



## Дослідження відносного вмісту і кінематики іонізованого газу в галактиці IC4662

К.Б. Агієнко

Чернігівський державний педагогічний університет ім. Т.Г.Шевченка

*В роботі представлено оптичний спектр зони HII блакитної карликової компактної галактики IC4662, отриманий в обсерваторії ESO VLT. В спектрі виявлено яскраві емісійні лінії  $H_{\beta}$  4861, OIII 4363, 4959, 5007 і ін. Дослідження відносного вмісту хімічних елементів в області іонізованого водню показали наявність кисню і азоту. Знайдена величина  $12+\log O/H$ . Також була досліджена кінематика іонізованого газу вздовж щілини в лініях  $H_{\beta}$   $\lambda$ 4861 і OIII  $\lambda$ 5007. Дослідження кінематики не показали сильних варіацій швидкості: вона змінюється в межах 20–80 км/с.*

*ИССЛЕДОВАНИЕ ОБИЛИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И КИНЕМАТИКИ ИОНИЗИРОВАННОГО ГАЗА В ГАЛАКТИКЕ IC4662, Агиенко Е.Б. — В работе представлен оптический спектр зоны HII голубой карликовой компактной галактики IC4662, полученный на обсерватории ESO VLT. В этом спектре обнаружены яркие эмиссионные линии  $H_{\beta}$  4861, OIII 4363, 4959, 5007 и др. Исследование обилия химических элементов в зоне ионизированного водорода показали наличие в ней кислорода и азота. Найдена величина  $12+\log O/H$ . Также была исследована кинематика ионизированного газа вдоль щели в линиях  $H_{\beta}$   $\lambda$ 4861 и OIII  $\lambda$ 5007. Исследования кинематики не показали сильных вариаций скорости: она изменяется в пределах 20–80 км/с.*

*THE INVESTIGATION OF CHEMICAL ABUNDANCE AND IONIZED GAS KINEMATICS IN IC4662 GALAXY, by Agienko K.B. — The investigation of HII region optical spectra of the BCD galaxy IC4662 is presented in this paper. Spectral data were obtained at ESO VLT. This spectra includes such bright emission lines as  $H_{\beta}$  4861, OIII 4363, 4959, 5007 etc. During the research were derived O and N chemical abundances. Also we studied kinematics of ionised gas of HII region of the galaxy.*

### 1. ВСТУП

Галактики — гігантські зоряні острови, що перебувають за межами нашої зоряної системи (нашої Галактики). Вони дуже різноманітні за своїми розмірами, зовнішньому вигляду і складу. Розходження між галактиками різних типів пояснюється як різними умовами формування, так і еволюційними змінами, що відбулися за мільярди років їхнього життя. Вивчення галактик дуже важливе, тому що це може пояснити походження Всесвіту, зірок, нашої планети.

В статті розглядається підклас карликових галактик — блакитні компактні карликові галактики (БККГ).

Назва “компактні галактики” була введена для позначення об’єктів, які майже неможливо відрізнити від зірок. Цей тип галактик також називають HII -галактиками, тому що їх спектри схожі на спектри галактичних областей HII. Багато з компактних галактик було відкрито саме завдяки цій якості. В БККГ велика кількість блакитних масивних зірок, іде процес інтенсивного зореутворення, але з іншого боку, вони характеризуються величезними запасами невикористаного газу і малою кількістю важких елементів, незважаючи на велику кількість масивних зірок, які виробляють важкі елементи. Блакитні галактики являють собою ізольовані вогнища зореутворення із речовини, хімічний склад якої ще не сильно проеволюціонував.

Пошук молодих галактик, що знаходяться в процесі формування — це одна з найбільш актуальних задач в сучасній астрофізиці. Із запуском космічного телескопу Хабла (HST) і введенням в дію великих наземних телескопів таких, як 10-м телескоп Кека, відкрито велику кількість галактик на червоних зміщеннях  $z > 3$ . Незважаючи на це, до цього часу не ясно, чи ці галактики є дійсно первинними? Це пов’язано з тим, що в спектрах всіх галактик на великих червоних зміщеннях спостерігаються сильні абсорбційні лінії важких елементів, що свідчить про те, що ці системи дуже проеволюціонували. Крім того, мала інтенсивність і малі розміри таких дуже віддалених об’єктів не дають змогу вивчити їх детально. Альтернативна можливість — це детальне вивчення підкласу найближчих до нас карликових галактик — блакитних компактних галактик (БКГ) — ймовірних кандидатів у молоді галактики.

Спостереження з надзвичайно високою спектральною та просторовою роздільною здатністю та великим відношенням сигнал/шум з допомогою найпотужніших у світі телескопів здійснюються для

дослідження цікавих об'єктів, що дуже рідко зустрічаються у Всесвіті — блакитних компактних галактик з екстремально низьким вмістом важких елементів — локальних двійників галактик, що формуються, на великих космологічних відстанях.

## **2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА: БЛАКИТНОЇ КОМПАКТНОЇ КАРЛИКОВОЇ ГАЛАКТИКИ IC4662**

Дана стаття присвячена спектральному дослідженню блакитної компактною карликової галактики (БККГ) IC4662. Дослідження проводились на основі спектральних даних, отриманих на телескопі VLT (Very Large Telescope) Європейської південної обсерваторії (Чілі, г.Паранал) групою вчених у складі Ізотова Ю.І. та інших. Дана галактика належить до класу неправильних галактик, тобто не має чітко визначеної структури. Вона має оптичний діаметр  $2.8' \times 1.6'$ , поверхневу яскравість 21.2 зоряних величин з однієї кв. секунди дуги. Дана галактика знаходиться на відстані  $2.50 \pm 0.02$  Мпк в напрямку групи галактик NGC 6300 і має вік 6.5 млрд. років.

Важливість вивчення даного типу галактик, як зазначалося вище, полягає в тому, що дані галактики, по-перше, відносяться до класу молодих галактик, а отже є носіями інформації про ранні стадії еволюції Всесвіту. По-друге, карликові галактики є локальними двійниками галактик (тобто такими, що мають параметри первинних галактик, але знаходяться на набагато ближчій відстані), які формуються на великих космологічних відстанях, тобто імовірно первинних галактик, які складно вивчати через низьку інтенсивність випромінювання і малі розміри. Дослідження карликових галактик є альтернативою вивчення первинних галактик.

## **3. ЗОНИ ІОНІЗОВАНОГО ВОДНЮ — ЗОНИ НІІ**

Області іонізованого водню (зони НІІ) — дуже розповсюджений вид емісійних туманностей, що виникають навколо гарячих зірок. У них має місце практично повна іонізація водню ультрафіолетовим випромінюванням з  $\lambda < 912\text{\AA}$ . Яскраві гігантські зони НІІ, добре видні навіть в інших галактиках, є індикаторами зон активного зореутворення, де багато молодих гарячих зірок високої світності ранніх спектральних класів. Ультрафіолетових квантів може бути так багато, що весь водень у хмарі навколо зони зореутворення іонізований, так що границя таких зон НІІ має розмитий характер, що відображає розподіл щільності водню. Але значно частіше об'єм зони НІІ визначається потужністю ультрафіолетового випромінювання центрального джерела й різко обмежений.

Фізичні умови в зонах НІІ далекі від термодинамічної рівноваги, тому іонізація елементів розраховується на основі умов іонізаційної рівноваги (з умови балансу фотоіонізації й радіаційної рекомбінації). Температура зон НІІ визначається балансом нагрівання ультрафіолетовим випромінюванням (при фотоіонізації частина енергії фотона  $E = h\nu - \chi$  переходить у кінетичну енергію відірваного при фотоіонізації електрона, що при подальших зіткненнях передає цю енергію іншим частинкам) і охолодження (переважно в заборонених лініях важких елементів ОІІ, ОІІІ, НІІ). Електрони витрачають теплову енергію на порушення метастабільних рівнів цих елементів, а випромінюваний квант виходить із туманності, і таким чином відбувається охолодження. Залежно від температури центральної зірки й вмісту важких елементів температура зон НІІ становить 6000–12000 К. Із збільшенням температури центральної зірки радіус стаціонарної зони НІІ дуже різко зростає. Кванти з довжиною хвилі  $\lambda < 504\text{\AA}$  здатні іонізувати гелій, тому навколо найгарячіших зірок спостерігаються зони HeII.

## **4. РОЗПОДІЛ ПОТОКУ ВИПРОМІНЮВАННЯ ВЗДОВЖ ЩІЛИНИ СПЕКТРОГРАФА ДЛЯ БККГ IC4662 В ЛІНІЯХ $H_{\beta}$ ТА [O III] 5007\AA**

На рис. 1 показано фотографію досліджуваного об'єкта. Темні області, позначені A1, A2, є зонами НІІ, тобто зонами іонізованого водню, які виступають предметом дослідження.

Для дослідження двовимірного спектру було використано програмний пакет IRAF-SPLIT. З його допомогою можна отримати залежність потоку від довжини хвилі  $F(\lambda)$ .

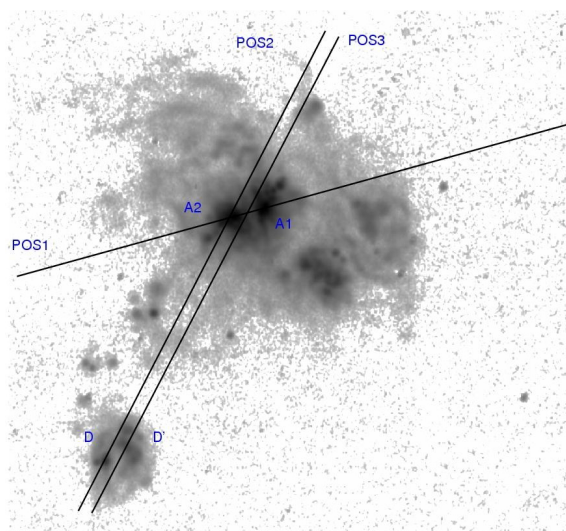
Просторова координата спектра складається з 340 рядків. Досліджувані лінії можна спостерігати в рядках № 50–195. В кожному із цих рядків були виміряні потоки в емісійних лініях і їх центри. На основі даних були побудовані графіки залежності (рис. 2), що відображають розподіл потоку випромінювання вздовж щілини в кожній з досліджуваних ліній. Отримані графіки є графіками залежності потоку випромінювання в лінії від номеру рядка, в якому ця лінія спостерігається. При цьому номер рядка відкладається вздовж горизонтальної осі, а величина потоку — вздовж вертикальної. З графіків видно, що розподіл яскравості в обох лініях майже аналогічний: піки випромінювання співпадають, однак в лінії [O III]  $\lambda = 5007\text{\AA}$  піки мають різну висоту, в той час як в лінії  $H_{\beta}$   $\lambda = 4861\text{\AA}$  піки яскравості мають приблизно однакову висоту.

## 5. РОЗПОДІЛ ПРОМЕНЕВИХ ШВИДКОСТЕЙ ДЛЯ БККГ IC4662 В ЛІНІЯХ $H_\beta$ ТА [O III] 5007Å ВЗДОВЖ ЩІЛИНИ СПЕКТРОГРАФА

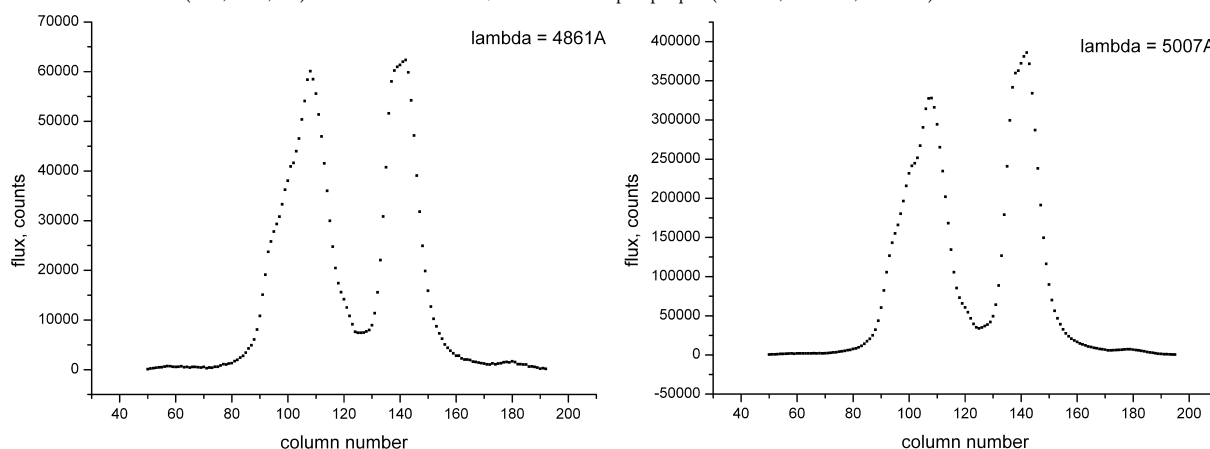
Променева швидкість — швидкість зміни відстані між об'єктом і спостерігачем. Метод визначення променевої швидкості зірок, галактик і інших астрономічних об'єктів базується на використанні ефекту Доплера. Променева швидкість визначається по зміщенню ліній (випромінювання або поглинання) у спектрі джерела або по зміні частоти відбитого сигналу при радіолокації. Якщо внаслідок ефекту Доплера відносна зміна довжини хвилі:  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \ll 1$ , то променева швидкість пов'язана з ним

співвідношенням  $v = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda}$ . У випадку  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \geq 1$  зв'язок цієї величини зі швидкістю стає більш складним: потрібно враховувати релятивістські ефекти. Променева швидкість зірок і галактичних хмар газу, що обертаються навколо центра Галактики, залежить від руху Сонця в Галактиці й хаотичних швидкостей цих об'єктів. Знаючи параметри, що характеризують обертання Галактики, а також променеві швидкості і координати зірок і хмар міжзоряного газу, що рухаються по орбітах, які близькі до кругових, можна визначити, на яких відстанях вони від нас знаходяться. Променева швидкість галактик також може бути критерієм відстані до них.

Променева швидкість окремих випромінюючих атомів може бути різною, це впливає на профіль спектральних ліній, розширює їх. Тому аналіз профілів ліній дає цінну інформацію про рух речовини джерела (тепловому, турбулентному або впорядкованому). Наприклад, широкі профілі всіх спектральних ліній випромінювання спостерігаються у зірок, що швидко обертаються, і у зірок, з поверхні яких відбувається витікання газу. Визначення променевої швидкості окремих компонентів кратних зоряних систем (наприклад, подвійних зірок) або систем галактик дозволяє оцінити маси цих систем. Знання розподілу променевої швидкості зірок і газу по диску галактик дає можливість



**Рис. 1.** Фотографія блакитної компактної карликової галактики IC4662. На малюнку зображено досліджувані зони галактики (A1, A2, D) та положення щілини спектрографа (POS1, POS2, POS3)



**Рис. 2**

**Таблиця 1.** Номери рядків, які включені в кожну з п'яти областей

Область	1	2	3	4	5
Номери рядків	139–149	126–136	101–111	89–99	69–79

**Таблиця 2.** Відносний вміст деяких хімічних елементів в кожній з областей

область	$12 + \log(\text{O}/\text{H})$	$12 + \log(\text{Ne}/\text{H})$	$\log(\text{Ne}/\text{O})$	$\log(\text{Fe}/\text{O})$	$12 + \log(\text{Ne}/\text{H})$
1	$8.4823 \pm 0.0097$	$7.3389 \pm 0.0150$	$-0.7823 \pm 0.0178$	–	–
2	$8.1086 \pm 0.0201$	$7.3919 \pm 0.0291$	$-0.7167 \pm 0.0354$	–	–
3	$8.1331 \pm 0.0141$	$7.3482 \pm 0.0229$	$-0.7849 \pm 0.0269$	$-1.8915 \pm 0.1405$	$6.2417 \pm 0.1398$
4	$8.1969 \pm 0.0148$	$7.4480 \pm 0.0280$	$-0.7489 \pm 0.0317$	–	–
5	$8.5966 \pm 0.0517$	$8.5577 \pm 0.1666$	$-0.0389 \pm 0.1744$	–	–

оцінити їх масу і щільність.

Для визначення розподілу радіальних швидкостей іонізованого газу вздовж щілини використали формулу:

$$v = \frac{c(\lambda - \lambda_0)}{\lambda_0},$$

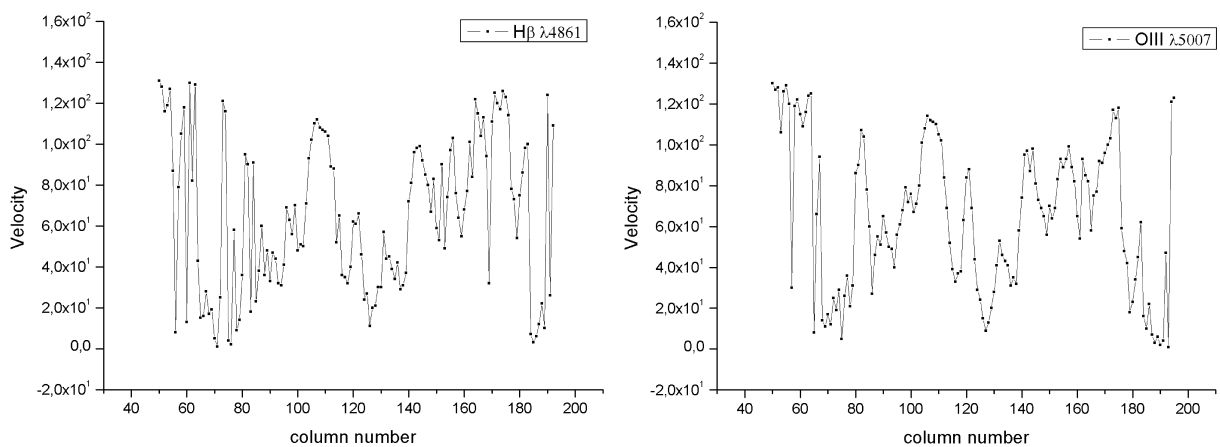
де  $v$  — радіальна швидкість,  $\lambda$  — довжина спостережуваної хвилі,  $\lambda_0$  — довжина лінії нерухомого газу,  $c$  — швидкість світла. Представлені графіки (рис. 3) відображають залежність радіальної швидкості в кожній з досліджуваних ліній від номеру рядка, в якому дані лінії спостерігались. Як видно із графіків, радіальні швидкості в обох лініях знаходяться в основному в межах 20–80 км/с. Дані варіації не є великими, отже, іонізований газ рухається рівномірно, в напрямку від нас, на це вказують зміщення спектральних ліній в червону частину спектра.

## 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДНОСНОГО ВМІСТУ ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В БККГ IC4662

Вивчення відносних варіацій одних хімічних елементів відносно інших має критичне значення для розуміння хімічної еволюції галактики, для підтвердження моделей зіркового нуклеосинтезу. БККГ ідеальні об'єкти для таких досліджень. В них відбуваються інтенсивні вибухи зореутворення, які породжують велику кількість масивних зірок у компактній області, яка іонізує міжзоряний простір, створюючи гігантські області іонізованого водню й збагачуючи їх важкими елементами.

Оптичні спектри областей НІІ показують вузькі емісійні лінії, які дозволяють виявити насиченість таких елементів як N, O, Ne, S, Fe. Більше того, у БККГ високий вміст нейтрального водню і дефіцит металів відносно околиць Сонця (від  $Z_0/50$  до  $Z_0/3$ ). Передбачається, що вони відносно молоді з точки зору хімічної еволюції. Тому вони являють собою відмінні лабораторії для вивчення процесів ядерного синтезу в умовах низької металічності, тобто в умовах, близьких до тих, які переважали в часи формування галактик. Важливим аспектом визначення відносного вмісту хімічних елементів в областях НІІ є те, що їх можна визначати на великих відстанях. Це робить області НІІ потужним інструментом для вивчення галактик на великих червоних зміщеннях.

Зараз теоретично встановлено що кисень, який видно в області НІІ, — це первинний елемент, вироблені масивними зірками з масою  $M \geq M_\odot$ . Ці припущення були підтверджені численними дослідженнями насиченості хімічних елементів у зірках. Інші елементи, похідні в результаті альфа-процесів і які можна побачити в спектрах областей НІІ, імовірно також є первинними.

**Рис. 3**

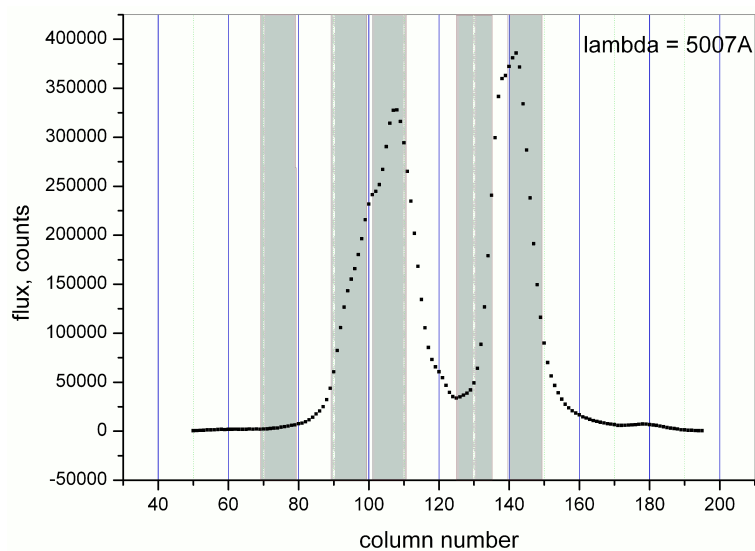


Рис. 4

Насиченості відносно легко виміряти в карликових галактиках, в яких іде процес зореутворення, тому що вони містять газові хмари, в яких багато гарячих зірок. В їх спектрах переважають небулярні емісійні лінії. В оптичному діапазоні ми спостерігаємо вузькі емісійні лінії. Їх ідентифікували як рекомбінації гелію і водню, а також декілька заборонених ліній.

Для дослідження відносного вмісту хімічних елементів галактики IC4662 із двовимірного спектру було виділено п'ять областей. Кожна з областей складається із 10 рядків двовимірного спектру.

## 7. ВИСНОВКИ

Пошук та дослідження молодих галактик, що знаходяться в процесі формування — це одна з найбільш актуальних задач в сучасній астрофізиці, результати якої дозволяють розв'язати питання про походження Всесвіту. Дослідження голубих карликових галактик дає інформацію про етапи зореутворення в галактиках, етапи еволюції самих галактик.

В роботі було досліджено кінематичні особливості іонізованого газу зони НІІ блакитної карликової компактної галактики IC4662. При дослідженні кінематичних особливостей було використано дві спектральні лінії:  $H_{\beta}$   $\lambda 4861\text{\AA}$  і заборонену лінію двічі іонізованого кисню [O III]  $\lambda 5007\text{\AA}$ . Дослідження не показали ніяких турбулентних течій в газі. Аналіз отриманих радіальних швидкостей показав невеликі варіації в межах 20–40 км/с.

1. Kunth D., Ostin G. The most metal-poor galaxies // *The Astronomy and Astrophysics Review*. — 2000. — **10**, Issue 1/2. — P. 1–79.
2. Pustil'nik S.A., Ugryumov A.V., Lipovetsky V.A., Thuan T.X., Guseva N.G. The spatial distribution of blue compact galaxies in the Second Byurakan Survey // *Astrophys. J.* — 1995. — **443**, № 2. — P. 499–513.
3. Izotov Yu.I., Chaffee F.H., Guseva N.G., Thuan T.X. Wolf-Rayet stellar populations in the most metal-deficient blue compact dwarf galaxies // *Astron. and Space Sci. Suppl.* — 2001. — **277**. — P. 277–280.
4. Guseva N.G., Izotov Yu.I., Lipovetsky V.A., Kniazev A.Yu. Spectrophotometry with low and moderate spectral resolution for the blue compact galaxies // *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* — 1996. — **41**. — P. 41–51.
5. Hidalgo-Gamez A.M., Masegosa J., Olofsson K. The chemical abundances in a sample of dwarf irregular galaxies. II. The case of IC4662 and ESO 245-G05 // *Astronomy and Astrophysics*. — 2001. — **376**. — P. 386.
6. Izotov Yu.I., Chaffee F.H., Foltz C.B., Green R.F., Guseva N.G., Thuan T.X. Helium abundance in the most metal-deficient blue compact galaxies: I Zw 18 and SBS 0335-052 // *Astrophys. J.* — 1999. — **527**, № 2. — P. 757–777.
7. Noeske K.G., Guseva N.G., Fricke K.J., Izotov Yu.I., Papaderos P., Thuan T.X. The cometary blue compact dwarf galaxies Mrk 59 and Mrk 71. A clue of dwarf galaxy evolution? // *Astron. Astrophys.* — 2000. — **361**, № 1. — P. 35–52.
8. Guseva N.G., Izotov Yu.I., Papaderos P., Chaffee F.H., Foltz C.B., Green R.F., Thuan T.X., Fricke K.J., Noeske K.G. The evolutionary status of the low-metallicity blue compact galaxy SBS 0940+544 // *Astron. Astrophys.* — 2001. — **378**, № 2. — P. 756–776.

Надійшла до редакції 18.08.2008