



УДК 523.64-864-335

Люмінесцентний континуум та інші спектральні особливості комети C/2007 N3 (Lulin)

К.І. Чурюмов, В.О. Пономаренко, В.В. Клецонок, О.Р. Баранський, Н.С. Коваленко

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Представлено результати спостережень і досліджень комети C/2007 N3 (Lulin) по оптичним спектрам з середньою роздільною здатністю. Спектри були отримані 23–25.02.2009 року за допомогою 2-м телескопа Zeiss ($F_1=6.3$ м; $F_2=16$ м) на високогірній астрономічній станції «Терскол» Головної Астрономічної Обсерваторії НАН України і Інституту Астрономії РАН. З роздільною здатністю $\lambda/\Delta\lambda=3500$ (квазі-ешеле) отримано 7 спектрів комети (3780–7600 Å) з експозицією $T=3600$ с. Комета знаходилася на геліоцентричній відстані $r=1.38$ а.о. і геоцентричній — $\Delta=0.41$ а.о., мала блиск 6^m , фазовий кут дорівнював $S-T-O=10^\circ$, кут елонгації $S-O-T=165^\circ$, позиційний кут $\alpha=292^\circ$. Проведена ідентифікація спектральних емісійних ліній. Спектри досліджено на предмет наявності люмінесцентного континууму. Обчислені параметри люмінесцентного континууму і деякі інші фізичні параметри нейтральної коми комети. Отримана залежність альbedo від довжини хвилі.

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ КОНТИНУУМ И ДРУГИЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОМЕТЫ C/2007 N3 (LULIN), Чурюмов К.И., Пономаренко В.А., Клецонок В.В., Баранский А.Р., Коваленко Н.С. — Представлены результаты наблюдений и исследованной кометы C/2007 N3 (Lulin) по оптическим спектрам со средней разрешающей способностью. Спектры были получены 23–25.02.2009 года с помощью 2-м телескопа Zeiss ($F_1=6.3$ м; $F_2=16$ м) на высокогорной астрономической станции «Терскол» Главной Астрономической обсерватории НАН Украины и Института Астрономии РАН. С разрешающей способностью $\lambda/\Delta\lambda=3500$ (квази-ешелле) получено 7 спектров кометы (3780–7600 Å) с экспозицией $T=3600$ с. Комета находилась на гелиоцентрическом расстоянии $r=1.38$ а.е. и геоцентрическом — $\Delta=0.41$ а.е. имела блеск 6^m , фазовый угол был равен $S-T-O=10^\circ$, угол элонгации $S-O-T=165^\circ$, позиционный угол $\alpha=292^\circ$. Проведена идентификация спектральных эмиссионных линий. Спектры исследованы на предмет наличия люминесцентного континуума. Посчитаны параметры люминесцентного континуума и некоторые другие физические параметры нейтральной комы кометы. Получена зависимость изменения альbedo от длины волны.

LUMINESCENT CONTINUUM AND OTHER SPECTRAL FEATURES OF COMETS C/2007 N3 (LULIN), by Churyumov K.I., Ponomarenko V.A., Kleshchonok V.V., Baransky A.R., Kovalenko N.S. — The results of the observations and studies of the comet C/2007 N3 (Lulin) on the optical spectra of medium resolution. Spectra were obtained using 23-25.02.2009, the 2nd telescope Zeiss ($F_1=6.3$ м; $F_2=16$ м) at high mountain astronomical station "Terskol" Main Astronomical Observatory, National Academy of Sciences of Ukraine and the Institute of Astronomy of the RAS. With a resolution of $\lambda/\Delta\lambda=3500$ (echelle) obtained 7 spectra of the comet (3780–7600 Å) with exposure to $T=3600$ s. The comet was at heliocentric distance $r=1.38$ AU and geocentric — $\Delta=0.41$ AU had the integral magnitude equal to $m_1=6^m$, the phase angle was $S-T-O=10^\circ$, elongation angle $S-O-T=165^\circ$, position angle $\alpha=292^\circ$. Identified on the spectral emission lines. The spectra were examined for the presence luminescent continuum. Determined some physical parameters of luminescent continuum and some other physical parameters of the neutral coma of the comet. The dependence of the change in albedo on wavelength was obtained.

Ключевые слова: комета C/2007 N3 (Лулинь); спектр; эмиссионные линии; люминесцентный континуум.

Key words: comet C/2007 N3 (Lulin); spectrum; emission lines; luminescent continuum.

1. ОСОБЛИВОСТІ СПОСТЕРЕЖЕНЬ І ОБРОБКИ СПЕКТРІВ КОМЕТИ

Комета C/2007 N3 (Lulin) — довгоперіодична комета, відкрита 11 червня 2007 року 19-річним китайським астрономом Цюаньчжи Є на знімках, зроблених Чи-Шен Лінем (англ. Lin Chi-Sheng) з тайванської обсерваторії.

Розрахунки орбіти показали, що спостережуваний в 2009 році проліт комети скоріше всього є її першим прольотом по внутрішній частині Сонячної системи.

Комета Лулінь світилася зеленуватим світлом, що пояснюється взаємодією сонячних променів з двоатомними молекулами карбону (C_2) та отруйного газу ціану (мономер CN), які входять у склад ядра комети.

На знімках комети починаючи з січня спостерігались два її хвоста: пиловий і іонний, причому через особливості геометричного положення комети до 26 лютого пиловий хвіст був спрямований в бік Сонця [7]. 4 лютого 2009 року було зафіксовано відокремлення іонного хвоста від комети. Швидше за все це було зумовлено дією магнітних полів в сонячному спектрі.

Як було сказано вище, спектри комети C/2007 N3 (Lulin) були отримані 23–25.02.2009 року за допомогою ешеле-спектрографа, ПЗЗ-камери FLI PL4301E (з чіпом 50×50 мм, поле $11' \times 11'$, 1247×1151

піксель) і телескопа-рефлектора Zeiss-2000 ($F_1 = 6.3$ м; $F_2 = 16$ м). Роздільна здатність кометних спектрів $\lambda/\Delta\lambda = 3500$ (квазі-ешеле). Отримано 7 спектрів комети Lulin (3780–7600Å) з експозицією $T = 3600$ с.

Над спектрами комети була виконана наступна робота: проведена ідентифікація спектральних емісійних ліній, виявлено люмінесцентний континуум і визначено його параметри, отримана залежність альbedo від довжини хвилі, підраховано деякі фізичні параметри нейтральної коми комети.

Первинні редуції знімків комети C/2007 N3 (Lulin) були виконані за допомогою програмного забезпечення DECH95 та DECH20T. DECH дозволяє виконувати редуцію зображень, отриманих на ПЗЗ, враховувати рівень bias, вплив випромінювання космічних частинок, плоскі поля та вклад нічного неба. Дисперсійні криві побудовані на основі спектральних ліній FeAg. Також, була виконана процедура врахування розсіяного світла. Для цього між порядками в ешеле-спектрах об'єктів було зібрано розсіяне світло (з відповідною апертурою) і вираховано зі спектрів сусідніх порядків. Також, спектри було лінеаризовано та згладжено (для збільшення співвідношення сигнал/шум). Подальша обробка спектрів виконувалась за допомогою розробленого власними силами програмного забезпечення.

2. ЛЮМІНЕСЦЕНТНИЙ КОНТИНУУМ В СПЕКТРАХ КОМЕТИ C/2007 N3 І ЙОГО ПАРАМЕТРИ

Прийнято вважати, що кометний спектр складається з двох компонентів. Перший компонент — емісійні лінії атомів, молекул, іонів в кометній атмосфері. Другий — відбите від кометного пилу сонячне випромінювання. Другий компонент повинен в основних рисах повторювати сонячний спектр, оскільки оптичні якості пилу змінюються плавно з довжиною хвилі. Однак, в багатьох кометах фраунгоферові лінії поглинання мають меншу глибину, ніж у спектрі Сонця. Назвемо декілька можливих причин такого явища:

- 1) недостатня роздільна здатність приладів;
- 2) невідомі емісійні лінії, які накладаються на лінії поглинання в сонячному спектрі;
- 3) розсіяння світла в самому спектральному приладі;
- 4) люмінесценція кометного пилу, яка дає додатковий неперервний спектр без ліній поглинання.

Для коректного врахування спектральної роздільної здатності даного спектрографа спочатку брався сонячний спектр з високою роздільною здатністю 0.02Å [1]. З нього, з кроком і спектральною роздільною здатністю аналогічними кометному спектру за допомогою операції згортки розраховувався новий спектр Сонця. Про допустимість такого підходу свідчить те, що фраунгоферові лінії мають однакову (в межах помилок) ширину в розрахованому і кометному спектрах. Однак глибина ліній істотно менша в кометному спектрі. Це означає, що перший фактор не може пояснити спостережуваних особливостей кометного спектра. Додатковим аргументом на користь цього твердження служить той факт, що ефект спостерігається в кометних спектрах, отриманих з високою роздільною здатністю на ешеле-спектрографах.

Друга причина також не може пояснити спостережуваний ефект, оскільки він проявляється в широкій спектральній області.

Розсіяння світла в спектрографі не може забезпечити значне зменшення глибини фраунгоферових ліній, яке спостерігається в деяких кометах. До того ж схожий ефект спостерігається на різних спектрографах. Окрім того, існують стандартні процедури врахування розсіяного світла, які непогано себе зарекомендували.

Виходячи з даного обговорення, автори приймають люмінесценцію кометного пилу як явище, яке може пояснити всю сукупність спостережених даних для кометного континууму [7].

Роздільно визначити вклади від сонячного спектра і люмінесцентного континууму можна за формулою:

$$i_c(\lambda) = k \cdot i_s(\lambda) + i_{lc}$$

де $i_c(\lambda)$ — спостережуваний кометний спектр, $i_s(\lambda)$ — обчислений сонячний спектр, k — коефіцієнт, який враховує вклад люмінесцентного континууму, i_{lc} — рівень люмінесцентного континууму.

Вперше люмінесцентний континуум було виявлено Г.К. Назарчук в спектрі комети 1P/Halley, яка виявила два основних максимуми на довжинах хвиль 395 та 510 нм [2]. Вони були частиною розсіяного сонячного континууму.

Дослідження комети C/2007 N3 (Lulin) показали наявність люмінесцентного континууму несонячного походження в діапазоні довжин хвиль 3850–7500Å. Для даної комети було виявлено три максимуми на таких довжинах хвиль: 4050Å, 5900Å і 6500Å.

Найбільш вірогідними кандидатами на роль органічних люмінофорів є: пірен ($C_{16}H_{10}$, з максимумом 3930Å), антрацен ($C_{14}H_{10}$, з максимумом 4000Å), фталоціанін ($C_{32}H_{18}N_8$) або бор саб фталоціанін хлорид ($C_{24}H_{12}BClN_6$) з максимумом 5800Å, порпін ($C_{20}H_{14}N_4$, з двома максимумами 6200Å і 6800Å), хлорин ($C_{20}H_{16}N_4$, з максимумом 6700Å) [8, 9]. Пірен та антрацен вже рееструвалися у якості люмінофорів комети 1P/Halley [12, 13].

Результати обробки спектрів представлені на рис. 1 та рис. 2.

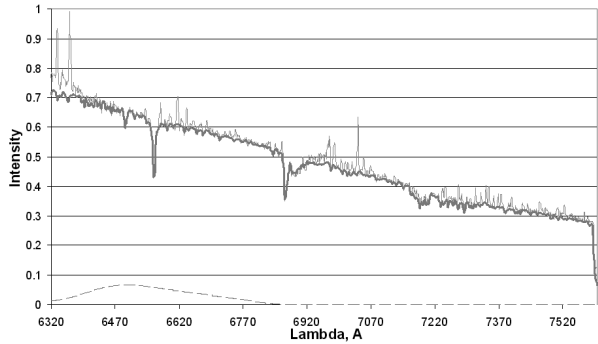
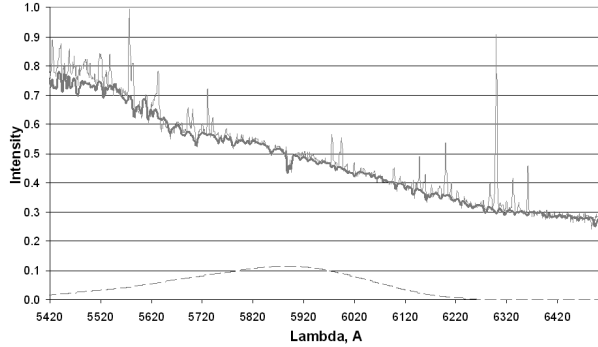
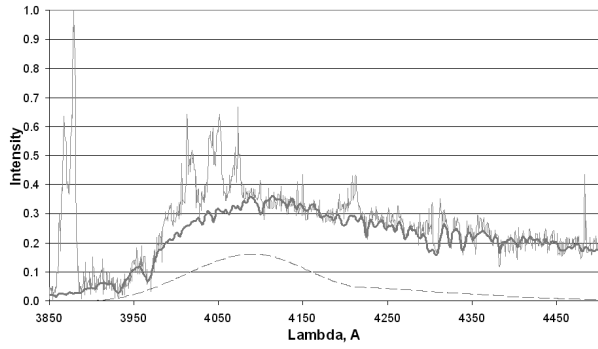


Рис. 1. Люмінесцентний континуум в спектрі комети C/2007 N3 (Lulin)

— спектр комети;
 ——— спектр Сонця + люмінесцентний континуум;
 - - - - рівень люмінесцентного континууму

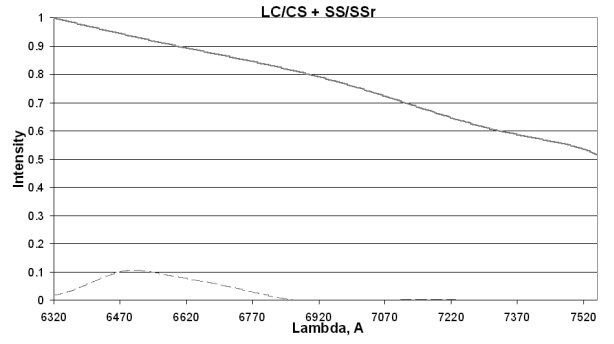
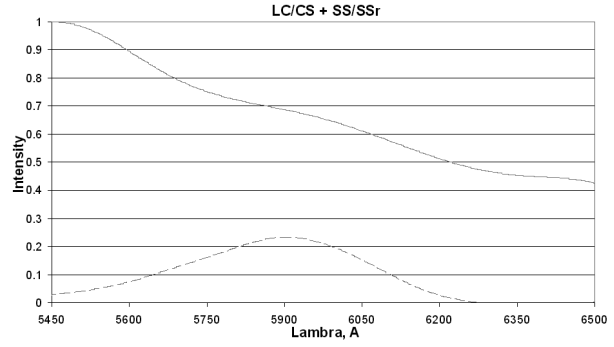
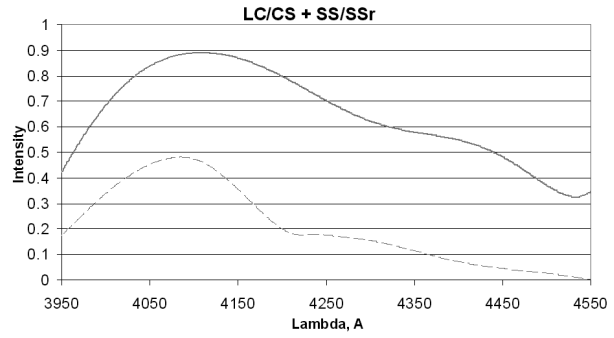


Рис. 2. Вклад люмінесцентного континууму в спектр комети C/2007 N3 (Lulin)

— відношення беземісійного світлового потоку від комети до загального випромінювання Сонця;
 - - - - відношення світлового потоку обумовленого люмінесцентним континуумом до загального беземісійного потоку від комети.

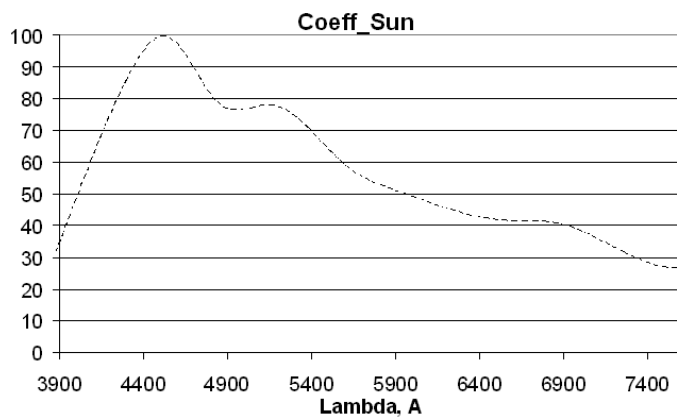


Рис. 3. Відношення сонячного континууму в кометному спектрі до реального сонячного спектра (характеристика зміни альбеда)

3. ВЛАСТИВОСТІ ПИЛУ КОМЕТИ LULIN

Також, були досліджені властивості пилу, для комети Lulin. В основу досліджень лягла побудова залежності відбитого кометою сонячного світла (без врахування емісій та вкладу люмінесцентного континууму) до оригінального спектра Сонця. Таким чином була отримана залежність змін альbedo від довжини хвилі. Залежність отримана в діапазоні довжин хвиль 3780–7600Å.

Результати представлені на рис. 3. Для отримання результатів ми виходили з загальноприйнятих тверджень, згідно яких кометний спектр складається з двох компонентів. Перший компонент — емісійні лінії атомів, молекул, іонів в кометній атмосфері. Другий компонент — відбите від кометного пилу сонячне випромінювання. Другий компонент в основних рисах повинен повторювати спектр Сонця, оскільки оптичні властивості пилу з довжиною хвилі змінюються дуже поступово. На практиці (як показано вище і для комети Lulin) зустрічається ще й третій компонент — люмінесцентний континуум (можливі й інші причини появи третього компоненту). Описане можна представити у вигляді формули:

$$i_{com}(\lambda) = i_{sol}(\lambda) + i_{lc}(\lambda) + i_{em}(\lambda)$$

$i_{com}(\lambda)$ — загальний світловий потік від комети, $i_{sol}(\lambda)$ — неперервний сонячний континуум, $i_{lc}(\lambda)$ — люмінесцентний континуум, $i_{em}(\lambda)$ — потік світла, який викликаний кометними емісіями.

Виокремлюється кожна складова за стандартною методикою [7]. Попередньо, над спектрами комет були виконані всі базові редуції. Для виокремлення брався сонячний спектр з високою роздільною здатністю 0.02Å, з якого розраховувався новий спектр Сонця, аналогічний кометному спектру. В різних ділянках спектра (на лініях поглинання) задавалися точки з відповідним коефіцієнтом Сонця (при необхідності в цих самих точках задавався коефіцієнт люмінесцентного континууму). В результаті операцій кометний і сонячний спектр накладаються (за винятком кометних емісій і областей з наявним континуумом несонячного походження). Коефіцієнт Сонця, який використовується у різних точках інтегрується від точки до точки і є характеристикою зміни альbedo. Описане можна подати у вигляді формули:

$$i_{com}(\lambda) - (i_{em}(\lambda) + i_{lc}(\lambda)) = k \cdot i_s(\lambda)$$

де $i_s(\lambda)$ — підрахований сонячний спектр, k — коефіцієнт Сонця (характеристика альbedo).

4. ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЕМІСІЙНИХ СПЕКТРАЛЬНИХ ЛІНІЙ

Ототожнення кометних емісій було проведене за допомогою каталогів Brown та Cochren [10, 11]. В кометі C/2007 N3 (Lulin) вдалося ототожнити емісійні лінії таких хімічних елементів: CN, C₂, C₃, CN, CN⁺, NH₂, H₂O⁺, CO⁺, [OI]. Через невисоку роздільну здатність часто спостерігається блендування ліній. Значна частина емісійних ліній залишилися неототожненими, що вимагає додаткових досліджень іншими методами.

Також, для комети, шляхом виокремлення світлових потоків емісійних ліній, було підраховано відносний вклад кожної з емісій. Результати представлені у табл. 1. Характерною особливістю комети Lulin є те, що вклад у випромінювання з боку C₃ (4020–4100) та CN (3850–3900) виявився більшим за C₂ (5000–5164). Проте, більш об'єктивною характеристикою кометної коми є не відносні потоки, а газопродуктивності (Q) та кількість молекул, що потрапили в діафрагму або щілину спектрографа ($M(\rho)$). Спочатку варто отримати $M(\rho)$:

$$M(\rho) = \frac{I}{g},$$

де I — відносна інтенсивність, g — фактор флуоресценції. Оскільки ми маємо справу зі щілиною спектрографа, а не фільтром, то $M(\rho)$ повинно знати певних перетворень:

$$M'(\rho) = \frac{M(\rho) \cdot \pi \rho^2}{ab}$$

ρ — відстань від центра до краю діафрагми (540 км), a та b — висота (11") та ширина (3") щілини спектрографа відповідно.

Тепер можемо отримати основні характеристики:

$$\frac{Q}{v} = \frac{M'(\rho)}{\rho \cdot F(\mu, x)},$$

де $\mu = \frac{\beta_1}{\beta_2}$, $x = \rho \beta_2$, $\beta_1 = \frac{1}{L_1}$, $\beta_2 = \frac{1}{L_2}$,

$$F(\mu, x) = \int_x^{\mu x} K_0(y) dy + \frac{1}{x} \left(1 - \frac{1}{\mu} \right) + K_1(\mu x) - K_1(x),$$

K_0 та K_1 — відповідні циліндричні функції для діафрагми, L_1 та L_2 — пробіги, відповідно, батьківських та дочірніх молекул, $F(\mu, x)$ — функція Хазера, v — швидкість молекул [14]. Ці величини, а також відношення газопродуктивності до швидкості та відносна газопродуктивність, представлені у табл. 1.

Таблиця 1. Відносна інтенсивність та газопродуктивність основних кометних емісій комети C/2007 N3 (Lulin)

	CN (3850–3900)	C ₃ (4020–4100)	C ₂ (4600–4700)	C ₂ (5000–5164)	C ₂ (5440–5640)	NH ₂ (6650–6700)
<i>I</i>	0.81	1	0.29	0.75	0.11	0.02
<i>L</i> ₁ , км	1.3 · 10 ⁵	2.8 · 10 ³	2.2 · 10 ⁴		10 ⁴	
<i>L</i> ₂ , км	2.1 · 10 ⁵	1.45 · 10 ⁵	6.6 · 10 ⁴		1.5 · 10 ⁵	
lg(<i>g</i>)	–12.291	–12	–12.310	–12.347	–12.372	–13.373
<i>M</i> (ρ)	1.6 · 10 ¹²	1012	5.9 · 10 ¹¹	1.67 · 10 ¹²	2.59 · 10 ¹¹	4.72 · 10 ¹¹
<i>M'</i> (ρ)	6,27 · 10 ¹²	3,9 · 10 ¹²	2,3 · 10 ¹²	6,6 · 10 ¹²	10 ¹²	1,9 · 10 ¹²
<i>F</i> (μ, x)	147.2	265.6	82.4		259.5	
<i>Q/v</i> , км ^{–1}	7,9 · 10 ⁷	2,7 · 10 ⁷	5,2 · 10 ⁷	1,5 · 10 ⁸	2,2 · 10 ⁷	1,4 · 10 ⁷
<i>Q/Q</i> _{C₂}	0.53	0.18	0.35	1	0.15	0.09

5. ВИСНОВКИ

При обробці оптичних спектрів комети C/2007 N3 (Lulin) отриманих 23–25.02.2009 року було знайдено люмінесцентний кометний континуум в трьох різних спектральних діапазонах. Максимальний вклад люмінесценції в загальний світловий потік складає близько 45%. Знайдені претенденти на роль люмінофорів підтверджуються результатами інших дослідників [2, 11, 12]. Отримано залежність альbedo від довжини хвилі та відносний вклад різних емісійних потоків у випромінювання. Також проведено ідентифікацію емісійних ліній та підраховано відносні газопродуктивності, що є характерними для нашої геліоцентричної відстані [15].

1. Kurucz R.L., Furenlid I., Brault J., Testerman L. Solar flux atlas from 296 to 1300 nm // National Solar Observatory Atlas, Sunspot, New Mexico: National Solar Observatory. — 1984.
2. Shul'man L.M. Distribution of neutral matter density in the cometary atmosphere // Astrometry and Astrophysics (in Russian). — 1970. — **11**. — С. 26–30.
3. Lukyanyk I.V., Churyumov K.I. // Earth, Moon and Planets. — 2000. — 90. — P.1..
4. Churyumov K.I., Lukyanyk I.V., Afanasiev V.L., et al. Exploration of the Comet 19/P Borrelly spectra, obtained with the MPFS and Scorpio of 6-m Telescope on Aug. 2001 // Proceedings of Asteroids, Comets, Meteors (Technical University Berlin. — Germany). — 2002. — P. 657–660.
5. Lukyanyk I.V., Churyumov K.I., Afanasiev V.L., et al. Observation of Spectra and Monochromatic Images of Comet C/2001 A2 (LINEAR) // Proceedings of Asteroids, Comets, Meteors (Technical University Berlin. — Germany). — 2002. — P. 717–720.
6. Picazzio E., de Almeida A., Churyumov K.I., Andrievskii S.M., Lukyanyk I.V. The Optical Spectroscopy and Near Infrared Observations of Comet C/2000 WM1 (Linear) in December, 2001 in Chile and Brazil // Earth, Moon and Planets. — 2002. — **90**. — P. 23–32.
7. Чурюмов К.И., Пономаренко В.О., Клецонок В.В., Мозгова А.М., Кузнецов М.А. Оптична спектроскопія комети 103P/Hartley 2 в жовтні 2010 року // Вісник Астрономічної школи. — 2012. — **8**, № 1-2. — С. 91–95.
8. <http://ru.wikipedia.org>
9. <http://omlc.ogi.edu>
10. Brown M.E., Bouchez A.H., Spinrad H., Jons-Krull C.M. High-resolution spectra catalogue of cometary emissions lines // A.J. — 1996. — **112**(3) — P. 1197–1202.
11. Cochran A. A high spectral resolution Atlas of comet 122P/de Vico. — 2001.
12. Clairemidi J., Moreels G., Mousis O., Brechignac P. Identification of anthracene in Comet 1P/Halley // Astronomy & Astrophysics. — 2008. — P. 245–250.
13. Clairemidia J., Brechignac P., Moreelsa G., Pautetc D. Tentative identification of pyrene as a polycyclic aromatic molecule in UV spectra of comet P/Halley: An emission from 368 to 384 nm // Planetary and Space Science. — 2003.
14. Краснопольский В.А. Физика свечения атмосфер планет и комет. — М.: Наука, 1987. — 304 с.
15. Osip D.J., Birch P.V. The Ensemble Properties of Comets: Results from Narrowband Photometry of 85 Comets. 1976-1992 // Icarus. — 1995. — **118**. — P. 223–270.

Надійшла до редакції 8.10.2013