається смуга молекули азоту.

І. Боровічка і Е. Майден [10] висловлюють припущення, що високотемпературний компонент в спектрах метеорів, до якого належать і лінії Ca II, пов'язаний з утворенням ударної хвилі перед метеороїдом. Інтенсивність високотемпературного компонента зростає у момент, коли довкола метеороїда формується так званий режим безперервного потоку, тобто, коли довжина вільного пробігу молекул у плазмі стає меншою за розміри самого метеороїда.

3.4. Визначення температури збудження атомів заліза FeI.

З. Цеплеха за декількома спектрами яскравих болідів визначив температуру збудження T для заліза в діапазоні 3000–4000 К, для натрію – 4120 К, для кальцію – 5280 К, для кисню – 14 000 К. Японський астроном К. Нагасава підтвердив результат для заліза, отримавши за дослідженнями двох спектрів в середньому $T \approx 3190$ К, американський дослідник Г. Харві отримав для магнію $T = 3250$ К. Різноманіття температур для різних хімічних елементів, і навіть для різних груп мультиплетів заліза, показує, що в метеорній комі не реалізується умова термодинамічної рівноваги і не реалізується больцманівський розподіл електронів за рівнями з єдиною температурою. З. Цеплеха в ряді робіт оцінив концентрації дев'яти елементів в метеорній комі [16].

Одним із завдань кількісного аналізу спектрів метеорів є визначення температури збудження атомів в метеорній комі. При цьому слід пам'ятати, що метеорна плазма не перебуває в стані термодинамічної рівноваги [2, 71, 123]. Випромінювання в кожній лінії певного елемента має різну оптичну товщину. У кількісному дослідженні цих ліній необхідно враховувати ефект самопоглинання в емісійних лініях. Для вирішення цього завдання, застосовують метод емісійних кривих росту (ЕКР), описаний в пункті 2.5, який ґрунтується на припущенні локальної термодинамічної рівноваги в об'ємі випромінювання і враховує ефект самопоглинання в спектральних лініях [71, 77, 132]. За цими припущеннями визначаються

інтенсивності окремих емісійних ліній, за якими знаходиться температура збудження атомів даного хімічного елемента.

Для визначення температури збудження атомів заліза FeI було досліджено спектр метеора, отриманий 2 серпня 2011 року, в якому зареєстровано найбільше ліній заліза (Рис. 3.20).

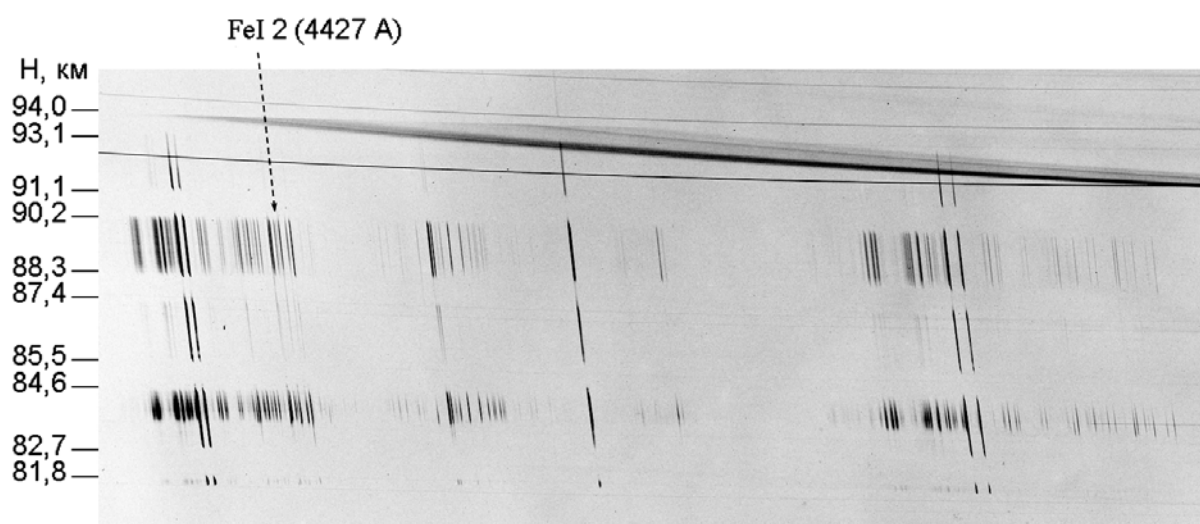


Рис. 3.20. Спектр метеора, який спостерігався 2 серпня 2011 року. Напрямок польоту метеора проходив згори донизу. Спектр поділений на фрагменти через перекриття сліду метеора обтюратором. В лівій частині спектра видно перший спектральний порядок, посередині – частина другого спектрального порядку. Горизонтальні смуги – це зображення нульових спектральних порядків зір.

Використовуючи метод ЕКР, було визначено температуру збудження атомів заліза FeI для різних висот польоту метеора. Результати цих розрахунків представлено на Рис. 3.21. По осі абсцис – значення енергії E_2 найвищого рівня у атомі в еВ, по осі ординат – відповідні значення $\lg(I^3/gf)$, де I – інтенсивність випромінювання, gf – сила осцилятора. Для покращення точності та достовірності результатів взято 57 окремих спектральних ліній FeI.

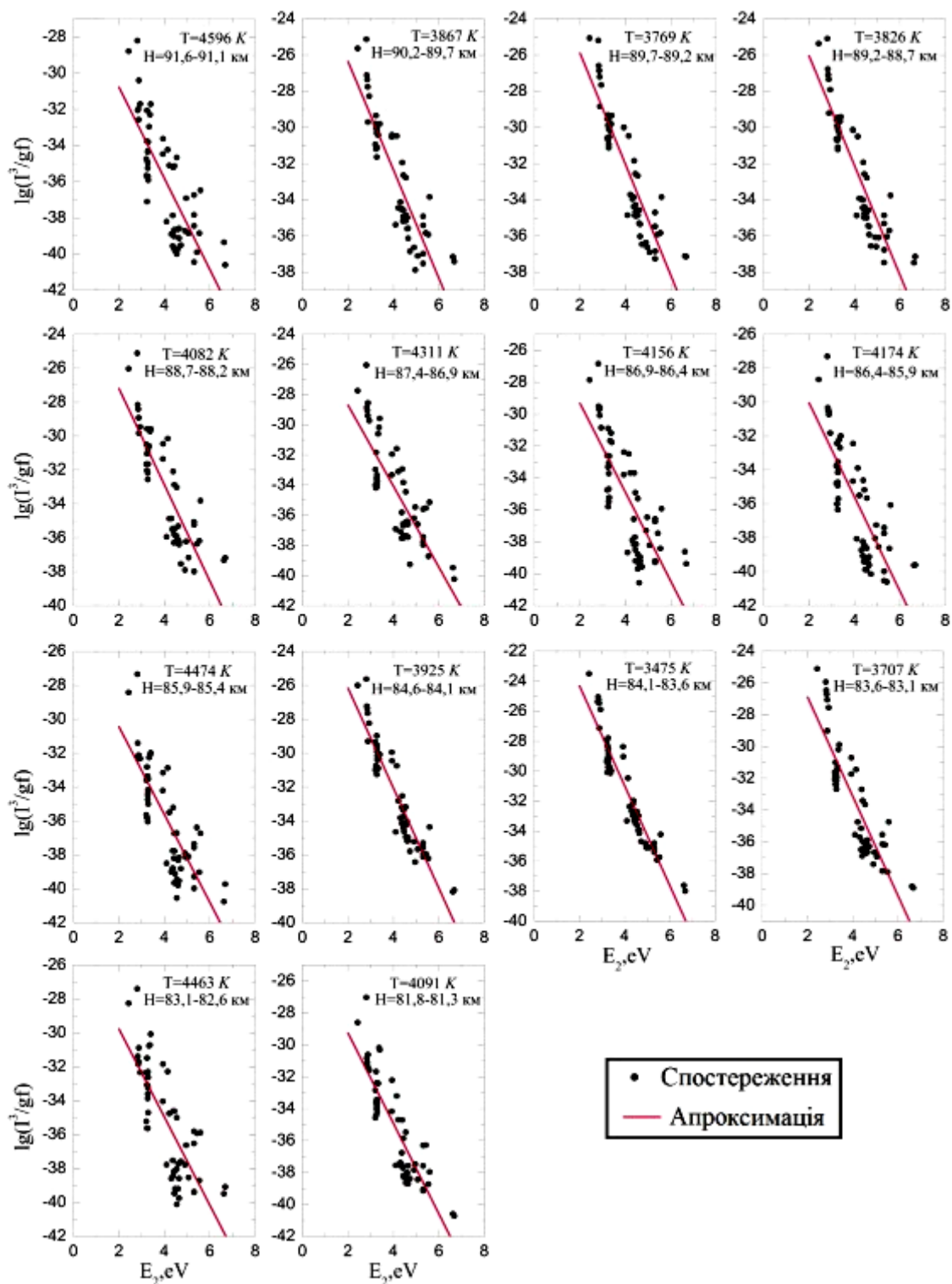


Рис. 3.21. Визначення температури збудження атомів FeI в метеорній комі.

Результати визначення температури збудження атомів FeI в метеорній комі та її зміна з висотою представлені в Таблиці 3.5 та на Рис. 3.22,

відповідно. На Рис. 3.22 також показана крива блиску емісійної лінії FeI (2) ($\lambda 4427 \text{ \AA}$). Положення даної лінії в спектрі метеора вказане на Рис.3.20. Одночасно було визначено і кількість атомів в стовпі на промені зору. Результати розрахунків представлено в Таблиці 3.5.

Таблиця 3.5.

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

Висота, км	Температура, К	Кількість атомів, N
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}

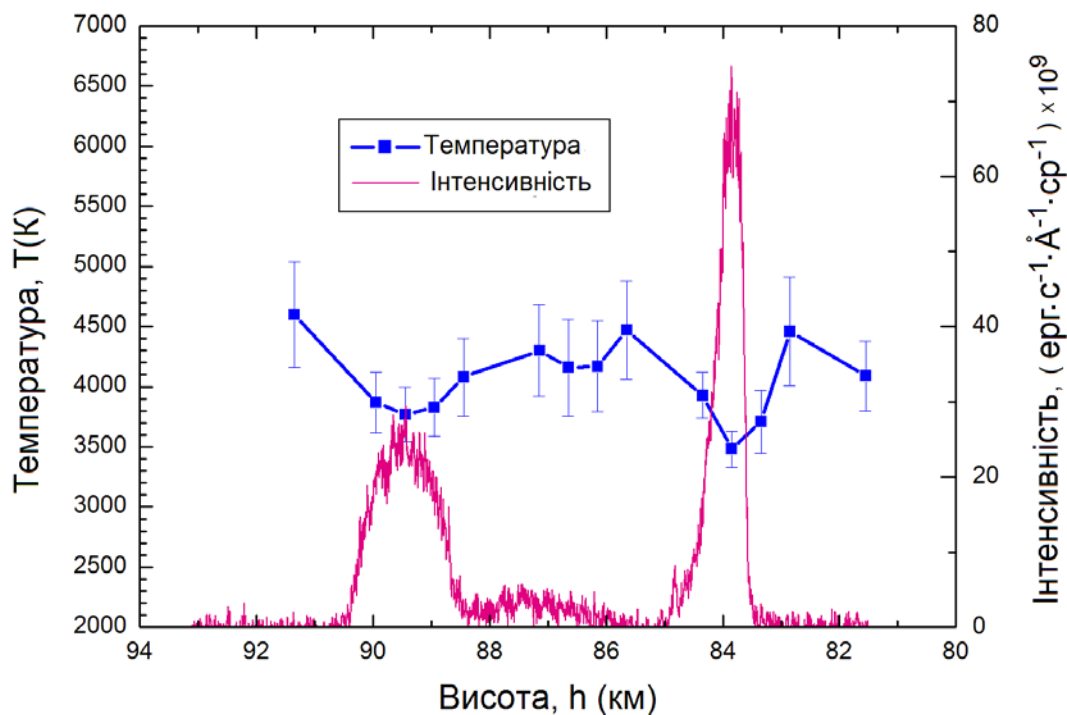


Рис.3.22. Зміна температури збудження атомів FeI в метеорній комі з висотою та крива блиску спектральної лінії FeI (2) ($\lambda 4427\text{\AA}$).

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. 3.22). До того ж температура збудження змінюється відносно повільніше, ніж інтенсивність. На таку закономірність неодноразово вказували й інші дослідники, наприклад, у публікаціях [11, 78]. Зокрема в роботі [78] 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. З посиланням на [2], автор [78] пояснює це явище тим, що з посиленням випаровування відносно холодні пари не встигають прогріватися за рахунок

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

3. Цеплеха [71, 123] 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.3.22, 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 [2].

На Рис. 3.23 представлено зв'язок ефективної температури (T) збудження атомів FeI в метеорній комі з інтенсивністю (I) спектральної лінії FeI (2) ($\lambda 4427\text{\AA}$) в спектрі досліджуваного метеора, спостереженого 2 серпня 2011 року. Апроксимаційна функція цієї залежності має вигляд:

$$T = -181,631 \times \lg(I) + 8113,1 \quad (3.1)$$

Залежність (3.1) виражає добре відомий факт, що інтенсивність спектральної лінії однозначно пов'язана з температурою [133]:

$$I = N_0(1-x) \frac{g_e}{g_0} e^{-\frac{E_e}{kT}} h \nu_{ei} A_{ei} \quad , \quad (3.2)$$

де N_0 – число нейтральних атомів в 1 см^3 , x – ступінь іонізації цих атомів, g_e і g_0 – статистична вага збудженого і нормального станів, E_e – енергія збудженого верхнього стану, T – температура, k – стала Больцмана, A_{ei} – ймовірність спонтанного випромінювання.

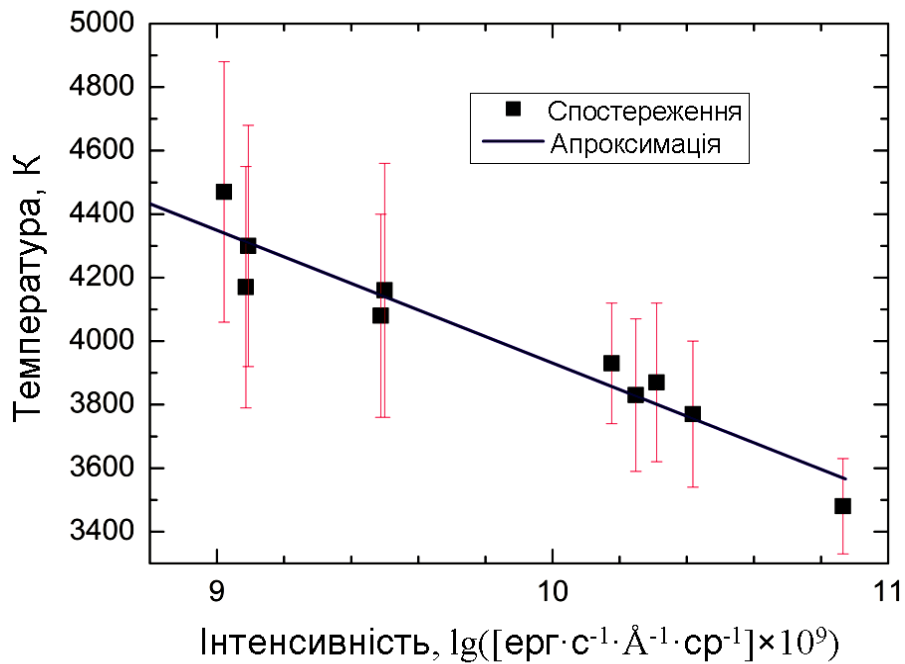


Рис. 3.23. Функціональна залежність інтенсивності емісійної лінії заліза FeI з ефективною температурою, виведена з дослідження спектра метеора, спостереженого 2 серпня 2011 року.

Рис. 3.23 показує, що при збільшенні температури інтенсивність лінії зменшується. Для визначення температури збудження в даній роботі методом кривих росту вважалося, 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 [2]. 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.

Висновки до розділу 3.

1. Оброблено і проаналізовано спектри метеорів, отриманих з дифракційною ґраткою 2 і 27 серпня 2011 року та 20 лютого і 11 серпня 2012 року в Астрономічній обсерваторії Астрономічного інституту Академії наук Чеської Республіки (м. Ондржейов, Чехія). Проведено обробку призових спектрів двох метеорів потоку Оріоніди, які спостерігалися 21–22 жовтня 1958 року в Ашхабадській астрофізичній лабораторії та одного метеора потоку Персеїди, отриманого 10 серпня 1965 року на спостережній станції Крижанівка Одеської астрономічної обсерваторії.

2. Проведено ототожнення емісійних ліній в досліджуваних спектрах метеорів і виявлено 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.

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

4. Виявлено нелінійну зміну температури збудження атомів FeI з висотою за даними досліджень метеорного спектра від 2 серпня 2011 року. Спостерігається підвищення температури збудження атомів FeI перед і одразу після спалахів та її зниження безпосередньо під час спалахів.

РОЗДІЛ 4. МУЛЬТИПЛЕТНА СТРУКТУРА І ДІАГРАМИ ГРОТРІАНА

4.1. Мультиплетна структура спектрів метеорів і діаграми Гротріана.

Спектри метеорів – це переважно спектри випромінення атомів, з яких складається метеорне тіло. У метеорних спектрах спостерігається велика кількість емісійних ліній атомів різних хімічних елементів. Метеорним спектрам характерна мультиплетна структура. Вище вже зазначалося, що мультиплети являють собою пари або трійки близько розташованих спектральних ліній одного і того ж хімічного елемента. Іноді реєструється одна лінія з мультиплету або більше ніж три. Дуже яскравим в метеорних спектрах буває жовтий дублет натрію $\lambda 5890\text{--}5896 \text{ \AA}$. У деяких спектрах він дає більше випромінювання, ніж всі інші лінії. Також досить яскравим буває зелений триплет магнію. Залізо не має таких яскравих ліній. Однак в його спектрі міститься багато середніх і слабких ліній. Тому сумарне випромінювання заліза часом переважає над випромінюванням інших елементів. Іноді спостерігаються виключно “залізні” спектри, які складаються з ліній FeI, FeII, FeO, Ni, Co.

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. Це може стати в нагоді, 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.

У довіднику Ч. Корліса і У. Бозмана [134], наприклад, наведено точні довжин хвиль (з точністю до 0.01 \AA) і потенціали обох рівнів для 658 ліній FeI і 82 ліній FeII разом з ймовірністю електронних переходів і силами

осциляторів, але приналежність цих ліній до тих чи інших мультиплетів, їх номери та позначення термів не вказані.

Тому перед нами постало завдання скласти каталог ліній спектральних 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. Такий каталог було складено для мультиплетів атомів та іонів заліза і магнія. В основі створеного каталогу лежать роботи [13, 14, 128–129], а також робота Л.А. Митрофанової [135], що містить відомості про 168 мультиплетів FeI.

Для графічного зображення електронної структури атомів хімічних елементів будуються так звані діаграми Уолта Гротріана або діаграми термів, які показують дозволені переходи електронів між рівнями енергій в атомах. Ці діаграми можуть бути використані для одного або декількох електронів в атомі. При їх побудові приймаються до уваги специфічні правила відбору, пов'язані зі зміною кутового моменту імпульсу електрона.

Діаграми Гротріана для FeI і FeII, наведені у книзі П.Мерріла [136], містять тільки 35 мультиплетів FeI і 12 FeII (з числа спостережуваних в метеорних спектрах), ряд термів в ній відсутні.

В даній роботі побудовано повні, на скільки це можливо, діаграми Гротріана для FeI і MgI, які наочно пояснюють електронні переходи в атомах, що супроводжують випромінювання в тому чи іншому мультиплеті в метеорних спектрах. Результати роботи опубліковано в [16, 18, 22].

4.2. Спектральні мультиплети FeI, FeII, MgI і MgII.

Спектральні лінії випромінювання атомів заліза в метеорній комі дають найбільшу серед всіх елементів кількість мультиплетів емісійних ліній, а саме 329. Перелік номерів мультиплетів FeI, FeII і всіх інших мультиплетів, що спостерігалися в метеорних спектрах, наведено в роботі [2], але без довжин хвиль спектральних ліній. Таблиця для 89 мультиплетів FeI і FeII з

довжинами хвиль спектральних ліній з точністю до 1 Å опублікована в роботі [137].

Кожен мультиплет, як вже зазначалося, складається з декількох ліній. У Таблицях 4.1 і 4.2 приведено список ліній мультиплетів магнія MgI і MgII, а в Додатках Е і Ж – список ліній мультиплетів заліза FeI і Fe II. В цих таблицях указано номери мультиплетів, лабораторні довжини хвиль спектральних ліній в Å з точністю до 0.01 Å, назви спектральних термів, найнижчий та найвищий енергетичні рівні в eV, квантове число J , значення $\log gf$ відповідно до [14, 15, 128]. В таблицях приведено довжини хвиль найбільш інтенсивної лінії даного мультиплету. Виняток становить мультиплет 42 FeII, у якого три лінії мають однакову інтенсивність. Довжини хвиль та інтенсивності декількох ліній даного мультиплету наведені в [137].

В спектрах метеорів можуть спостерігатися спектральні лінії 12 мультиплетів MgI і 4 мультиплетів MgII (Таблиці 4.1 і 4.2). Магній – третій елемент після NaI і CaII, який дає найбільш яскраві спектральні лінії. Найяскравішим є триплет MgI (2). У дужках зазначено номер мультиплету. Він часто зустрічається в метеорних спектрах і за яскравістю часто порівнянний з дублетом H і K кальцію та з D-дублетом NaI. Сильну лінію дає MgI (3) поблизу $\lambda 3838$ Å. Однократний іон MgII (4) також дає дуже яскраву лінію поблизу $\lambda 4481$ Å, яка чітко виражена в спектрах потоку Гемініди [137].

В Додатках Е і Ж, як і для MgI і MgII, представлено дані для спектральних ліній мультиплетів заліза FeI і Fe II, що спостерігаються в метеорних спектрах. Результати цієї роботи представлено в [22].

Таблиця 4.1

Мультиплети MgI, виявлені в метеорних спектрах.

№ мультиплету	Довжина хвилі, Å	Терми	Енергетичні рівні, еВ	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 4.2

Мультиплети MgII, виявлені в метеорних спектрах.

№ мультиплету	Довжина хвилі, Å	Терми	Енергетичні рівні, еВ	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

4.3. Діаграми Гротріана для мультиплетів FeI і MgI.

Діаграма Гротріана має вигляд прямокутника з заданими розмірами, всередині якого за допомогою ліній, букв і чисел наводиться електронна структура атомної системи. По осі ординат відкладаються рівні енергій, а позначення термів – по осі абсцис. Похилими лініями зображаються радіаційні переходи.

Одним з важливих етапів створення діаграми Гротріана є відбір рівнів і переходів, які будуть найкращим чином відображати властивості атома. Для вирішення цього завдання є такі критерії, як інтенсивність або довжина хвилі, але важлива також експертна оцінка ситуації. Наступним етапом роботи є розміщення інформації на діаграмі, що забезпечує її найкращу інформативність. При цьому крім формалізованих критеріїв присутній авторський погляд.

На діаграмі важливо представити резонансні лінії (переходи з основного стану) і лінії переходів із збуджених станів. При цьому необхідно враховувати довжину хвилі відображуваного переходу. В першу чергу потрібно зобразити переходи з довжиною хвилі з видимої і ближньої інфрачервоної областей спектра, як найбільш доступних дослідникам.

Далі експериментальним чином підбирається таке розміщення інформації на діаграмі, щоб забезпечити її читабельність. Може виникнути проблема, пов'язана з накладенням різних елементів діаграми. Якщо одна лінія переходу накладається на іншу, паралельну першій, то в такому випадку можна змістити лінію переходу вправо або вліво, але при цьому необхідно враховувати наявність переходів ліворуч і праворуч [138].

Діаграми Гротріана не завжди містять всі переходи, які насправді утворюються в спектрах метеорів. Іноді не представляється можливим вказати всі мультиплети через їх кількість, не кажучи вже про лінії, тому доводиться не враховувати багато відомих спектроскопічних термів. Саме тому діаграми для багатьох елементів спрощені і часто неповні.

У нашому випадку через значну кількість мультиплетів FeI їх не вдалося нанести на одну загальну діаграму. Тому діаграма була розділена на три частини, що частково перекриваються. Діаграми термів представлені в Додатках З, К і Л. Рисунок в Додатках К і Л побудовано в більшому масштабі. Рисунок в Додатку Л показує середню частину діаграми, де мультиплети розташовані особливо густо, тому масштаб по горизонталі збільшено втричі (масштаб по вертикалі не змінено).

Мультиплетів MgI, що спостерігаються в метеорних спектрах, небагато, тому всіх їх вдалося нанести на одну діаграму (Рис.4.1). Мультиплетів MgII тільки чотири, тому для них лише наводимо дані в Таблиці 4.2. На всіх діаграмах суцільними лініями показані переходи між термами однакової мультиплетності, пунктирними – між термами різної мультиплетності. На вертикальних шкалах відкладена енергія в обернених сантиметрах (cm^{-1}) і електронвольтах (eV). Вздовж горизонтальної осі проставлені спектральні терми. Біля ліній, що зображають електронні переходи, вказано енергетичні рівні та номери мультиплетів.

Основному стану FeI (a^5D) відповідає конфігурація $3d^64s^2$, трьом найближчим нижнім рівням більшості мультиплетів (a^5F , a^3F , a^5P) – відповідає конфігурація $3d^74s$, наступній групі рівнів (z^5D^0 , z^5F^0 , z^5P^0 , z^3D^0 , z^3F^0) – конфігурація $3d^64s4p$ і т.д.

Основному стану FeII (a^6D) відповідає конфігурація $3d^64s$, вона ж відповідає нижнім рівням b^4F . Рівням a^4P , a^4F відповідає конфігурація $3d^7$, рівням z^4P^0 , z^4D^0 , z^4F^0 – конфігурація $3d^64p$, рівню a^6S – конфігурація $3d^64p$, і т.д.

Основному стану MgI (3^1S) відповідає конфігурація $2p^63s^2$. Повна діаграма Гротріана для MgI наведена в роботі Ш.Мур [15]. В цій роботі представлено діаграми і для MgII, а також для інших хімічних елементів. Наша задача полягає у побудові діаграм Гротріана лише для спектральних ліній елементів, що можуть бути виявлені в спектрах метеорів.

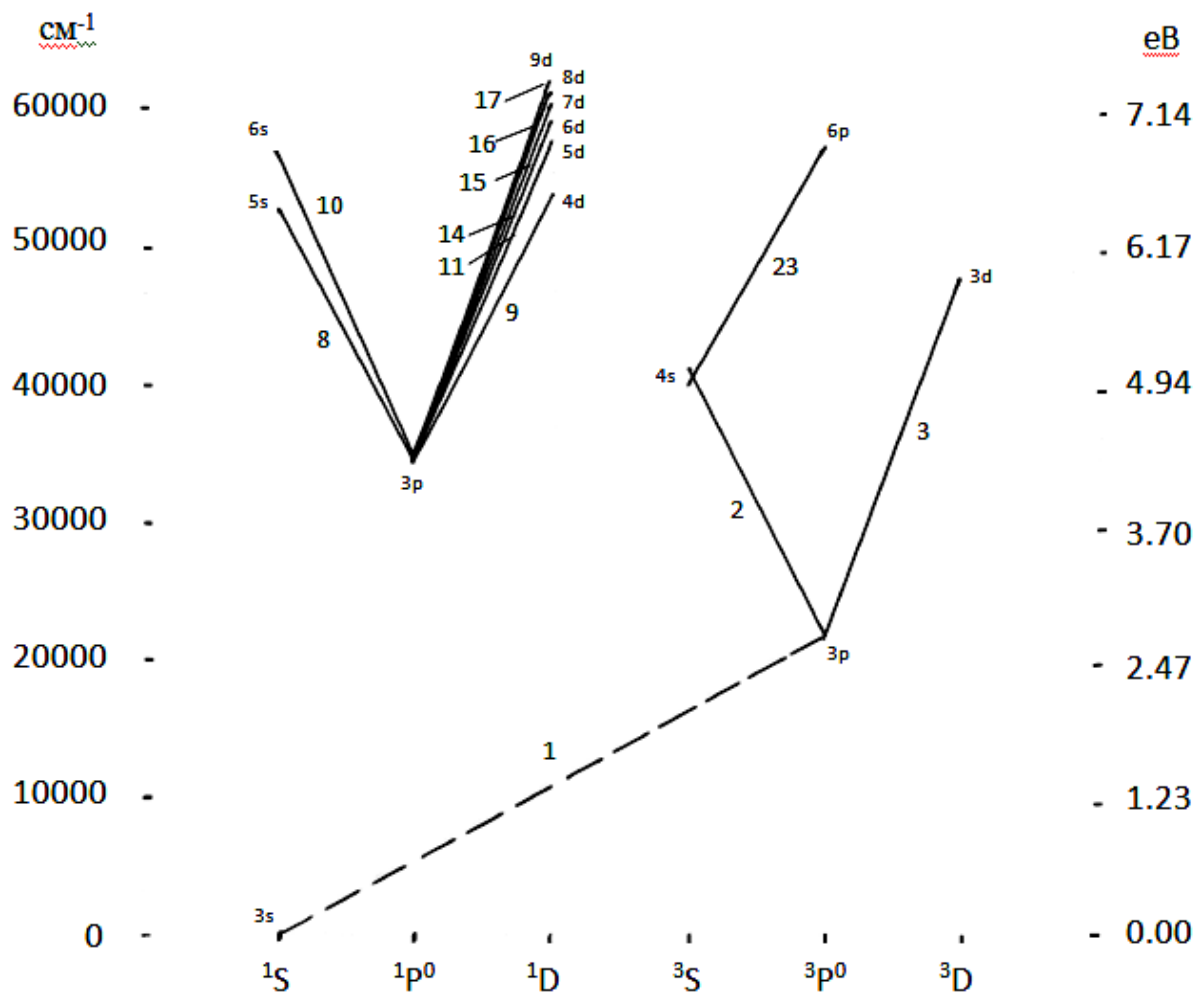


Рис.4.1. Діаграма Гротріана для мультиплетів магнія MgI, виявлених в спектрах метеорів.

Техніка побудови діаграм Гротріана зазнала певних змін, і в даний час є кілька її видів. Широко використовуються діаграми, що містять позначення всіх існуючих електронних конфігурацій nl^k атома даного хімічного елемента, терми атомних залишків, терми енергетичних станів атома. Для зручності парні і непарні терми розносять щодо основного стану по краях діаграми. Такі діаграми містять достатньо повну інформацію і зручні у користуванні.

Висновки до розділу 4.

1. Представлено аналіз мультиплетної структури метеорних спектрів, що дозволяє досліджувати властивості і поведінку атомів речовини метеорного тіла та фізико-хімічні процеси, що відбуваються під час метеорних явищ в земній атмосфері.

2. Складено компільований каталог ліній мультиплетів заліза FeI і FeII та магнія MgI і MgII, які спостерігаються в спектрах метеорних явищ, із вказівкою лабораторних довжин хвиль з точністю до 0.01 Å, термів, найнижчих та найвищих енергетичних рівнів в eV, квантового числа та сил осциляторів.

3. Побудовано, по можливості, повні діаграми Гротріана для ліній мультиплетів заліза FeI і магнія MgI, зареєстрованих в спектрах досліджуваних метеорів, що наочно пояснюють переходи, які супроводжують випромінювання в мультиплеті.

ЗАГАЛЬНІ 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 і 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.

Висловлюю щирі вдячності всім, хто мав причетність до даної роботи. За основоположні знання з вивчення спектрів метеорів та надання спостережених матеріалів для досліджень, результати яких описані в дисертації, завдячую к.ф.-м.н. В.О. Смірнову (Одеса, Україна) і головному науковому співробітнику відділу міжпланетної матерії Астрономічної обсерваторії Академії наук Чеської Республіки доктору Ї. Боровічці (Ондрежов, Чехія), співробітникам Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка – к.ф.-м.н. В.В. Клещонку, д.ф.-м.н. В.К. Розенбуш, к.ф.-м.н. П.М. Козаку, д.ф.-м.н. С.Л. Парновському, к.ф.-м.н. Н.С. Коваленко, к.ф.-м.н. І.В. Лук'янику, к.ф.-м.н. В.О. Пономаренку, д.ф.-м.н. В.Н. Криводубському, а також колезі і другу к.ф.-м.н. О.В. Голубаєву (Харків, Україна) за критичні зауваження та цінні поради під час написання кандидатської дисертації.

Висловлюю щирю вдячність всім співавторам опублікованих наукових робіт за темою дисертації, сім'ям Марченко і Мозгових, моїй родині, за підтримку і створення сприятливих умов для написання кандидатської дисертації.

Світла пам'ять науковому керівнику дисертаційної роботи член-кор. НАН України, д.ф.-м.н., професору К.І. Чурюмову, який приділив багато уваги моїй роботі і давав цінні поради, а також моєму дідусеві В.Д. Марченку, який своїми настановами спонукав мене займатися науковою діяльністю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Астапович И.С. Метеорные явления в атмосфере Земли / И.С. Астапович. – М.: Государственное изд-во физ.-мат. литературы. – 1958. – 640 с.
2. Бронштэн В.А. Физика метеорных явлений / В.А. Бронштэн. – М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. литературы. – 1981. – 416 с.
3. Смирнов В.А. Спектры кратковременных световых явлений: Метеоры / В.А. Смирнов. – М.: Физматлит. – 1994. – 208 с.
4. Jones W. Theoretical and observational determinations of the ionization coefficient of meteors / W. Jones // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1997. – V. 288. – №. 4. – P. 995–1003.
5. Saidov K.H. Luminous efficiency coefficient from simultaneous meteor observations / K.H. Saidov, M. Simek // *Astron. Inst. of Czechoslovakia, Bull. (ISSN 0004-6248)*. – 1989. – V. 40. – №. 5. – P. 330–332.
6. Smirnov V.A. Coefficient of Meteor Plasma Radiation / V.A. Smirnov // *Proceedings of the International Meteor Conference, Frasso Sabino, Italy, 23-26 September 1999*, Editor: Arlt, R., International Meteor Organization. (ISBN 2-87355-011-2). – 2000. – P. 47–58.
7. Borovicka J. Meteoroid properties from meteor spectroscopy / J. Borovicka // *Meteoroids 1998*, eds. W.J. Baggaley, V. Porubcan, Astron. Inst., Slovak Acad. Sci., Bratislava. – 1999. – P. 355–362.
8. Borovicka J. Line identifications in a fireball spectrum / J. Borovicka // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* – 1994. – V.103. – P. 83–96.
9. Borovicka J. Elemental abundances in Leonid and Perseid meteoroids/ J. Borovicka // *Earth, Moon, and Planets*. – 2005. – V. 95. – P. 245–253.
10. Borovicka J. Temporal evolution of a Perseid fireball spectrum / J. Borovicka, M. Weber, J. Bocek // *WGN, Journal IMO*. – 2006. – V. 34. – P. 49–54.
11. Borovicka J. A fireball spectrum analysis / J. Borovicka // *Astron. Astrophys.* – 1993. – V. 279. – P. 627–645.

12. Moore C.E. A Multiplet Table of Astrophys. Interest / C.E. Moore // *Contrib. Princeton Univ. Obs.* – 1945. – 20. – P. 270.
13. Зайдель А.Н. Таблицы спектральных линий. 4-е изд. / А.Н. Зайдель, В.К. Прокофьев, С.М. Райский, В.А. Славны, Е.Я. Шрейдер. – М.: Наука. – 1977. – 803 с.
14. Электронный ресурс // A. Kramida, Yu. Ralchenko, J. Reader and NIST ASD Team (2018). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.5.2), [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/asd> [2018, March 14]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
15. Moore C.E. Partial Grotrian diagrams of astrophysical interest / C.E. Moore, P.W. Merrill // *NBS Circ. U.S. Government Printing Office, Washington.* – 1968. – P.69.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.

20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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.

27. Мозговая А.М. Спектр метеора 22 октября 1958 года / А.М. Мозговая, В.О. Смирнов, К.И. Чурюмов // XIV Одесская Международная Гамова 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.
28. 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.
29. 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.
30. 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.
31. Козак П.М. Концепція створення багатофункціонального 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.
32. 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.

33. 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.
34. 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.
35. Мозговая А.М. Каталог и диаграммы Гротриана для линий мультиплетов железа и других химических элементов, наблюдаемых в метеорных и кометных комах / А.М. Мозговая, К.И. Чурюмов // Радиометеоры, метеоры і міжпланетна складова: поблизу та на відстані: тези доп. Міжнародного наукового семінару пам'яті Б.Л.Кашеєва до 96-річчя з дня народження, 15 березня 2016 року. – Харків: ХНУРЕ. – 2016. – С. 19–20.
36. Mozgova A.M. The investigation of multiplet structures in meteor spectra / A.M. Mozgova // Астрономія та фізика космосу в Київському університеті: тези доп. міжнародної конференції, 24 – 27 травня 2016 року. – Київ: КНУ. – 2016. – С. 65.
37. 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.
38. Мозгова А.М. The investigation of multiplet structures in meteor spectra / A.M. Mozgova, K.I. Churyumov // 41st COSPAR Scientific Assembly: Book of Abstracts, July 30 – August 7, 2016, Istanbul, Turkey. – 2016. – B0.4-39-16.

39. 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.
40. Мозгова А.М. Визначення температури збудження атомів FeI за спектром метеора 2 серпня 2011 року / А.М. Мозгова, Ї. Боровічка, В.В. Клещенок, О.В. Голубаєв // VII Memorial International conference CAMMAC 2017: Book of abstracts, September 26 – 28, 2017, Vinnytsia. – 2017. – С. 88–90.
41. Голубаєв О.В. Термічна десорбція речовини метеороїдів в близькосонячному просторі / О.В. Голубаєв, А.М. Мозгова // VII Memorial International conference CAMMAC 2017: Book of abstracts, September 26 – 28, 2017, Vinnytsia. – 2017. – С. 54–58.
42. Мозгова А.М. Дослідження метеорних явищ в лабораторії вищого навчального закладу / А.М. Мозгова, О.В. Мозговий // VII Memorial International conference CAMMAC 2017: Book of abstracts, September 26 – 28, 2017, Vinnytsia. – 2017. – С. 132–134.
43. Бєлєвцев Р.Я. Основні результати досліджень боліда EN171101 “Тур’ї Ремети” в Закарпатті / Р.Я. Бєлєвцев, 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 CAMMAC 2017: Book of abstracts, September 26 – 28, 2017, Vinnytsia. – 2017. – С. 103–106.
44. Mozgova A.M. Some results of four meteor spectra research / A.M. 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.

45. Чурюмов К.І. Космічна загроза і кінець світу: реальність і міфи / К.І. Чурюмов, В.Г. Кручиненко, Т.К. Чурюмова. – К.: Т-во “Знання” України. – 2012. – 48 с.
46. Herschel A.S. The Progress of Meteor-spectroscopy /A.S.Herschel // Nature. – 1881. – V. 24. – Iss. 622. – P. 507–508.
47. Pickering E.C. Council note on the progress of meteoric astronomy during 1897 / E.C.Pickering // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 1898. – V. 58. – P. 201.
48. Millman P.M. Note on Meteor Spectrum Photography in 1932 / Peter M. Millman // Harvard College Obs. Bull. – 1933. – №. 891. – P. 6–8.
49. Russell J.A. A note on the revised wavelengths for a composite spectrum of a Perseid meteor of 1948 / John A.Russell // Popular Astronomy. – 1949. – V. 57. –P.344.
50. Madiedo M. Jose. Automated systems for the analysis of meteor spectra: The SMART Project / M. Jose Madiedo // Planet. Space Sci. – 2017. – V. 143. – P. 238–244.
51. Dell’Aglia M. Laser Induced Breakdown Spectroscopy applications to meteorites: Chemical analysis and composition profiles / M. Dell’Aglia, A. De Giacomo, R. Gaudiuso, O. De Pascale, G.S. Senesi, S. Longo // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2010. – V. 74. – P. 7329–7339.
52. Bloxam K. A spectral analysis of ablating meteors / K. Bloxam, M. Campbell-Brown // Planet. Space Sci. – 2017. – V. 143. – P. 28–33.
53. Matlovic P. Spectra and physical properties of Taurid meteoroids / P. Matlovic, J. Toth, R. Rudawska, L. Kornos // Planet. Space Sci. – 2017. – V. 143. – P. 104–115.
54. Borovicka J. Spectral analysis of two Perseid meteors / J. Borovicka, H. Betlem // Planet. Space Sci. – 1997. – V. 45. – Iss. 5. – P. 563–575.
55. Електронний ресурс // http://www.ta3.sk/IAUC22DB/MDC2007/Roje/pojedynczy_obiekt.php?kodstrumienia=00007
56. Електронний ресурс // <http://www.imo.net/>

57. Бабаджанов П.Б. Метеоры и их наблюдение. / П.Б. Бабаджанов – М.: Наука. – 1987. – 167 с.
58. Чурюмов К.И. Кометы и их наблюдение / К.И. Чурюмов – М.: Наука. – 1980. – 160 с.
59. Электронный ресурс // <http://www.minorplanetcenter.net/iau/MPEph/MPEph.html>.
60. Halliday I. A study of spectral line identifications in Perseid meteor spectra / I. Halliday // Publ. Dominion Obs. Ottawa. – 1961. – V. 25, 1. – P. 3–16.
61. Halliday I. A study of ultraviolet meteor spectra / I. Halliday // Publ. Dominion Obs. Ottawa. – 1969. – V. 25, 12. – P. 315–322.
62. Harvey G.A. Spectral analysis of four meteors / G.A. Harvey // In Evolutionary and Physical Properties of Meteoroids, eds C.L. Hemenway, P.M. Millman and A.F. Cook, NASA-SP 319. – 1973. – P. 103.
63. Cook A.F. Photometric analysis of spectrograms of two Perseid meteors / A.F. Cook, I. Halliday, P.M. Millman // Can. J. Phys. – 1971. – V. 49. – P. 1738–1749.
64. Millman P.M. Spectroscopy of Perseid meteors with an image orthicon / P.M. Millman, A.F. Cook, C.L. Hemenway // Can. J. Phys. – 1971. – V. 49. – P. 1365–1373.
65. Borovichka J. Television spectra of meteors / J. Borovichka, J. Bocek // Earth, Moon, and Planets. – 1995. – V. 71. – P. 237–244.
66. Millman P.M. The near-infra-red spectrum of meteors / P.M. Millman, I. Halliday // Planet. Space Sci. – 1961. – V. 5. – P. 137–140.
67. Russel J.A. A time resolved spectrum of the terminal burst of a Perseid meteor / J.A. Russel // Astrophys. J. – 1960. – V. 131. – P. 34–37.
68. Halliday I. The spectra of meteors from Halley's comet / I. Halliday // Astron. Astrophys. – 1987. – V. 187. – P. 921–924.
69. Harvey G.A. Elemental abundance determinations for meteors by spectroscopy / G.A. Harvey // J. Geophys. Res. – 1973. – V. 78. – P. 3913–3926.

70. Kochirova G.I. The quantitative analysis of the Perseid meteor spectra / G.I. Kochirova // *Astron. Vestnik*. – 1993. – V. 27. – №. 3. – P. 100–112.
71. 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.
72. Borovichka J. Two components in meteor spectra / J. Borovicka // *Planet. Space Set.* – 1994. – V.42. – P. 145–150.
73. Блажко С.Н. О спектре метеора 1917 г., 12 августа / С.Н. Блажко // *Астроном.журн.* – 1932. – Т. 9. – №. 3-4. – С. 146–162.
74. Millman P.M. A general survey of meteor spectra / P.M. Millman // *Smithsonian Contr. to Astrophys.* – 1963. – V.7. – P. 119–127.
75. Cook A.F. Photometric analysis of a spectrogram of a Perseid meteor / A.F. Cook, P.M. Millman // *Astrophys. J.* – 1955. – V.121. – P. 250–270.
76. Rajchl J. Two meteor spectra with high dispersion /J.Rajchl // *Bull. Astr. Inst. Czech.* – 1961. – V. 12. – P. 167.
77. Мухамедназаров С. Слабые метеоры в эволюции солнечной системы: новые методы наблюдений, кинематика, спектры, аэрономия и приток / С. Мухамедназаров // дис. доктора физ.-мат. наук / Ин-т земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн. Ашхабад. – 1990. – 387 с.
78. Кохирова Г.И. Исследование физических характеристик метеоров по спектральным наблюдениям / Г.И. Кохирова // дис. канд. физ.-мат. наук.: Москва. – 1999. – 147с.
79. Катасев Л.А. Фотографические методы метеорной астрономии / Л.А. Катасев. – М.: Гос. изд. тех.-теор. лит. – 1957. – 180 с.
80. Электронный ресурс // http://pallas.astro.amu.edu.pl/~jopek/MDC2007/Roje/roje_lista.php?corobic_roje=2&sort_roje=0
81. Nakamura Tomoki. Itokawa Dust Particles: A Direct Link Between S-Type Asteroids and Ordinary Chondrites / Tomoki Nakamura, Takaaki Noguchi, Masahiko Tanaka, Michael E.Zolensky, Makoto Kimura, Akira Tsuchiyama,

- Aiko Nakato, Toshihiro Ogami, Hatsumi Ishida, Masayuki Uesugi, Toru Yada, Kei Shirai, Akio Fujimura, Ryuji Okazaki, Scott A.Sandford, Yukihiro Ishibashi, Masanao Abe, Tatsuaki Okada, Munetaka Ueno, Toshifumi Mukai, Makoto Yoshikawa, Junichiro Kawaguchi // *Science*. – 2011. – V. 333. – Iss. 6046. –P. 1113.
82. Sandford Scott A. The Power of Sample Return Missions - Stardust and Hayabusa / Scott A.Sandford // *The Molecular Universe, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium*. – 2011. – V. 280. – P. 275–287.
83. Defouilloy C. Origin of crystalline silicates from Comet 81P/Wild 2: Combined study on their oxygen isotopes and mineral chemistry / C. Defouilloy, D. Nakashima, D.J. Joswiak, D.E. Brownlee, T.J. Tenner, N.T. Kita // *Earth and Planet. Sci. Lett.* – 2017. –V. 465. – P. 145–154.
84. Чурюмов К. Перші наукові результати космічної місії Розета до ядра комети Чурюмова-Герасименко у 2014-2016 рр. / К. Чурюмов, Л. Ксанфомаліті, М. Мельник // *Астрономія і сьогодні: матеріали V Міжрегіональної науково-практичної конференції, 12 квітня 2016 року*. – Вінниця: ДПУ імені М. Коцюбинського. – 2016. – С. 4–32.
85. Cronin J.R. Aminoacids of the Murchison meteorite. III. – Seven carbon acyclic primary alpha–amino alkanolic acids / J.R. Cronin, S. Pizzarello// *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1986. – V. 50. –P. 2419–2427.
86. Pizzarello S. Molecular and chiral analyses of some protein amino acid derivatives in the Murchison and Murray meteorite / S. Pizzarello , G.W. Cooper // *Meteoritics & Planet. Sci.* – 2001. – V. 36. – №. 6. P. 897–909.
87. Астапович И.С. Спектры метеоров / И.С. Астапович // *Мироведение*. – 1935. – Т. 24. – №. 5. – С. 337–349.
88. Gorbanev Yu.M. Methods and statistics of TV observations of telescopic meteors / Yu.M. Gorbanev, A.V.Golubaev, V.V. Zhukov, E.F. Knyaz'kova, S.R. Kimakovskii, I.I. Kimakovskaya, S.V. Podlesnyak, L.A. Sarest,

- I.A. Stogneeve, V.A. Shestopalov // *Sol. Syst. Res.* – 2006. – V. 40. – Iss. 5. – P. 412– 426.
89. Максутов Д.Д. Выбор рациональной оптики для фотографирования и спектрографирования метеоров / Д.Д. Максутов // Бюлл. коллектива наблюдателей ВАГО. – 1935. – Т. 29. – С. 131.
90. Сытинская Н.Н. Фотографические методы метеорной астрономии / Н.Н. Сытинская // Труды I Всесоюз. конф. По изучению стратосферы. – 1935. – С. 497.
91. Сытинская Н.Н. Исследование эффективности объективов и фотоматериалов для съемки метеоров / Н.Н. Сытинская // Уч. зап. ЛГУ. – 1937. – №. 12. – С. 66.
92. Фединский В.В. О фотографировании метеоров / В.В. Фединский // Мирознание. – 1935. – №. 24. – С. 196.
93. Millman P.M. Note on the Magnitudes of Photographed Meteors / P.M. Millman, G.W. Wheelwright // *Harvard College Observatory Bulletin.* – 1930. – №. 872. – P. 3–5
94. Gorbanev Yu.M. Methods and statistics of TV observations of telescopic meteors / Yu.M.Gorbanev, A.V. Golubaev, V.V. Zhukov, E.F. Knyaz'kova, S.R. Kimakovskii, I.I. Kimakovskaya, S.V. Podlesnyak, L.A. Sarest, I.A. Stogneeve, V.A. Shestopalov // *Sol. Syst. Res.* – 2006. – V. 40. – Iss. 5. – P. 412– 426.
95. Катасев Л.А. Исследование метеоров в атмосфере Земли фотографическим методом / Л.А. Катасев // Гидрометеорологическое издательство. Ленинград. – 1966. – 334 с.
96. Электронный ресурс // Режим доступа до ресурсу: <http://www.astronomy.odessa.ua/krizanovka.htm>.
97. Kashcheyev B. MARS-M: A highly sensitive automated meteor radar / B. Kashcheyev, V. Pososhenko, L. Tatarts, A. Oleynikov, N. Slipchenko, O. Solyanik // *Meteoroids 1998*, Eds: W.J. Baggaley and V. Porubcan. – Proc. Int. Conf., Tatranska Lomnica, Slovakia, 1998. – 1999. – P. 107.

98. Kolomiyets S. Meteor researches at KHNURE / S. Kolomiyets, Y. Voloshchuk, B. Kashcheyev, N. Slipchenko // In: Highlights of Astronomy. Ed. O. Engvold. San Francisco, CA. – 2005. – V. 13. – P. 765–766.
99. Baggaley W.J. The AMOR radar: an efficient tool for meteoroid research / W.J. Baggaley // Advances in Space Res.– 2001. – V. 28. – Iss. 9. – P. 1277–1282.
100. Brown P. The Velocity Distribution of Meteoroids at the Earth as Measured by the Canadian Meteor Orbit Radar (CMOR) / P. Brown, J. Jones, R.J. Weryk, M.D. Campbell-Brown // Earth, Moon, and Planets. – 2004. – V. 95. – Iss. 1–4. – P. 617–626.
101. Millman P.N. A study of meteor photographs taken through a rotating shutter / P.N. Millman, D.Hoffleit // H.C.O. Annals. – 1937. – V. 105. – №. 31. – P. 613–619.
102. McCrosky R.E. Orbital elements of photographic meteors / R.E.McCrosky, A.Posen // Smithsonian Contrib. Astrophys. – 1961. – V. 4. – P. 15–84.
103. Cepleha Z. Program of fireball photography in Czechoslovakia / Z. Cepleha, J. Rajchl // Bull. Astron. Inst. Czech. – 1965. – №. 16. – P. 15–22.
104. Cepleha Z. Geometric, dynamic, orbital, and photometric data on meteoroids from photographic fireball networks / Z.Cepleha // Bull. Astron. Inst. Czech. – 1987. – №. 38. – P. 222–234.
105. Spurny P. Photographic monitoring of fireballs in Central Europe / P. Spurny // Proc. SPIE 3116. – 1997. – P. 144–155.
106. Kozak P. Anomalous meteors from the observations with super-isocon TV systems / P. Kozak, J. Watanabe, M. Sato // Abst. Int. Astron. Conf. "ACM'2014" ("Asteroids, Comets, Meteors"), Helsinki, Finland, 2014. – Eds.: K. Muinonen, A. Penttila, M. Granvik, A. Virkki, G. Fedorets, O. Wilkman, T. Kohout. – 2014. – P. 310.
107. Козак П.М. Метод фотометрії слабких метеорів та штучних супутників Землі із спостережень з телевізійними системами супер-ізокон /

- П.М. Козак, Л.В. Козак // *Космічна наука і технологія*. – 2015. – Т. 21. – №. 1. – С. 38–47.
108. Sonota Co. A meteor shower catalog based on video observations in 2007-2008 / Sonota Co // *WGN, Journal of the IMO*. – 2009. – V. 37. – №. 2. – P. 55–62.
109. Козак П.Н. Анализ методов и точность определения экваториальных координат при цифровой обработке телевизионных наблюдений метеоров / П.Н. Козак // *Кинемат. и физика небесных тел*. – 2002. – Т. 18.– №. 5. – С. 471–480.
110. Козак П.Н. Векторный метод определения параметров траектории и элементов гелиоцентрической орбиты метеора для телевизионных наблюдений / П.Н. Козак // *Кинемат. и физика небесных тел*. – 2003. – Т. 19.– №. 1. – С. 62–76.
111. Kozak P. “Falling Star”: Software for Processing of Double-Station TV Meteor Observations / P.Kozak // *Earth, Moon, and Planets*. – 2008. – V. 102. – №. 1–4. – P. 277–283.
112. Kozak P.M. Semi-empirical method for the photometry of low-light meteors from observations with the isocon television system / P.M. Kozak // *Meteoroids 2013, Proc. Astron. Conf., A.M. Univ., Poznan, Poland*. – Eds.: Jopek T.J., Rietmeijer F.J.M., Watanabe J, Williams I.P. – A.M. University Press. – 2014. – P. 335–343.
113. Koten P. Double station observation of Draconid meteor outburst from two moving aircrafts / P. Koten, J. Vaubaillon, A. Margonis, J. Tóth, F. Ďuriš, J. McAulliffe, J. Oberst // *Planet. Space Sci.*– 2015. – V. 118. – P. 112–119.
114. Козак Л.В. Оцінка енергії світіння атмосфери над грозовими розрядами / Л.В. Козак, В.М. Івченко, А.С. Одзимек, І.С. Клоков, П.М. Козак, В.П. Лапчук // *Космічна наука і технологія*. – 2012. – Т. 18. – № 2. – С. 33–42.
115. Козак Л.В. Наблюдение и анализ кратковременных оптических явлений в атмосфере Земли /Л.В. Козак, А. Одзимек, А.Е. Вольвач, В.Н. Івченко,

- Г.К. Гарипов, П.Н. Козак, В.П. Лапчук // Тези наук. 13-ї укр. конф. з космічних досліджень, 2013, Євпаторія, Україна. – 2013. – С. 129.
116. Harrison M.K. *Astronomical spectroscopy for amateurs* / M.K. Harrison // Patrick Moore's Practical Astronomy Series. Springer (DOI 10.1007/978-1-4419-7239-2). – 2011. – P. 242.
117. Малышев В.И. *Введение в экспериментальную спектроскопию* / В.И. Малышев – М.: Наука. – 1979. – 480 с.
118. Boitnott C.A. *Light-Emission Measurements of Sodium at Simulated Meteor Conditions* / C.A. Boitnott, H.F. Savage // *Astrophys. J.* – 1970. – V. 161. – P. 351–358.
119. Boitnott C.A. *Light Emission Measurements of Calcium and Magnesium at Simulated Meteor Conditions. II. Spectral Luminous Efficiencies* / C.A. Boitnott, H.F. Savage // *Astrophys. J.* – 1971. – V.167. – P. 349–355.
120. Boitnott C.A. *Light-Emission Measurements of Iron at Simulated Meteor Conditions* / C.A. Boitnott, H.F. Savage // *Astrophys. J.* – 1972. – V. 174. – P. 201–206.
121. Babadzhanov P.B. *Solid Particles in the Solar System* / P.B.Babadzhanov, V.S. Getman // *Proceedings of the Symposium № 90. Ottawa, Canada, August 27 - 30, 1979* / Eds. I. Halliday & B.A. McIntosh Reidel Publishing Company, Dordrecht ISBN 90-277-1164-X (HB), 90-277-1165-8 (PB). – 1 Jan 1980.
122. Ceplecha Z. *The meteor spectrum with dispersion from 11 to 38 Å/mm* / Z. Ceplecha, J. Rajchl // *Bull. Astr. Inst. Czech.* – 1963. – V. 14.–P. 29–49.
123. Ceplecha Z. *Complete data on bright meteor 32281* / Z.Ceplecha // *Bul. Astron. Inst. Czech.* – 1965. – V. 16.– P. 88–102.
124. Ceplecha Z. *Spectral data on terminal flare and wake of double-station meteor No. 38421 (Ondřejov, April 21, 1963)* / Z. Ceplecha // *Bull. Astr. Inst. Czech.* – 1971. – V. 22.–P.219–304.
125. Harvey G.A. *The Calcium h- and K-Line Anomaly in Meteor Spectra* / G.A. Harvey // *Astrophys.J.* –1971. – V. 165. – P. 669–671.

126. Nagasawa K. Analysis of the spectra of Leonid meteors / K. Nagasawa // Annals of the Tokyo Ast. Obs. – 1978. – V.16. – №. 4. – P. 157–187.
127. Cepplecha Z. Complete data on iron meteoroid (Meteor 36221) / Z. Cepplecha // Bull. Astr. Inst. Czech. – 1966. – V. 17. – P. 195–206.
128. Moore C.E. Atomic Energy Levels / C.E. Moore. – NBS Circ.U.S. Government Printing Office, Washington. – 1958. – №. 467.
129. Wise W.L. Atomic Transition Probabilities / W.L. Wise, M.W. Smich, B.A. Milas. – Washington : NSRDS – NBS, 1966, 1969.
130. 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.
131. Borovicka J. Two components in meteor spectra / J. Borovicka // Planet. Space Sci. – 1994. – V. 42. – №. 2. – P. 145–150.
132. Millman P.M. Analysis of meteor spectra / P.M. Millman // Ann. Harvard Coll. Obs. – 1937. – V. 82. – №. 7. – P. 149–177.
133. Бабушкин А.А. Методы спектрального анализа / А.А. Бабушкин, П.А. Бажулин, Ф.А. Королев, Л.В. Левшин, В.К. Прокофьев, А.Р. Стриганов // под редакцией проф. В.Л. Левшина, изд-тво МГУ.: Москва. – 1962. – 508 с.
134. Корлисс Ч. Вероятности переходов и силы осцилляторов 70 элементов / Ч. Корлисс, У. Бозман. – М.: Мир. – 1968. – 562 с.
135. Митрофанова Л.А. Кривая роста для Солнца по лабораторным интенсивностям FeI / Л.А.Митрофанова // Известия ГАО АН СССР. – 1952. – Т. 19. – Вып. 2. – №. 179. – С. 81–139.
136. Меррил П. Линии химических элементов в астрономических спектрах / П. Меррил. – М. : Физматгиз. – 1959. – 191 с.
137. Бронштэн В.А. Излучение метеоров и болидов / В.А. Бронштэн, К.А. Любарский // Метеорная материя в атмосфере Земли. – М. : Наука. – 1966. – С. 3–37.

138. Казаков В.Г. Информационная система “Электронная структура атомов” с динамическим построением графического представления спектральных данных / В.Г. Казаков, А.С. Тюменцев, А.С. Яценко // Автометрия. – 2005. – Т. 41. – №. 6. – С. 115–123.

Додаток А

Ідентифікація емісійних ліній в спектрі метеора, спостереженого

2 серпня 2011 року.

№	$\lambda_{\text{obs}}, \text{Å}$	$\lambda, \text{Å}$	АТОМ	I	$I_{\text{abs}}, \text{епг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Å}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$	$ \Delta\lambda , \text{Å}$	№	$\lambda_{\text{obs}}, \text{Å}$	$\lambda, \text{Å}$	АТОМ	I	$I_{\text{abs}}, \text{епг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Å}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$	$ \Delta\lambda , \text{Å}$
1	3685.50	3679.92	FeI(5)	97	355	5.58	54	4427.00	4427.31	FeI(2)	4166	1033	0.31
		3683.05	FeI(5)				55	4435.00	4434.96	CaI(4)	112	34	0.04
		3687.46	FeI(21)				56	4455.00	4454.78	CaI(4)	102	33	0.22
2	3708.00	3705.57	FeI(5)	164	528	2.43	57	4461.50	4461.65	FeI(2)	2356	593	0.15
		3707.83	FeI(5)				58	4481.00	4481.24	MgII(4)	5531	1369	0.24
		3709.25	FeI(21)					4482.17	FeI(2)				
3	3720.50	3719.94	FeI(5)	784	2389	0.56		4482.26	FeI(68)				
		3722.56	FeI(5)				59	4489.50	4489.74	FeI(2)	235	59	
4		3733.32	FeI(5)				60	4493.50	4494.57	FeI(68)	109	27	1.07
		3734.87	FeI(21)				61	4528.00	4528.62	FeI(68)	234	61	0.62
	3736.50	3737.13	FeI(5)	1191	3391	0.63	62	4531.00	4531.15	FeI(39)	110	35	0.15
5	3745.00	3745.56	FeI(5)	1804	4893	0.56	63	4549.00	4549.47	FeII(38)	99	29	0.47
		3745.90	FeI(5)				64	4571.00	4571.10	MgI(1)	264	73	0.10
6		3763.79	FeI(21)					4571.98	TiII(82)				
	3766.50	3767.19	FeI(21)	298	728	0.69	65	4583.00	4583.83	FeII(38)	117	37	0.83
7		3798.51	FeI(21)				66	4647.00	4646.17	CrI(21)	53	17	0.20
	3798.00	3799.55	FeI(21)	263	556	1.55		4647.43	FeI(409)				
8	3815.00	3815.84	FeI(45)	314	577	0.84	67	4703.00	4702.99	MnI(11)	67	36	0.01
9	3820.00	3820.43	FeI(20)	701	1315	0.43	68	4859.50	4859.75	FeI(318)	51	37	0.25
10	3824.50	3824.44	FeI(4)	1394	2562	0.06	69	4871.50	4871.32	FeI(318)	95	73	0.18
		3825.88	FeI(20)				4872.14	FeI(318)					
11		3827.83	FeI(45)				70	4890.76	FeI(318)				
	3828.50	3829.35	MgI(3)	1707	3061	0.85		4891.00	4891.50	FeI(318)	183	156	0.50
12	3832.00	3832.30	MgI(3)	2149	3767	0.30	71	4919.00	FeI(318)				
13	3837.50	3838.29	MgI(3)	2358	4018	0.79		4920.00	4920.51	FeI(318)	234	230	0.51
14	3856.00	3856.37	FeI(4)	1008	1549	0.37	72	4923.50	4923.92	FeII(42)	244	243	0.42
15	3859.50	3859.91	FeI(4)	3733	5566	0.41	73	4957.30	FeI(318)				
		3878.02	FeI(20)					4957.50	4957.60	FeI(318)	354	414	0.10
16	3878.00	3878.58	FeI(4)	963	1309	0.58	74	4983.00	4982.81	NaI(9)	57	75	0.19
	3886.00	3886.28	FeI(4)	2403	3074	0.28		4981.73	TiI(38)				
17	3886.00	3886.28	FeI(4)	2403	3074	0.28	75	4994.00	4994.13	FeI(16)	44	68	0.13
18	3894.50	3895.66	FeI(4)	1161	1418	1.16	76	5006.00	5006.13	FeI(318)	49	90	0.13
19	3899.00	3899.71	FeI(4)	935	1125	0.71	77	5012.00	5012.07	FeI(16)	61	127	0.07
20		3902.95	FeI(45)				78	5018.50	5018.43	FeII(42)	294	428	0.07
	3905.50	3905.53	SiI(3)	1179	1346	0.03	79	5041.50	5041.07	FeI(16)			
		3906.48	FeI(4)					5041.76	FeI(36)	173	267	0.26	
21		3920.26	FeI(4)				80	5051.50	5051.64	FeI(16)	58	92	0.14
	3922.50	3922.91	FeI(4)	1231	1250	0.41	81	5056.00	5056.02	SiII(5)	86	133	0.02
22	3933.50	3933.67	CaII(1)	43294	41074	0.17	82	5110.50	5110.41	FeI(1)	670	1188	0.09
23	3961.50	3961.53	AlI(1)	340	272	0.03	83	5168.00	5167.32	MgI(2)	8369	17538	0.68
	3968.50	3968.47	CaII(1)	36620	28239	0.03		5167.49	FeI(37)				
24		3969.26	FeI(43)				84	5171.60	FeI(36)				
	4005.50	4005.25	FeI(43)	191	122	0.25		5172.50	5172.68	MgI(2)	7948	16834	0.18
26		4030.76	MnI(2)				85	5183.50	5183.60	MgI(2)	8033	17488	0.10
		4033.07	MnI(2)				86	5195.00	5194.94	FeI(36)	204	443	0.06
	4034.00	4034.49	MnI(2)	941	546	0.49	87	5204.52	CrI(7)				
4045.50	4045.82	FeI(43)	1646	921	0.32	5205.50		5206.04	CrI(7)	334	710	0.54	
28	4063.50	4063.60	FeI(43)	921	488	0.10	88	5208.00	5208.44	CrI(7)	359	758	0.44
29	4071.50	4071.74	FeI(43)	827	428	0.24	89	5215.19	FeI(553)				
30	4077.00	4077.71	SrII(1)	370	212	0.71		5216.50	5216.28	FeI(36)	149	303	0.22
31	4131.50	4132.06	FeI(43)	606	268	0.56	90	5217.40	FeI(553)				
32	4143.50	4143.87	FeI(43)	753	326	0.37		5227.00	5227.19	FeI(37)	1287	2533	0.19
33	4201.50	4202.03	FeI(42)	721	271	0.53	91	5233.00	5232.95	FeI(383)	122	233	0.05
34	4216.00	4216.19	FeI(3)	1157	418	0.19	92	5270.00	5269.54	FeI(15)	6577	10405	0.46
35	4226.50	4226.73	CaI(2)	3824	1354	0.23		5270.36	FeI(37)				
	4251.00	4250.79	FeI(42)	492	166	0.21	93	5328.00	5328.04	FeI(15)	3345	4456	0.04
36		4250.13	FeI(152)					5328.53	FeI(37)				
	4254.00	4254.35	CrI(1)	1137	375	0.35	94	5339.94	FeI(553)				
38	4260.00	4260.48	FeI(152)	554	180	0.48		5341.00	5341.03	FeI(37)	161	206	0.03
39		4271.16	FeI(152)				95	5371.50	5371.49	FeI(15)	1440	1758	0.01
	4271.50	4271.76	FeI(42)	2174	690	0.26	96	5383.00	5383.37	FeI(1146)	25	65	0.37
40	4275.00	4274.80	CrI(1)	2006	555	0.2	97	5397.50	5397.13	FeI(15)	715	814	0.37
		4274.60	CrI(1)				98	5406.00	5405.78	FeI(15)	681	766	0.22
41	4282.00	4282.41	FeI(71)	133	47	0.41	99	5415.00	5415.20	FeI(1165)	51	57	0.20
42	4289.50	4289.72	CrI(1)	498	152	0.22	100	5424.00	5424.07	FeI(1146)	48	78	0.07
43	4293.50	4294.13	FeI(41)	692	208	0.63							

Закінчення додатка А

№	λ_{obs} , Å	λ , Å	АТОМ	I	I_{abs} , erg·c ⁻¹ ·Å ⁻¹ cp ⁻¹	$ \Delta\lambda $, Å	№	λ_{obs} , Å	λ , Å	АТОМ	I	I_{abs} , erg·c ⁻¹ ·Å ⁻¹ cp ⁻¹	$ \Delta\lambda $, Å
44	4298.00	4299.24	FeI(152)	225	66	1.24	101	5430.00	5429.70	FeI(15)	741	786	0.30
45	4302.00	4302.52	CaI(5)	91	38	0.52	102	5434.50	5434.53	FeI(15)	285	298	0.03
46	4307.50	4307.91	FeI(42)	1750	506	0.41	103	5447.00	5446.92	FeI(15)	592	607	0.08
47	4325.50	4325.77	FeI(42)	1801	513	0.27	104	5456.00	5455.61	FeI(15)	356	350	0.39
48	4340.00	4339.45	CrI(22)	92	31	0.55	105	5506.00	5506.78	FeI(15)	26	33	0.78
		4339.72	CrI(22)				106	5528.50	5528.41	MgI(9)	139	105	0.09
49		4351.05	CrI(22)				107	5587.00	5586.76	FeI(686)	106	61	0.24
	4351.50	4351.77	CrI(22)	325	87	0.27			5588.76	CaI(21)			
		4351.91	MgI(14)				108	5593.50	5594.47	CaI(21)	27	16	0.97
50	4375.50	4375.93	FeI(2)	4774	1235	0.43	109	5616.00	5615.65	FeI(686)	183	90	0.35
51	4383.50	4383.55	FeI(41)	4671	1218	0.05	110	5688.00	5688.21	NaI(6)	101	37	0.21
52	4404.50	4404.75	FeI(41)	2015	511	0.25	111	5890.00	5889.95	NaI(1)	24016	11255	0.05
53	4414.50	4415.13	FeI(41)	769	190	0.63	112	5895.50	5895.92	NaI(1)	16425	8796	0.42
113	6101.50	6102.72	CaI(3)	53	23	1.22	119	6229.50	6230.73	FeI(207)	78	34	1.23
114	6121.00	6122.22	CaI(3)	81	34	1.22	120	6245.50	6246.33	FeI(816)	42	20	0.83
115	6136.00	6136.62	FeI(169)	87	37	0.62	121	6251.50	6252.56	FeI(169)	64	29	1.06
		6137.70	FeI(207)				122	6334.00	6335.34	FeI(62)	5206	34	1.34
116	6161.00	6162.17	CaI(3)	204	86	1.17	123	6346.50	6347.10	SiII(2)	472	354	0.60
117		6169.06	CaI(20)				124	6358.00	6358.69	FeI(13)	49	37	0.69
	6169.50	6169.56	CaI(20)	54	22	0.06	125	6370.50	6371.36	SiII(2)	142	131	0.86
118	6190.50	6191.56	FeI(169)	55	24	1.06							

Додаток Б

Ідентифікація емісійних ліній в спектрі метеора, спостереженого

27 серпня 2011 року.

№	$\lambda_{\text{obs}}, \text{Å}$	$\lambda, \text{Å}$	АТОМ	$I_{\text{abs}}, \text{erg} \cdot \text{c}^{-1} \cdot \text{Å}^{-1} \text{cp}^{-1}$	$ \Delta\lambda , \text{Å}$
1		3733.32	FeI(5)		
		3734.87	FeI(21)		
	3737.60	3737.13	FeI(5)	71.54	0.47
2	3745.80	3745.56	FeI(5)	98.59	0.24
		3745.90	FeI(5)		
3	3828.00	3829.35	MgI(3)	62.6	1.35
4	3831.60	3832.30	MgI(3)	48.03	0.07
5	3839.00	3838.29	MgI(3)	46.35	0.71
6	3855.80	3856.37	FeI(4)	25.9	0.57
7	3860.40	3859.91	FeI(4)	34.55	0.49
8	3933.40	3933.67	CaII(1)	1495.7	0.27
9	3968.20	3968.47	CaII(1)	738.08	0.27
10	4132.80	4130.96	SiII(3)	13.82	0.74
		4128.11	SiII(3)		
11	4227.20	4226.73	CaI(2)	25.99	0.47
12	4308.60	4307.91	FeI(42)	12.81	0.69
13	4325.80	4325.77	FeI(42)	15.07	0.03
14	4376.20	4375.93	FeI(2)	15.91	0.27
15	4384.20	4383.55	FeI(41)	14.28	0.65
16	4403.50	4404.75	FeI(41)	13.39	1.25
17	4427.60	4427.31	FeI(2)	13.53	0.29
18	4461.80	4461.65	FeI(2)	11.3	0.15
19	4481.00	4481.24	MgII(4)	86.22	0.24
20	5168.20	5167.32	MgI(2)	61.64	0.88
		5167.49	FeI(37)		
21		5171.60	FeI(36)		
	5172.20	5172.68	MgI(2)	71.25	0.48
22	5182.80	5183.60	MgI(2)	75.25	0.80
23	5269.80	5269.54	FeI(15)	42.99	0.26
24	5890.40	5889.95	NaI(1)	106.89	0.45
25	5895.00	5895.92	NaI(1)	56.71	0.92
26	6347.60	6347.10	SiII(2)	24.5	0.50

Додаток В

Ідентифікація емісійних ліній в спектрі метеора, спостереженого

20 лютого 2012 року.

№	$\lambda_{\text{obs}}, \text{Å}$	$\lambda, \text{Å}$	АТОМ	$I_{\text{abs}}, \text{erg} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Å}^{-1} \cdot \text{cp}^{-1}$	$ \Delta\lambda , \text{Å}$
1	3719.00	3719.94	FeI(5)	9.14	0.94
		3722.56	FeI(5)		
2		3733.32	FeI(5)		
		3734.87	FeI(21)		
	3736.60	3737.13	FeI(5)	11.74	0.53
3		3745.56	FeI(5)		
	3747.80	3745.90	FeI(5)	19.63	1.90
4	3813.00	3812.96	FeI(22)	3.93	0.04
5	3816.50	3815.84	FeI(45)	4.27	0.66
6	3821.40	3820.43	FeI(20)	9.45	0.97
7	3824.60	3824.44	FeI(4)	9.97	0.16
		3825.88	FeI(20)		
8		3827.83	FeI(45)		
	3827.40	3829.35	MgI(3)	9.97	1.95
9	3833.00	3832.30	MgI(3)	5.80	0.70
10	3834.20	3834.23	FeI(20)	11.94	0.03
11	3838.20	3838.29	MgI(3)	3.78	0.09
12	3856.40	3856.37	FeI(4)	9.70	0.03
13	3860.40	3859.91	FeI(4)	9.58	0.49
14		3878.02	FeI(20)		
	3877.60	3878.58	FeI(4)	4.84	0.98
15	3886.20	3886.28	FeI(4)	9.61	0.08
16	3896.00	3895.66	FeI(4)	5.45	0.34
17	3900.60	3899.71	FeI(4)	7.69	0.89
18	3903.50	3902.95	FeI(45)	3.90	0.55
19	3920.50	3920.26	FeI(4)	11.55	0.24
20	3923.80	3922.91	FeI(4)	8.82	0.89
21	3928.80	3927.92	FeI(4)	11.77	0.88
22	3931.00	3930.30	FeI(4)	9.83	0.70
23	3934.60	3933.67	CaII(1)	3.97	0.93
24	3968.20	3968.47	CaII(1)	3.65	0.27
		3969.26	FeI(43)		
25		4030.76	MnI(2)		
		4033.07	MnI(2)		
	4034.20	4034.49	MnI(2)	1.95	0.29
26	4045.80	4045.82	FeI(43)	4.81	0.02
27	4063.40	4063.60	FeI(43)	3.51	0.20
28	4071.60	4071.74	FeI(43)	2.56	0.14
29	4133.00	4132.06	FeI(43)	1.82	0.94
30	4143.60	4143.87	FeI(43)	2.04	0.27
31	4202.20	4202.03	FeI(42)	0.60	0.17
32	4225.80	4226.73	CaI(2)	0.66	0.93
33	4250.40	4250.79	FeI(42)	0.78	0.39

Закінчення додатка В

№	$\lambda_{\text{obs}}, \text{Å}$	$\lambda, \text{Å}$	АТОМ	$I_{\text{abs}}, \text{erg} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Å}^{-1} \text{cp}^{-1}$	$ \Delta\lambda , \text{Å}$
34	4254.00	4254.35	CrI(1)	1.37	0.35
35	4260.00	4260.48	FeI(152)	0.73	0.48
36	4272.20	4271.76	FeI(42)	2.80	0.44
37	4288.00	4289.72	CrI(1)	0.37	1.72
38	4294.80	4294.13	FeI(41)	0.57	0.67
39	4307.80	4307.91	FeI(42)	1.58	0.11
40	4326.00	4325.77	FeI(42)	1.64	0.23
41	4377.00	4375.93	FeI(2)	0.65	1.07
42	4383.80	4383.55	FeI(41)	2.96	0.25
43	4405.40	4404.75	FeI(41)	1.60	0.65
44	4415.80	4415.13	FeI(41)	0.82	0.67
45	4428.00	4427.31	FeI(2)	0.72	0.69
46	5167.40	5167.32	MgI(2)	8.85	0.08
		5167.49	FeI(37)		
47	5172.60	5172.68	MgI(2)	6.02	0.08
48	5269.80	5269.54	FeI(15)	22.14	0.26
		5270.36	FeI(37)		
49	5328.20	5328.04	FeI(15)	10.54	0.16
		5328.53	FeI(37)		
50	5430.20	5429.70	FeI(15)	4.07	0.50
51	5890.00	5889.95	NaI(1)	12.70	0.05
52	5895.50	5895.92	NaI(1)	8.05	0.42

Додаток Д

Ідентифікація емісійних ліній в спектрі метеора, спостереженого

11 серпня 2012 року.

№	$\lambda_{\text{obs}}, \text{Å}$	$\lambda, \text{Å}$	АТОМ	$I_{\text{abs}}, \text{erg} \cdot \text{c}^{-1} \cdot \text{Å}^{-1} \text{cp}^{-1}$	$ \Delta\lambda , \text{Å}$
1	3719.00	3719.94	FeI(5)	184.39	0.94
		3722.56	FeI(5)		
2		3733.32	FeI(5)		
	3734.80	3734.87	FeI(21)	346.66	0.07
		3737.13	FeI(5)		
3		3736.90	CaII(3)		
	3746.40	3745.56	FeI(5)	295.57	0.84
		3745.90	FeI(5)		
		3748.26	FeI(5)		
4		3749.49	FeI(21)		
	3758.00	3758.24	FeI(21)	93.50	0.24
5		3759.29	TiII(13)		
	3819.60	3820.43	FeI(20)	97.99	0.83
6	3825.00	3824.44	FeI(4)	146.27	0.56
		3825.88	FeI(20)		
7		3827.83	FeI(45)		
	3828.00	3829.35	MgI(3)	142.07	1.35
8	3831.00	3832.30	MgI(3)	39.92	1.30
9	3838.20	3838.29	MgI(3)	349.46	0.09
10	3857.20	3856.37	FeI(4)	365.78	0.83
		3856.09	SiII(1)		
11	3860.40	3859.91	FeI(4)	450.69	0.49
		3862.51	SiII(1)		
12		3878.02	FeI(20)		
		3877.60	FeI(4)	99.05	0.98
13	3886.80	3886.28	FeI(4)	184.47	0.52
14	3895.80	3895.66	FeI(4)	51.53	0.14
15	3900.60	3899.71	FeI(4)	79.49	0.89
16	3905.20	3905.53	SiI(3)	75.18	0.33
		3906.48	FeI(4)		
17	3921.2	3920.26	FeI(4)	48.03	0.94
		3922.91	FeI(4)		
18	3933.60	3933.67	CaII(1)	12282	0.07
19	3968.60	3968.47	CaII(1)	8594.6	0.13
		4030.76	MnI(2)		
		4033.07	MnI(2)		
20		4034.80	MnI(2)	18.55	0.31
	4046.20	4045.82	FeI(43)	106.49	0.38
21	4063.40	4063.60	FeI(43)	63.71	0.20
22	4071.60	4071.74	FeI(43)	48.21	0.14
		4130.96	SiII(3)		
23		4128.11	SiII(3)		
	4203.00	4202.03	FeI(42)	10.96	0.97

№	$\lambda_{\text{obs}}, \text{Å}$	$\lambda, \text{Å}$	АТОМ	$I_{\text{abs}}, \text{erg} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Å}^{-1} \text{cp}^{-1}$	$ \Delta\lambda , \text{Å}$
26	4216.60	4216.19	FeI(3)	28.44	0.41
27	4226.80	4226.73	CaI(2)	81.25	0.07
28	4251.20	4250.79	FeI(42)	14.17	0.41
		4250.13	FeI(152)		
29	4253.00	4254.35	CrI(1)	1.51	1.35
30	4260.00	4260.48	FeI(152)	15.11	0.48
31		4271.16	FeI(152)		
	4271.40	4271.76	FeI(42)	38.73	0.36
32	4273.50	4274.80	CrI(1)	3.17	1.30
33	4290.60	4289.72	CrI(1)	11.08	0.88
34	4294.00	4294.13	FeI(41)	14.27	0.13
35	4307.80	4307.91	FeI(42)	26.84	0.11
36	4326.00	4325.77	FeI(42)	31.98	0.23
37	4352.50	4351.77	CrI(22)	10.49	0.65
		4351.91	MgI(14)		
		4352.73	FeI(71)		
38	4375.60	4375.93	FeI(2)	41.06	0.33
39	4383.40	4383.55	FeI(41)	44.66	0.15
40	4403.50	4404.75	FeI(41)	1.97	1.25
41	4414.60	4415.13	FeI(41)	10.39	0.53
42	4427.20	4427.31	FeI(2)	33.04	0.11
43	4461.60	4461.65	FeI(2)	23.17	0.05
44	4481.00	4481.24	MgII(4)	346.34	0.24
45	5017.00	5018.43	FeII(42)	3.89	1.43
46	5167.40	5167.32	MgI(2)	299.69	0.08
		5167.49	FeI(37)		
47	5170.00	5172.68	MgI(2)	51.42	2.68
48	5182.80	5183.60	MgI(2)	257.15	0.80
49	5270.40	5269.54	FeI(15)	63.14	0.86
		5270.36	FeI(37)		
50	5328.00	5328.04	FeI(15)	34.16	0.04
		5328.53	FeI(37)		
51	5890.00	5889.95	NaI(1)	237.98	0.05
52	5895.80	5895.92	NaI(1)	104.62	0.12
53	6347.00	6347.10	SiII(2)	182.99	0.10
54	6371.00	6371.36	SiII(2)	56.26	0.36

Додаток Е

Мультиплети FeI, виявлені в спектрах метеорів.

№ мультиплету	Довжина хвилі, Å	Терми	Енергетичні рівні, еВ	J	$\log gf$
1	5110.41	$a^5D - z^7D^0$	0.00 – 2.43	4–4	–3.760
2	4427.31	$a^5D - z^7F^0$	0.05 – 2.85	3–4	–3.044
3	4216.18	$a^5D - z^7P^0$	0.00–2.94	4–4	– 3.356
4	3859.91	$a^5D - z^5D^0$	0.00–3.21	4–4	– 0.710
5	3719.93	$a^5D - z^5F^0$	0.00–3.33	4–5	– 0.432
6	3440.61	$a^5D - z^5P^0$	0.00–3.60	4–3	– 0.673
7	3193.23	$a^5D - z^3F^0$	0.00–3.88	4–4	– 2.215
13	6498.94	$a^5F - z^7F^0$	0.96–2.87	3–3	– 4.687
14	5956.70	$a^5F - z^7P^0$	0.86–2.94	5–4	– 4.608
15	5269.54	$a^5F - z^5D^0$	0.86–3.21	5–4	– 1.321
16	5012.07	$a^5F - z^5F^0$	0.86–3.33	5–5	– 2.642
18	4177.59	$a^5F - z^3F^0$	0.91–3.88	4–4	– 3.058
19	4174.91	$a^5F - z^3D^0$	0.91–3.88	4–3	– 2.969
20	3820.42	$a^5F - y^5D^0$	0.86–4.10	5–4	0.119
21	3734.86	$a^5F - y^5F^0$	0.86–4.18	5–5	0.317
22	3812.96	$a^5F - z^3P^0$	0.96–4.21	3–2	– 1.064
23	3581.19	$a^5F - z^5G^0$	0.86–4.32	5–6	0.406
24	3570.10	$a^5F - z^3G^0$	0.91–4.39	4–5	0.153
28	3057.45	$a^5F - x^5D^0$	0.86–4.92	5–4	– 0.404
34	6581.21	$a^3F - z^5F^0$	1.48–3.37	4–4	– 4.679
35	5853.15	$a^3F - z^5F^0$	1.48–3.60	4–3	
36	5171.60	$a^3F - z^3F^0$	1.48–3.88	4–4	– 1.793
37	5167.49	$a^3F - z^3D^0$	1.48–3.88	4–3	– 1.118
38	4733.59	$a^3F - y^5D^0$	1.48–4.10	4–4	– 2.987
39	4602.94	$a^3F - y^5F^0$	1.48–4.18	4–5	– 2.220
40	4674.65	$a^3F - z^3P^0$	1.56–4.21	3–2	– 4.69
41	4383.54	$a^3F - z^5G^0$	1.48–4.31	4–5	0.200
42	4271.76	$a^3F - z^3G^0$	1.48–4.39	4–5	– 0.164
43	4045.81	$a^3F - y^3F^0$	1.48–4.55	4–4	0.280
44	4032.63	$a^3F - y^5P^0$	1.48–4.56	4–3	– 2.377
45	3815.85	$a^3F - y^3D^0$	1.48–4.73	4–3	0.232
46	3615.66	$a^3F - x^5D^0$	1.48–4.91	4–4	– 2.704
62	6430.85	$a^5P - y^5D^0$	2.18–4.10	3–4	– 2.006
63	6021.79	$a^5P - y^5F^0$	2.19–4.24	2–3	
64	6097.08	$a^5P - z^3P^0$	2.18–4.21	3–2	
65	5224.30	$a^5P - y^3F^0$	2.18–4.55	3–4	– 3.98
66	5202.34	$a^5P - y^5P^0$	2.18–4.56	3–3	– 1.838

Продовження додатка Е

№ мультиплету	Довжина хвилі, Å	Терми	Енергетичні рівні, еВ	J	$\log gf$
68	4528.61	$a^5P - x^5D^0$	2.18–4.89	3–4	– 0.822
71	4282.40	$a^5P - z^5S^0$	2.18–5.05	3–2	– 0.779
72	3977.74	$a^5P - x^5P^0$	2.20–5.29	2–2	– 1.119
73	3852.57	$a^5P - w^5D^0$	2.18–5.37	3–4	– 1.185
74	3776.45	$a^5P - v^5D^0$	2.18–5.43	3–4	– 1.493
75	3721.27	$a^5P - w^5F^0$	2.18–5.48	3–4	– 1.788
76	3732.40	$a^5P - y^5S^0$	2.20–5.49	2–2	– 0.551
83	3407.46	$a^5P - x^3F^0$	2.18–5.79	3–4	– 0.020
85	3399.33	$a^5P - w^3D^0$	2.20–5.82	2–2	– 0.621
109	6481.87	$a^3P^2 - y^5D^0$	2.28–4.17	2–2	– 2.984
111	6421.35	$a^3P^2 - z^3P^0$	2.28–4.19	2–2	– 2.027
112	5322.04	$a^3P^2 - y^3F^0$	2.28–4.59	2–3	– 2.803
113	5436.59	$a^3P^2 - y^5P^0$	2.28–4.54	2–3	– 2.964
114	5049.82	$a^3P^2 - y^3D^0$	2.28–4.71	2–3	– 1.355
115	4630.12	$a^3P^2 - x^5D^0$	2.28–4.93	2–3	– 2.587
120	3913.63	$a^3P^2 - w^5D^0$	2.28–5.42	2–3	– 1.663
124	3724.38	$a^3P^2 - x^3D^0$	2.28–5.58	2–3	– 0.820
131	3526.47	$a^3P^2 - y^3P^0$	2.28–5.77	2–2	– 0.920
150	5871.04	$z^7D^0 - d^3F$	2.46–4.56	2–2	
152	4260.47	$z^7D^0 - e^7D$	2.40–5.29	2–3	0.077
153	3920.84	$z^7D^0 - e^5P$	3.27–6.43	2–3	– 1.327
155	3225.79	$z^7D^0 - e^7F$	2.40–6.24	5–6	0.379
158	3233.97	$z^7D^0 - e^7P$	2.42–6.26	4–4	– 0.532
168	6494.98	$a^3H - z^5G^0$	2.40–4.31	6–5	– 1.273
169	6252.56	$a^3H - z^3G^0$	2.40–4.39	6–5	– 1.687
170	5858.27	$a^3H - y^3F^0$	2.42–4.53	5–4	
175	3873.76	$a^3H - y^3G^0$	2.43–5.63	5–4	– 0.876
177	3760.05	$a^3H - z^3I^0$	2.40–5.70	6–7	– 0.847
180	3659.52	$a^3H - z^3H^0$	2.45–5.84	4–4	– 0.943
206	6609.11	$b^3F^2 - z^3G^0$	2.56–4.43	4–4	– 2.692
207	6230.72	$b^3F^2 - y^3F^0$	2.56–4.55	4–4	– 1.281
208	6139.65	$b^3F - y^5P^0$	2.58–4.59	3–2	
209	5701.54	$b^3F^2 - y^3D^0$	2.56–4.73	4–3	– 2.216
210	5265.94	$b^3F - x^5D^0$	2.55–4.89	4–4	
214	4337.52	$b^3F^2 - w^5D^0$	2.59–5.46	3–3	
217	4067.27	$b^3F^2 - x^3D^0$	2.56–5.61	4–3	– 1.419
218	4055.04	$b^3F^2 - y^3G^0$	2.56–5.62	4–5	– 1.920
219	4005.48	$b^3F^2 - x^5G^0$	2.59–5.68	3–4	

Продовження додатка Е

№ мультиплету	Довжина хвилі, Å	Терми	Енергетичні рівні, еВ	J	$\log gf$
222	3813.06	$b^3F^2 - x^3F^0$	2.59–5.84	3–3	– 1.074
228	3711.22	$b^3F^2 - x^3G^0$	2.59–5.93	3–4	– 1.172
229	3668.89	$b^3F^2 - v^5F^0$	2.59–5.97	3–3	– 2.42
257	3253.94	$b^3F^2 - x^1D^0$	2.61–6.42	2–2	
268	6677.99	$a^3G - y^3F^0$	2.69–4.55	5–4	– 1.418
269	6180.21	$a^3G - y^3D^0$	2.73–4.73	4–3	– 2.649
273	4266.96	$a^3G - y^3G^0$	2.73–5.63	4–4	– 1.812
276	3998.05	$a^3G - u^5D^0$	2.69–5.79	5–4	– 0.910
277	3983.97	$a^3G - x^3F^0$	2.73–5.84	4–3	– 1.021
278	3997.39	$a^3G - z^3H^0$	2.73–5.83	4–5	– 0.479
279	3995.98	$a^3G - w^3D^0$	2.73–5.83	4–3	– 1.572
280	3897.89	$a^3G - w^5G^0$	2.69–5.87	5–6	– 0.736
282	3884.36	$a^3G - z^1G^0$	2.69–5.88	5–4	– 1.090
284	3910.84	$a^3G - x^3G^0$	2.76–5.93	3–4	– 1.549
287	3792.15	$a^3G - y^5H^0$	2.73–5.99	4–4	– 1.427
290	3704.46	$a^3G - y^1G^0$	2.69–6.04	5–4	– 0.580
291	3649.51	$a^3G - w^3F^0$	2.69–6.09	5–4	– 0.150
292	3684.11	$a^3G - v^3D^0$	2.73–6.09	4–3	– 0.374
294	3606.68	$a^3G - y^3H^0$	2.69–6.13	5–6	0.323
295	3651.47	$a^3G - v^3G^0$	2.76–6.15	3–4	0.021
318	4920.51	$z^7F^0 - e^7D$	2.83–5.35	5–4	0.068
320	4104.77	$z^7F^0 - e^5F$	2.80–5.80	6–5	
321	3610.16	$z^7F^0 - e^7F$	2.81–6.24	6–6	0.176
322	3575.25	$z^7F^0 - f^7D$	2.83–6.30	5–4	– 0.892
323	3825.14	$z^7F^0 - f^5D$	2.82–6.22	5–4	
325	3588.61	$z^7F^0 - e^5G$	2.83–6.29	5–5	– 0.597
326	3554.92	$z^7F^0 - e^7G^0$	2.83–6.32	5–6	0.538
342	6518.37	$b^3P - y^3D^0$	2.83–4.73	2–3	– 2.298
346	4741.53	$b^3P - w^5D^0$	2.83–5.45	2–3	– 1.764
349	4635.85	$b^3P - y^5S^0$	2.84–5.52	1–2	– 2.358
350	4466.55	$b^3P - x^3D^0$	2.83–5.61	2–3	– 0.600
352	4226.42	$b^3P - z^3S^0$	2.85–5.78	1–1	– 1.46
354	4181.75	$b^3P - u^5D^0$	2.83–5.80	2–3	– 0.371
355	4184.89	$b^3P - y^3P^0$	2.83–5.79	2–2	– 0.869
356	4121.80	$b^3P - x^3F^0$	2.83–5.84	2–3	– 1.450
357	4134.68	$b^3P - w^3D^0$	2.83–5.83	2–3	– 0.649
358	4066.97	$b^3P - ^1D^0$	2.83–5.88	2–2	
359	4062.44	$b^3P - y^3S^0$	2.85–5.89	1–1	– 0.862
362	3935.81	$b^3P - v^5F^0$	2.83–5.98	2–2	– 0.878

Продовження додатка Е

№ мультиплету	Довжина хвилі, Å	Терми	Енергетичні рівні, еВ	J	$\log gf$
364	3925.64	$b^3P - x^3P^0$	2.83–5.99	2–2	– 1.032
367	3786.18	$b^3P - v^3D^0$	2.83–6.11	2–2	– 0.86
369	3689.46	$z^7P^0 - f^7D$	2.94 –6.30	4–4	– 0.168
383	5232.94	$z^7P^0 - e^7D$	2.94–5.31	4–5	– 0.057
384	4768.40	$z^7P^0 - e^5D$	2.94–5.54	4–4	– 2.461
385	3701.09	$z^7P^0 - e^7F$	2.99–6.35	3–4	0.070
386	3689.46	$z^7P^0 - f^7D$	2.94–6.30	4–4	– 0.168
392	3707.04	$z^7P^0 - e^5S$	2.99–6.34	3–2	
394	3694.01	$z^7P^0 - e^7S$	3.04–6.39	2–3	0.078
405	6310.54	$b^3G - x^5D^0$	2.94–4.69	5–4	
409	4647.43	$b^3G - y^3G^0$	2.95–5.62	5–5	– 1.351
410	4556.13	$b^3G - x^5G^0$	2.94–5.64	5–5	
412	4358.50	$b^3G - u^5D^0$	2.95–5.79	5–4	– 1.683
413	4351.54	$b^3G - x^3F^0$	2.99–5.84	4–3	– 1.729
414	4367.58	$b^3G - z^3H^0$	2.99–5.82	4–5	– 1.309
416	4239.73	$b^3G - w^5G^0$	2.95–5.87	5–6	– 1.528
418	4140.24	$b^3G - v^5F^0$	2.94–5.92	5–4	
422	4123.75	$b^3G - w^3G^0$	2.96–5.97	4–4	
423	4120.21	$b^3G - z^1H^0$	2.99–5.99	4–5	– 1.267
424	4011.69	$b^3G - y^1G^0$	2.94–6.01	5–4	
426	3947.53	$b^3G - w^3F^0$	2.94–6.05	5–4	
429	3903.90	$b^3G - y^3H^0$	2.99–6.17	4–4	– 0.805
430	3693.391	$b^3G - v^3G^0$	2.94–6.11	5–5	
435	3670.09	$b^3G - x^3H^0$	2.95–6.33	5–6	– 0.72
437	3632.56	$b^3G - v^3F^0$	2.95–6.36	5–4	– 0.99
438	3608.17	$b^3G - u^3G^0$	2.99–6.42	4–3	
467	4786.81	$c^3P - x^3D^0$	3.02–5.61	2–3	– 1.606
476	4305.45	$c^3P - y^3S^0$	3.02–5.90	2–1	– 1.335
476a	4182.38	$c^3P - v^5F^0$	3.02–5.98	2–2	– 1.180
482	4170.90	$c^3P - x^3P^0$	3.02–5.99	2–2	– 1.086
486	4031.24	$c^3P - v^3D^0$	3.02–6.09	2–3	
488	3867.22	$c^3P - w^3P^0$	3.02–6.22	2–2	– 0.451
517	4343.70	$a^1G - w^5G^0$	3.05–5.90	4–4	– 1.801
518	4369.77	$a^1G - z^1G^0$	3.05–5.88	4–4	– 0.804
520	4302.19	$a^1G - x^3G^0$	3.05–5.93	4–4	– 1.716
522	4199.10	$a^1G - z^1H^0$	3.05–5.99	4–5	0.156
523	4143.41	$a^1G - y^1G^0$	3.05–6.04	4–4	– 0.204
524	4074.79	$a^1G - w^3F^0$	3.05–6.09	4–4	– 1.114

Продовження додатка Е

№ мультиплету	Довжина хвилі, Å	Терми	Енергетичні рівні, еВ	J	$\log gf$
526	3994.11	$a^1G - y^3H^0$	3.05–6.15	4–5	– 1.615
527	4017.15	$a^1G - v^3G^0$	3.05–6.13	4–5	– 1.063
528	3843.26	$a^1G - z^1F^0$	3.05–6.27	4–3	– 0.241
534a	3895.054	$a^1G - 6^0$	3.03–6.37	4–5	
553	5324.18	$z^5D^0 - e^5D$	3.21–5.54	4–4	– 0.103
554	4736.77	$z^5D^0 - e^5F$	3.21–5.83	4–5	– 0.752
555	4531.63	$z^5D^0 - e^3F$	3.21–5.95	4–4	
556	4009.54	$z^5D^0 - e^7F$	3.21–6.30	4–5	
558	4076.63	$z^5D^0 - f^5D$	3.21–6.25	4–4	– 0.529
559	4067.98	$z^5D^0 - e^7P$	3.21–6.26	4–4	– 0.472
560	4030.49	$z^5D^0 - e^5G$	3.21 –6.29	4–5	– 0.555
561	3946.99	$z^5D^0 - e^7G$	3.21–6.35	4–5	– 0.998
562	3966.50	$z^5D^0 - f^5F$	3.29–6.41	0–1	
563	3997.48	$z^5D^0 - e^5S$	3.24–6.34	3–3	
565	3928.08	$z^5D^0 - g^5D$	3.21–6.37	4–4	– 0.930
569	3647.84	$z^5D^0 - h^5D$	3.24–6.64	3–3	
570	3667.25	$z^5D^0 - f^5P$	3.21–6.59	4–3	– 0.74
585	5030.78	$b^3H - z^3I^0$	3.24–5.70	6–7	– 2.830
586	4975.41	$b^3H - u^5D^0$	3.30–5.79	4–4	
588	4788.76	$b^3H - z^3H^0$	3.24–5.83	6–6	– 1.763
594	4537.67	$b^3H - z^1H^0$	3.27–5.99	5–5	– 2.98
598	4280.54	$b^3H - v^3G^0$	3.24–6.13	6–5	– 2.03
603	4006.31	$b^3H - v^3F^0$	3.27–6.36	5–4	– 0.95
604	3948.77	$b^3H - u^3G^0$	3.27–6.41	5–4	– 0.359
606	3916.73	$b^3H - 1H^0$	3.24–6.40	6–5	– 0.604
607	3797.51	$b^3H - w^3H^0$	3.24–6.50	6–6	0.109
608	3765.54	$b^3H - y^3I^0$	3.24–6.53	6–7	0.482
611	3566.31	$a^3P^2 - w^5P^0$	2.28–5.75	2–1	– 1.72
626	5535.42	$a^3D - w^5F^0$	3.24–5.47	3–2	
633	4808.15	$a^3D - w^3D^0$	3.25–5.83	3–3	– 2.74
635	4727.01	$a^3D - y^3S^0$	3.28–5.87	1–1	
645	4343.27	$a^3D - v^3D^0$	3.25–6.11	3–2	– 1.66
649	4172.12	$a^3D - w^3P^0$	3.25–6.22	3–2	– 0.893
651	4099.08	$a^3D - x^1G^0$	3.24–6.25	3–4	
655	3986.17	$a^3D - v^3F^0$	3.25–6.36	3–4	
661	3951.16	$a^3D - y^1D^0$	3.27–6.41	1–2	– 0.299
664	3846.80	$a^3D - t^3D^0$	3.25–6.47	3–3	– 0.016
665	3779.45	$a^3D - t^3D^0$	3.28–6.55	1–1	– 1.171
686	5615.64	$z^5F^0 - e^5D$	3.33–5.54	5–4	0.050

Продовження додатка Е

№ мультиплету	Довжина хвилі, Å	Терми	Енергетичні рівні, еВ	J	$\log gf$
687	4966.09	$z^5F^0 - e^5F$	3.33–5.83	5–5	– 0.871
688	4741.07	$z^5F^0 - e^3F$	3.33–5.95	5–4	
689	4224.17	$z^5F^0 - e^7F$	3.37–6.30	4–5	– 0.506
692	4264.20	$z^5F^0 - e^7P$	3.37–6.28	4–3	– 1.510
694	4154.81	$z^5F^0 - e^7G$	3.37–6.35	4–5	– 0.400
695	4153.90	$z^5F^0 - f^5F$	3.39–6.38	3–4	– 0.321
696	4208.60	$z^5F^0 - e^7F^0$	3.39–6.34	3–3	
698	4084.49	$z^5F^0 - g^5D$	3.33–6.37	5–4	– 0.710
718	5029.62	$a^1P^0 - ^1D^0$	3.41–5.88	1–2	– 2.00
726	4136.99	$a^1P - y^1D^0$	3.42–6.41	1–2	– 0.452
727	4127.81	$a^1P - x^1D^0$	3.41–6.42	1–2	
733	3891.93	$a^1P - v^3P^0$	3.42–6.59	1–1	– 0.734
738	6018.66	$a^1D - x^3D^0$	3.53–5.58	2–3	
753	4789.65	$a^1D^0 - ^1F^0$	3.55–6.13	2–3	– 0.958
755	4547.85	$a^1D - z^1F^0$	3.55–6.27	2–3	– 1.012
767	4059.71	$a^1D - v^3P^0$	3.55–6.60	2–1	– 1.373
768	3989.86	$a^1D - ^5F^0$	3.55–6.65	2–3	– 1.05
769	3973.65	$a^1D - x^1F^0$	3.55–6.67	2–3	– 1.016
772	3682.24	$a^1D - w^1D^0$	3.55–6.91	2–2	0.20
782	5584.76	$a^1H - u^5D^0$	3.57–5.79	5–4	– 2.27
786	5365.403	$a^1H - z^1G^0$	3.57–5.88	5–4	– 1.020
791	5028.13	$a^1H - y^1G^0$	3.57–6.04	5–4	– 1.123
792	4927.42	$a^1H - w^3F^0$	3.57–6.09	5–4	– 2.073
795	4587.13	$a^1H - x^1G^0$	3.57–6.28	5–4	– 1.737
800	4219.36	$a^1H - y^3I^0$	3.57–6.51	5–6	– 0.000
801	4118.55	$a^1H^0 - ^1I^0$	3.57–6.58	5–6	0.215
802	4014.53	$a^1G - ^1F^0$	3.05–6.13	4–3	– 0.587
805	3748.49	$a^1H - v^3H^0$	3.56–6.85	5–6	
816	6400.00	$z^5P^0 - e^5D$	3.60–5.54	3–4	– 0.290
820	4673.16	$z^5P^0 - f^7D$	3.65–6.31	2–3	– 1.059
821	4678.85	$z^5P^0 - f^5D$	3.60–6.25	3–4	– 0.833
822	4667.45	$z^5P^0 - e^7P$	3.60–6.26	3–4	– 0.751
823	4560.09	$z^5P^0 - e^5G$	3.60–6.32	3–4	– 1.88
826	4525.14	$z^5P^0 - e^5S$	3.60–6.34	3–2	
828	4484.22	$z^5P^0 - g^5D$	3.60–6.37	3–4	– 0.864
830	4469.38	$z^5P^0 - e^5P$	3.65–6.43	2–3	– 0.477
839	5538.52	$a^1I - w^5G^0$	3.63–5.87	6–6	
843	5242.49	$a^1I - z^1H^0$	3.63–5.99	6–5	– 0.967
849	4309.03	$a^1I - y^3I^0$	3.63–6.51	6–6	– 1.149

Продовження додатка Е

№ мультиплету	Довжина хвилі, Å	Терми	Енергетичні рівні, еВ	J	$\log gf$
864	6043.736	$b^3D - x^5G^0$	3.63–5.67	3–3	
867	5760.34	$b^3D - y^3P^0$	3.64–5.79	3–2	– 2.44
869	5611.36	$b^3D - w^3D^0$	3.64–5.84	1–2	
871	5539.28	$b^3D - ^1D^0$	3.64–5.88	3–2	– 2.61
875	5327.25	$b^3D - v^5F^0$	3.62–5.94	2–3	
880	5217.92	$b^3D - x^3P^0$	3.64–6.02	2–1	– 1.719
883	5027.23	$b^3D - w^3F^0$	3.64–6.11	2–3	– 1.885
884	5054.64	$b^3D - v^3D^0$	3.64–6.09	2–3	– 1.921
888	4802.88	$b^3D - w^3P^0$	3.64–6.22	3–2	– 1.514
889	4706.30	$b^3D - x^1G^0$	3.62–6.24	3–4	
903	4360.80	$b^3D - u^3D^0$	3.64–6.48	3–2	– 1.84
906	4246.09	$b^3D - v^3P^0$	3.64–6.56	3–2	– 1.102
913	3962.35	$z^5D^0 - e^7S$	3.27–6.39	2–3	– 1.70
926	5543.04	$b^1G - x^3G^0$	3.68–5.91	4–5	
927	5423.74	$b^1G^2 - y^5H^0$	3.69–5.98	4–5	
929	5288.52	$b^1G^2 - y^1G^0$	3.69–6.04	4–4	– 1.508
933	4809.14	$b^1G^2 - z^1F^0$	3.69–6.27	4–3	
935	4700.17	$b^1G - x^3H^0$	3.68–6.30	4–5	
952	3661.36	$a^3H - x^3F^0$	2.45–5.84	4–3	– 2.40
959	5976.78	$z^3F^0 - e^3F$	3.94–6.02	3–3	
965	5001.86	$z^3F^0 - e^3D$	3.88–6.36	4–3	– 0.01
966	4987.83	$z^3F^0 - g^5D$	3.86–6.34	4–4	
969	4630.79	$z^3F^0 - g^5F$	3.93–6.59	3–4	
974	4556.13	$z^5P^0 - f^7D$	3.60–6.32	3–2	– 0.787
982	6008.56	$z^3D^0 - e^3F$	3.88–5.95	3–4	
984	5005.71	$z^3D^0 - e^3D$	3.88–6.36	3–3	
985	4977.65	$z^3D^0 - g^5D$	3.93–6.42	2–3	
993	4265.27	$z^3D^0 - f^3F$	3.93–6.84	2–3	
994	4310.37	$z^3D^0 - e^3P$	3.93–6.80	2–2	– 1.48
1012	6509.62	$c^3F - y^5H^0$	4.08–5.98	4–5	
1015	6157.73	$c^3F - w^3F^0$	4.08–6.09	4–4	– 1.22
1017	5975.35	$c^3F - y^3H^0$	4.08–6.15	4–5	
1018	6027.05	$c^3F - v^3G^0$	4.08–6.13	4–5	– 1.089
1019	6362.88	$c^3F - ^1F^0$	4.19–6.13	2–3	– 1.93
1025	5487.75	$z^5G^0 - g^5F$	4.32–6.58	6–5	
1029	5476.29	$c^3F - u^3G^0$	4.14–6.41	3–4	– 0.935
1031	5293.96	$c^3F - u^3D^0$	4.14–6.48	3–2	– 1.84
1041	4881.72	$b^3H - z^3H^0$	3.30–5.84	4–4	– 1.781
1042	4800.65	$c^3F - t^3G^0$	4.14–6.73	3–4	– 1.029

Продовження додатка Е

№ мультиплету	Довжина хвилі, Å	Терми	Енергетичні рівні, еВ	J	$\log gf$
1053	5668.84	$y^5D^0-e^7F$	4.14–6.31	3–3	
1060	5666.79	$y^5D^0-e^5S$	4.15–6.34	3–2	
1061	5481.44	$y^5D^0-e^3D$	4.19–6.45	2–1	– 1.42
1062	5476.56	$y^5D^0-g^5D$	4.10–6.37	4–4	– 0.453
1063	5534.68	$y^5D^0-e^7S$	4.14–6.37	3–3	
1064	5334.32	$y^5D^0-e^7P$	4.09–6.40	4–3	
1065	5027.12	$y^5D^0-g^5F$	4.15–6.62	3–4	
1066	4983.85	$y^5D^0-h^5D$	4.10–6.59	4–4	
1067	4982.507	$y^5D^0-f^5P$	4.10–6.59	4–3	
1068	4745.806	$z^5P^0-f^5D$	3.65–6.27	2–3	– 1.270
1071	4720.997	$y^5D^0-f^3P$	4.14–6.75	3–4	
1082	6032.67	$y^5F^0-e^7P$	4.20–6.25	4–3	
1085	5943.62	$y^5F^0-e^7F$	4.26–6.34	3–3	
1087	5662.525	$y^5F^0-g^5D$	4.18–6.37	5–4	– 0.573
1089	5162.288	$y^5F^0-g^5F$	4.18–6.58	5–5	
1090	5137.388	$y^5F^0-h^5D$	4.18–6.59	5–4	– 0.43
1091	5196.100	$y^5F^0-f^5P$	4.26–6.64	3–2	
1092	5133.692	$y^5F^0-f^5G$	4.18–6.59	5–6	
1094	5074.757	$y^5F^0-e^3G$	4.22–6.66	4–5	– 0.23
1095	5148.234	$y^5F^0-f^3D$	4.26–6.66	3–3	
1098	4842.71	$y^5F^0-f^3F$	4.22–2.78	4–4	
1102	4225.71	$y^5F^0-i^5D$	4.22 –7.15	4–4	
1103	4112.972	$y^5D^0-i^5D$	4.15–7.17	3–3	
1107	5762.992	$z^3P^0-e^3D$	4.21–6.36	2–3	– 0.47
1108	5608.98	$z^3P^0-g^5D$	4.21–6.42	2–3	
1111	4993.687	$z^3P^0-h^5D$	4.21– 6.69	2–2	– 1.45
1128	5856.084	$b^1D^2-y^1D^0$	4.29–6.41	2–2	– 1.328
1138	6428.80	$z^5G^0-f^7D$	4.35–6.27	4–4	
1142	6034.04	$z^5G^0-g^5D$	4.31–6.37	5–4	
1143	5469.29	$z^5G^0-g^5F$	4.29–6.55	5–5	
1144	5466.404	$z^5G^0-h^5D$	4.37–6.64	4–3	
1145	5455.433	$z^5G^0-f^5G$	4.32–6.59	6–6	
1146	5424.072	$z^5G^0-e^5H$	4.32–6.61	6–7	
1147	5409.125	$z^5G^0-e^3G$	4.37–6.66	4–5	– 1.27
1150	5031.901	$z^5G^0-f^3F$	4.37– 6.84	4–3	– 1.65
1151	4618.568	$b^3G-y^3G^0$	2.95–5.63	5–4	– 2.407
1159	5780.83	$z^5D^0-e^7D$	3.27–5.41	2–2	
1163	5445.045	$z^3G^0-e^3G$	4.39–6.66	5–5	
1164	5560.230	$z^3G^0-f^3D$	4.44 –6.66	4–3	– 1.16

Закінчення додатка Е

№ мультиплету	Довжина хвилі, Å	Терми	Енергетичні рівні, еВ	J	$\log gf$
1165	5415.201	$z^3G^0-e^3H$	4.39–6.68	5–6	0.642
1166	5178.798	$z^3G^0-f^3F$	4.39–6.78	5–4	– 1.82
1175	5983.704	$y^3F^0-g^5F$	4.55–6.62	4–4	
1176	5949.35	$y^3F^0-h^5D$	4.61–6.69	3–2	
1178	6024.066	$y^3F^0-f^5G$	4.55–6.61	4–5	
1179	5816.36	$y^3F^0-e^5H$	4.55–6.68	4–5	– 0.601
1180	5862.357	$y^3F^0-e^3G$	4.55–6.66	4–5	
1181	5914.16	$y^3F^0-e^3G$	4.61–6.70	3–4	
1182	5686.532	$y^3F^0-e^3H$	4.55–6.73	4–5	– 0.446
1183	5554.89	$y^3F^0-f^3F$	4.55–6.78	4–4	
1184	5642.75	$y^3F^0-e^3P$	4.61–6.80	3–2	– 2.10
1197	6633.75	$y^5P^0-e^5P$	4.56–6.43	3–3	– 0.799
1201	5880.03	$y^5P^0-f^5G$	4.56–6.67	3–4	
1204	5759.54	$y^5F^0-g^5D$	4.30–6.45	1–2	
1206	4776.38	$y^5P^0-i^5D$	4.56–7.15	3–4	
1207	4661.53	$y^5P^0-^5P$	4.56–7.22	3–2	– 1.26
1253	6569.22	$y^3D^0-g^5F$	4.73–6.62	3–4	– 0.45
1258	6419.95	$y^3D^0-f^3D$	4.73–6.66	3–3	– 0.27
1259	6102.18	$y^3F^0-h^5D$	4.61–6.64	3–3	
1260	5984.81	$y^3D^0-e^3P$	4.73–6.80	3–2	
1314	5655.50	$x^5F^0-g^5G$	5.03–7.24	4–5	

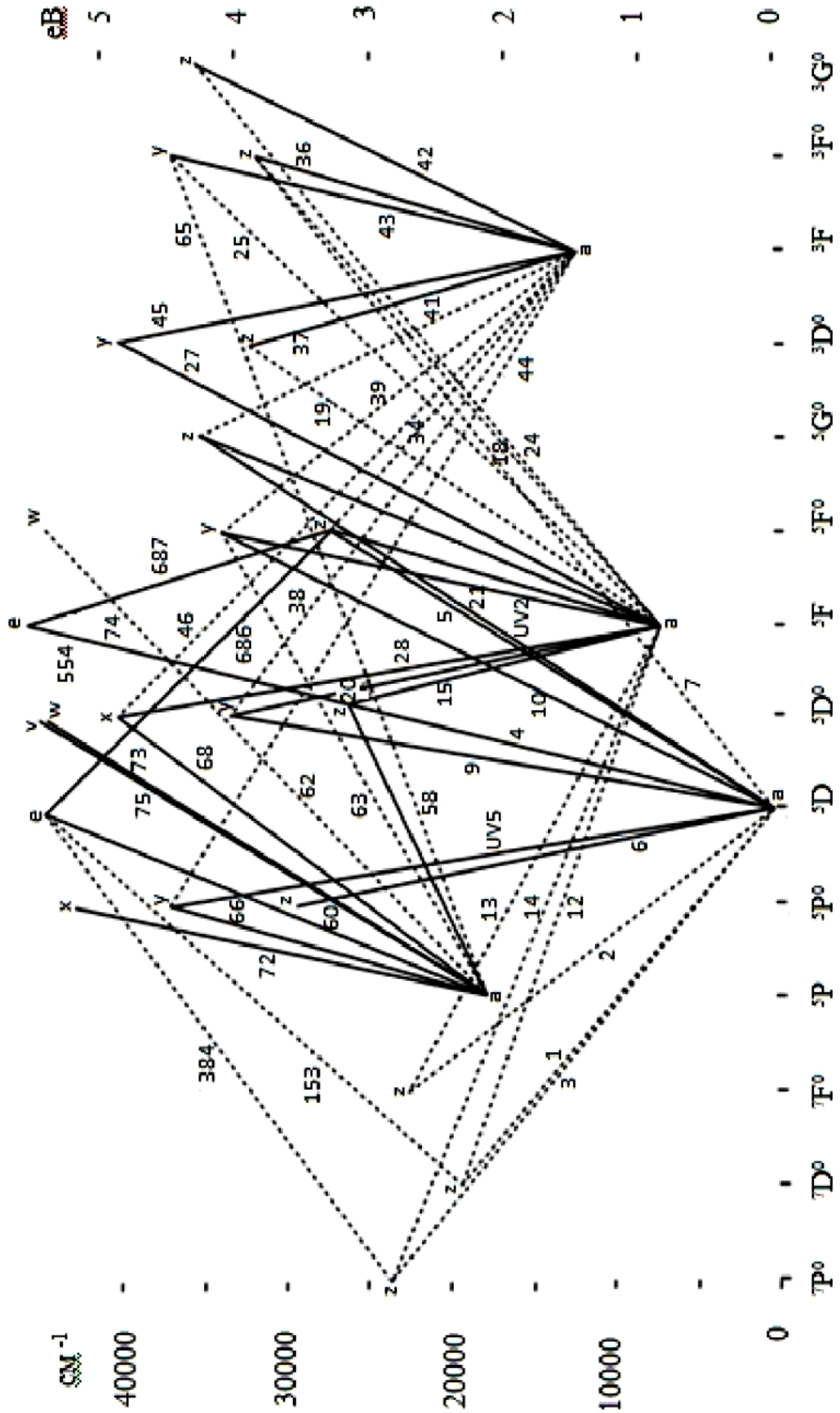
Додаток Ж

Мультиплети FeII, виявлені в спектрах метеорів.

№ мультиплету	Довжина хвилі, Å	Терми	Енергетичні рівні, еВ	J	$\log gf$
1	3277.35	$a^4D - z^6D^0$	0.99–4.77	$3^{\frac{1}{2}}-4^{\frac{1}{2}}$	- 2.27
6	3227.74	$a^4P - z^4D^0$	1.67–5.51	$2^{\frac{1}{2}}-3^{\frac{1}{2}}$	- 0.96
7	3196.07	$a^4P - z^4F^0$	1.67–5.55	$2^{\frac{1}{2}}-3^{\frac{1}{2}}$	- 1.70
11	4818.26	$a^2P - z^6D^0$	2.27–4.83	$1^{\frac{1}{2}}-2^{\frac{1}{2}}$	
27	4233.16	$b^4P - z^4D^0$	2.58–5.51	$2^{\frac{1}{2}}-3^{\frac{1}{2}}$	- 1.81
28	4178.85	$b^4P - z^4F^0$	2.58–5.55	$2^{\frac{1}{2}}-3^{\frac{1}{2}}$	- 2.44
32	4314.289	$a^4H - z^4F^0$	2.66–5.52	$4^{\frac{1}{2}}-3^{\frac{1}{2}}$	
35	5171.82	$b^4F - z^6F^0$	2.79–5.18	$4^{\frac{1}{2}}-5^{\frac{1}{2}}$	
37	4629.33	$b^4F - z^4F^0$	2.81–5.48	$4^{\frac{1}{2}}-4^{\frac{1}{2}}$	- 2.26
38	4563.83	$b^4F - z^4D^0$	2.79–5.49	$4^{\frac{1}{2}}-3^{\frac{1}{2}}$	
40	6516.08	$a^6S - z^6D^0$	2.89–4.79	$2^{\frac{1}{2}}-3^{\frac{1}{2}}$	- 3.37
41	5284.09	$a^6S - z^6F^0$	2.89–5.24	$2^{\frac{1}{2}}-3^{\frac{1}{2}}$	- 3.2
42	5169.03	$a^6S - z^6P^0$	2.89–5.29	$2^{\frac{1}{2}}-3^{\frac{1}{2}}$	- 0.87
	5018.44		2.89–5.36	$2^{\frac{1}{2}}-2^{\frac{1}{2}}$	- 1.35
	4923.92		2.89–5.41	$2^{\frac{1}{2}}-1^{\frac{1}{2}}$	- 1.21
46	5991.37	$a^4G - z^6F^0$	3.15–5.22	$5^{\frac{1}{2}}-4^{\frac{1}{2}}$	- 3.6
48	5362.86	$a^4G - z^4D^0$	3.19–5.49	$3^{\frac{1}{2}}-4^{\frac{1}{2}}$	
49	5316.61	$a^4G - z^4F^0$	3.15–5.48	$5^{\frac{1}{2}}-4^{\frac{1}{2}}$	- 1.78
55	5534.84	$b^2H - z^4F^0$	3.24–5.48	$5^{\frac{1}{2}}-4^{\frac{1}{2}}$	- 2.9
74	6456.38	$b^4D - z^4P^0$	3.90–5.82	$3^{\frac{1}{2}}-2^{\frac{1}{2}}$	- 2.2
81	3259.05	$b^4D - y^4F^0$	3.90–7.71	$3^{\frac{1}{2}}-4^{\frac{1}{2}}$	- 0.97
163	6179.38	$c^2F - z^2D^0$	5.57–7.58	$3^{\frac{1}{2}}-2^{\frac{1}{2}}$	- 2.8
199	6446.41	$c^4F - x^4G^0$	6.22–8.15	$3^{\frac{1}{2}}-4^{\frac{1}{2}}$	- 2.08
200	6305.29	$c^4F - x^4F^0$	6.22–8.18	$4^{\frac{1}{2}}-4^{\frac{1}{2}}$	- 2.09
203	6487.34	$d^2F - x^2G^0$	6.81–8.72	$3^{\frac{1}{2}}-4^{\frac{1}{2}}$	- 2.5

Додаток К

Ліва частина загальної діаграми Гротріана для мультиплетів заліза FeI.



Додаток Л

Центральна частина загальної діаграми Гротріана для
мультиплетів заліза FeI.

