

СПЕКТРАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЕМИ  
HII-ОБЛАСТЕЙ В ГАЛАКТИКАХ КАЗАРЯНА

В.Ж.АДИБЕКЯН

Поступила 8 августа 2007

Принята к печати 14 ноября 2007

На основе спектров из SDSS DR5 проведено спектральное исследование семи HII-областей, наблюдавшихся в галактиках Казаряна. Определено содержание гелия и тяжелых элементов, а также количество ионизирующих звезд и темп звездообразования в них. Содержание кислорода  $12 + \log(\text{O}/\text{H})$  находится в интервале значений  $7.94 + 8.35$ . Средние значения отношений обилий  $\log(\text{S}/\text{O})$ ,  $\log(\text{Ar}/\text{O})$  и  $\log(\text{Ne}/\text{O})$  равны соответственно  $-1.63$ ,  $-2.37$  и  $-0.78$ . Значение  $\log(\text{N}/\text{O})$  для исследуемых HII-областей находится в интервале  $-0.63$  +  $-1.37$ . На диаграмме N/O - O/H они занимают ту же область, что и высоковозбужденные HII-области. По всей вероятности возраст исследуемых HII-областей больше 100-300 млн лет, необходимого для обогащения азотом звездами промежуточных масс. Темп звездообразования одного порядка, что и в HII-областях в спиральных и irregулярных галактиках и находится в интервале значений  $0.05 + 0.81 M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ .

Ключевые слова: *HII-области; металличность; звездообразование; УФ-избыток*

1. *Введение.* Исследование химического состава галактик имеет фундаментальное значение для понимания природы их химической эволюции. Простым способом исследования химического состава галактик поздних морфологических типов с эмиссионными линиями является исследование их HII-областей в оптическом диапазоне. HII-области - газовые системы, свечение которых обусловлено коротковолновым излучением совокупностей ранних O-B звезд (OB - ассоциации [1]). Для определения химического состава HII-областей применяются как модельные расчеты, так и эмпирические методы. Эти определения являются более надежными, если электронные температуры возможно определить непосредственно, например используя отношение линий  $[\text{OIII}]\lambda 4363/[\text{OIII}]\lambda 5007$ . В этом случае, обилие ионов можно получить от наблюдаемых интенсивностей линий, испускаемых соответствующими ионами (direct methods) (см., например, [2,3]). Полное содержание элементов выражается суммой обилия всех ее ионов. Однако в практике не все присутствующие ионы данного элемента наблюдаются в оптических спектрах (единственный благоприятный случай - случай кислорода) и нужно ввести корректирование для учета ионов, линии которых не наблюдаются в оптическом диапазоне, используя ICF (Ionization Correc-

tion Factor). К сожалению, в HII-областях богатые кислородом эмиссионные линии, чувствительные к температуре, как, например [OIII]  $\lambda 4363$ , часто слишком слабы и электронные температуры не могут быть определены непосредственно. В этом случае используется эмпирический метод (или как часто называют "strong-line methods") [4-6]. По значениям интенсивностей сильных эмиссионных линий получают эмпирические зависимости для определения содержания химических элементов.

Свойства HII-областей в галактиках зависят от интегральных свойств и хабловского типа этих галактик (см., например, [7,8]). В [7] также показано, что обилие химических элементов HII-областей в спиральных галактиках сильно зависит от их местоположения в галактике (радиального расстояния от центра галактики) в отличие от irregулярных галактик [9].

Кислород и, вероятно, углерод производятся главным образом массивными звездами [10]. Происхождение азота не однозначно (см., например, [11,12]). В близких галактиках со вспышкой звездообразования с обилием кислорода  $12 + \log(O/H) < 7.6$ , отношение  $N/O$  является почти постоянным, с очень низкой дисперсией вокруг среднего значения  $\log(N/O) = -1.6$ , из чего в [11] было предположено, что в этих галактиках азот был произведен массивными звездами как первичный элемент. А в [12] было предположено, что в этих галактиках с тем же обилием кислорода  $12 + \log(O/H) < 7.6$ , азот был произведен звездами промежуточных масс  $4 - 8 M_{\odot}$  как первичный элемент. Зависимость  $N/O$  от  $O/H$  имеет ключевое значение для понимания происхождения азота и истории звездообразования исследуемых объектов. В [13] показано, что в HII-областях в спиральных галактиках с высокой металличностью ( $12 + \log(O/H) > 8.4$ ) отношение  $N/O$  линейно увеличивается с обилием кислорода, а в HII-областях с низкой металличностью ( $12 + \log(O/H) < 8.4$ ), это отношение не зависит от содержания кислорода. В [13] также показано, что HII-области, наиболее отдаленные от центров родительских галактик (спиральных галактик), имеют те же значения  $N/O$ , что и карликовые галактики с низкой металличностью.

В настоящей работе приведены результаты исследования химического состава и звездного населения в семи HII-областях в галактиках Казаряна. Первичные данные этих галактик приведены в [14,15].

В разделе 2 представлены спектры и методы их обработки. Определения содержания химических элементов приводятся в разделе 3. В разделе 4 представлены методы определения звездного населения. Заключение представлено в разделе 5.

2. *Спектры и их обработка.* SDSS DR5 (Sloan Digital Sky Survey

Data Release 5) - это огромная база астрономических данных, содержащая прямые снимки около 217 млн объектов и спектры около 1050000 объектов (из которых 675000 - галактики) [16]. Для исследования галактик Казаряна с помощью спектров из SDSS DR5, они отождествлялись с объектами в SDSS. Из отождествленных 94 галактик Казаряна, для которых есть прямые снимки, для 65 объектов (в том числе и спектры отдельных НII-областей в спиральных и irregулярных галактиках) имеются спектры в спектральном диапазоне  $\lambda\lambda 3800 - 9200\text{\AA}$ . Из них отобраны семь НII-областей в шести галактиках Казаряна, в спектрах

Таблица 1

### ПАРАМЕТРЫ НII-ОБЛАСТЕЙ И ИХ РОДИТЕЛЬСКИХ ГАЛАКТИК

| Параметры      | Kaz 429 | Kaz 453 | Kaz 459 | Kaz 460(I) | Kaz 460(II) | Kaz 528 | Kaz 530 |
|----------------|---------|---------|---------|------------|-------------|---------|---------|
| Морф. тип гал. | Sd      | Irr     | Sd      | Sc         | Sc          | Sdm     | Irr     |
| $M_r$ (гал.)   | -17.8   | -19.8   | -18.4   | -19.4      | -19.4       | -18     | -18.5   |
| $M_r$ (НII)    | -14.8   | -19.8   | -16.5   | -14.9      | -14.1       | -17.6   | -18.5   |
| $R/R_{25}$     | 0.44    |         | 0.6     | 0.59       | 0.42        | 0.75    |         |
| $z$            | 0.0304  | 0.0471  | 0.0128  | 0.0105     | 0.0105      | 0.0178  | 0.022   |

которых наблюдалась линия [OIII]  $\lambda 4363$ . Калиброванные по интенсивностям спектры НII-областей были извлечены из веб-страницы SDSS с адресом <http://www.sdss.org/dr5>.

В табл.1 представлены параметры НII-областей и их родительских галактик (РГ). Звездные величины НII-областей и их РГ в  $g(4686\text{\AA})$  цвете, с помощью которых вычислены абсолютные звездные величины, взяты из SDSS DR5. Значения  $R_{25}$  (большая полуось РГ до расстояния с предельной яркостью 25 звездных величин с квадратной секунды

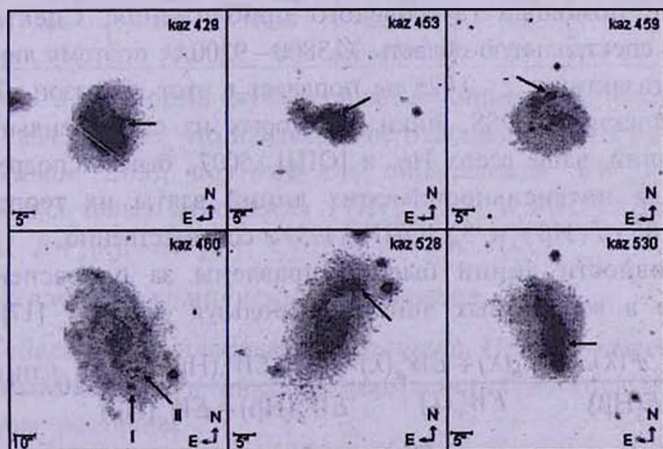


Рис.1. Прямые снимки НII-областей и их родительских галактик (НII-области отмечены стрелками, а две НII-области в Kaz 460 пронумерованы) из SDSS DR5.

дуги) взяты из базы данных Hyperleda, доступной в <http://leda.univ-lyon1.fr/>, с помощью которых определены относительные радиальные расстояния HII-областей от центров РГ.

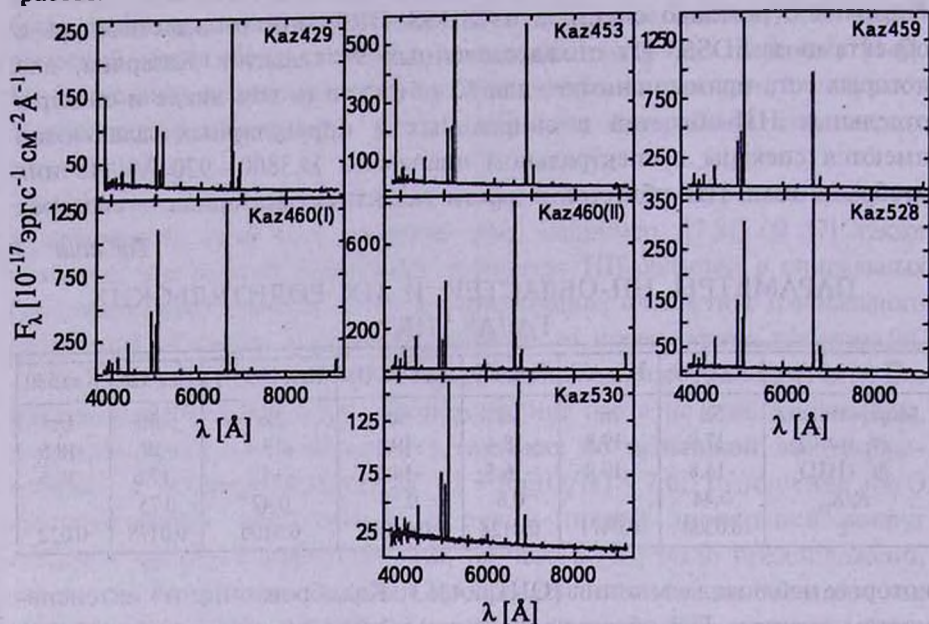


Рис.2. Спектры HII-областей в галактиках Казаряна из SDSS DR5.

Прямые снимки и спектры HII-областей приведены на рис.1 и 2, соответственно.

Для обработки спектров использовалась программа IRAF/SPLIT. Масштаб длины волны извлеченных спектров из нелинейного был преобразован в линейное. Интенсивности эмиссионных линий были измерены с помощью гауссовского приближения. Спектры SDSS охватывают спектральную область  $\lambda\lambda 3800 - 9200 \text{ Å}$ , поэтому линия [OIII]  $\lambda 3727$  для галактик с  $z < 0.025$  не попадает в этот диапазон. Во многих случаях в спектрах SDSS, пики некоторых из самых сильных эмиссионных линий, чаще всего H $\alpha$  и [OIII]  $\lambda 5007$ , бывают подрезанными. Поэтому для интенсивностей этих линий взяты их теоретические значения  $2.85 \times I(\text{H}\beta)$  и  $3 \times [\text{OIII}] \lambda 4959$ , соответственно.

Интенсивности линий были исправлены за покраснения и за поглощение в водородных линиях, используя формулу [17]:

$$\frac{I(\lambda)}{I(\text{H}\beta)} = \frac{F(\lambda)}{F(\text{H}\beta)} \frac{EW_e(\lambda) + EW_o(\lambda)}{EW_e(\lambda)} \frac{EW_e(\text{H}\beta)}{EW_e(\text{H}\beta) + EW_o(\text{H}\beta)} 10^{[C(\text{H}\beta)/f(\lambda)]},$$

где  $I(\lambda)$  - исправленные, а  $F(\lambda)$  - наблюдаемые интенсивности линий,  $EW_e(\lambda)$  и  $EW_o(\lambda)$ , соответственно эквивалентные ширины наблюдаемой

эмиссионной линии и его компонента в поглощении,  $f(\lambda)$  - функция покраснения нормализованная к H $\beta$ , которая взята из [18]. Теоретические значения отношений водородных линий  $I(\lambda)/I(\text{H}\beta)$  взяты из

Таблица 2

### ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ В НII-ОБЛАСТЯХ

| Линии              | Kaz 429      |              | Kaz 453      |              | Kaz 459      |              | Kaz 460(I)   |              | Kaz 460(II)  |              | Kaz 528      |              | Kaz 530      |              |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                    | $F(\lambda)$ | $I(\lambda)$ | $F(\lambda)$ | $I(\lambda)$ | $F(\lambda)$ | $I(\lambda)$ | $F(\lambda)$ | $I(\lambda)$ | $F(\lambda)$ | $I(\lambda)$ | $F(\lambda)$ | $I(\lambda)$ | $F(\lambda)$ | $I(\lambda)$ |
| 3727 [OII]         | 0.950        | 1.042        | 1.364        | 1.460        |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| 3868 [NeIII]       | 0.066        | 0.071        | 0.249        | 0.264        | 0.270        | 0.283        | 0.143        | 0.143        | 0.058        | 0.058        | 0.201        | 0.212        | 0.284        | 0.301        |
| 4101 H $\delta$    | 0.200        | 0.260        | 0.208        | 0.260        | 0.239        | 0.259        | 0.247        | 0.247        | 0.248        | 0.248        | 0.219        | 0.263        | 0.217        | 0.243        |
| 4340 H $\gamma$    | 0.414        | 0.460        | 0.413        | 0.451        | 0.440        | 0.457        | 0.457        | 0.457        | 0.463        | 0.463        | 0.427        | 0.458        | 0.430        | 0.448        |
| 4363 [OIII]        | 0.008        | 0.008        | 0.032        | 0.032        | 0.038        | 0.039        | 0.011        | 0.011        | 0.009        | 0.009        | 0.018        | 0.018        | 0.021        | 0.022        |
| 4471 HeI           | 0.039        | 0.040        | 0.038        | 0.039        | 0.037        | 0.037        | 0.037        | 0.037        | 0.036        | 0.036        | 0.036        | 0.037        | 0.037        | 0.038        |
| 4686 HeII          |              |              | 0.014        | 0.014        | 0.007        | 0.007        | 0.006        | 0.006        |              |              |              |              |              |              |
| 4861 H $\beta$     | 1.000        | 1.000        | 1.000        | 1.000        | 1.000        | 1.000        | 1.000        | 1.000        | 1.000        | 1.000        | 1.000        | 1.000        | 1.000        | 1.000        |
| 4959 [OIII]        | 0.281        | 0.279        | 1.014        | 1.009        | 1.237        | 1.232        | 0.760        | 0.760        | 0.430        | 0.430        | 0.755        | 0.752        | 0.887        | 0.883        |
| 5007 [OIII]        | 0.884        | 0.875        | 2.961        | 2.940        | 3.714        | 3.690        | 2.271        | 2.271        | 1.266        | 1.266        | 2.254        | 2.240        | 2.640        | 2.620        |
| 5876 HeI           | 0.103        | 0.096        | 0.105        | 0.100        | 0.107        | 0.103        | 0.109        | 0.109        | 0.106        | 0.106        | 0.103        | 0.098        | 0.103        | 0.101        |
| 6312 [SIII]        |              |              | 0.011        | 0.010        | 0.013        | 0.012        | 0.010        | 0.010        | 0.009        | 0.009        | 0.007        | 0.007        | 0.007        | 0.007        |
| 6548 [NII]         | 0.214        | 0.193        | 0.087        | 0.080        | 0.047        | 0.044        | 0.107        | 0.107        | 0.159        | 0.159        | 0.093        | 0.086        | 0.101        | 0.093        |
| 6563 H $\alpha$    | 2.765        | 2.850        | 2.872        | 2.850        | 2.749        | 2.850        | 2.668        | 2.850        | 2.586        | 2.850        | 2.605        | 2.850        | 2.739        | 2.850        |
| 6584 [NII]         | 0.630        | 0.568        | 0.228        | 0.211        | 0.135        | 0.126        | 0.319        | 0.319        | 0.480        | 0.480        | 0.277        | 0.258        | 0.304        | 0.281        |
| 6678 HeI           | 0.031        | 0.027        | 0.031        | 0.028        | 0.031        | 0.028        | 0.031        | 0.031        | 0.028        | 0.028        | 0.033        | 0.031        |              |              |
| 6717 [SII]         | 0.431        | 0.386        | 0.356        | 0.327        | 0.210        | 0.196        | 0.241        | 0.241        | 0.283        | 0.283        | 0.259        | 0.236        | 0.365        | 0.328        |
| 6731 [SII]         | 0.300        | 0.268        | 0.251        | 0.231        | 0.152        | 0.142        | 0.177        | 0.177        | 0.206        | 0.206        | 0.179        | 0.163        | 0.247        | 0.222        |
| 7136 [ArIII]       | 0.040        | 0.036        | 0.069        | 0.062        | 0.066        | 0.061        | 0.081        | 0.081        | 0.060        | 0.060        | 0.062        | 0.056        | 0.058        | 0.053        |
| 7320 [OII]         | 0.013        | 0.011        | 0.027        | 0.024        | 0.023        | 0.021        | 0.017        | 0.017        | 0.012        | 0.012        | 0.021        | 0.019        | 0.021        | 0.019        |
| 7330 [OII]         | 0.007        | 0.006        | 0.019        | 0.017        | 0.019        | 0.017        | 0.015        | 0.015        | 0.009        | 0.009        | 0.015        | 0.013        | 0.017        | 0.015        |
| C(H $\beta$ )(dex) | 0.13         |              | 0.10         |              | 0.08         |              | 0.00         |              | 0.00         |              | 0.09         |              | 0.10         |              |
| EW(H $\beta$ )(Å)  | 20.6         |              | 28.2         |              | 102.5        |              | 108.1        |              | 91.6         |              | 49.5         |              | 13.6         |              |
| EW(abs)(Å)         | 0.6          |              | 0.8          |              | 0.9          |              | 0.0          |              | 0.0          |              | 1.3          |              | 0.2          |              |

[19]. Так как в некоторых случаях сильные линии могут быть подрезанными (из табл.2 видно, что наблюдаемое отношение  $F(\text{H}\alpha)/F(\text{H}\beta)$  почти всегда меньше 2.85), поэтому для определения  $EW_a(\lambda)$  и  $C(\text{H}\beta)$  использовались только отношения  $F(\text{H}\gamma)/F(\text{H}\beta)$  и  $F(\text{H}\delta)/F(\text{H}\beta)$ . В табл.2 приведены  $EW_e(\lambda)$ ,  $EW_a(\lambda)$ ,  $C(\text{H}\beta)$ ,  $F(\lambda)$  и  $I(\lambda)$ .

### 3. Содержание химических элементов.

3.1. *Содержание тяжелых элементов.* При определении обилия ионов учитывалось, что в зонах, в которых они образуются, электронные температуры различны.

Электронная температура в O<sup>++</sup> зонах вычислялась по методу последовательных приближений, используя уравнение из [20]:

$$t = \frac{1.432}{\log[(\lambda 4959 + \lambda 5007)/\lambda 4363] - \log C_T},$$

где

$$t = 10^{-4} T_e(\text{ОIII}), C_T = (8.44 - 1.09t + 0.5t^2 - 0.08t^3) \frac{1 + 0.0004x}{1 + 0.044x}, x = 10^{-4} N_e t^{-0.5}.$$

Таблица 3

## СОДЕРЖАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ И ИОНОВ В НII-ОБЛАСТЯХ

| Параметры                             | Kaz429 | Kaz429 <sup>1</sup> | Kaz453 | Kaz459 | Kaz460(I) | Kaz460(II) | Kaz460(II) <sup>1</sup> | Kaz528 | Kaz530 |
|---------------------------------------|--------|---------------------|--------|--------|-----------|------------|-------------------------|--------|--------|
| $T_e(\text{OIII})$ (K)                | 11020  | 9510                | 11841  | 11747  | 9190      | 10279      | 7830                    | 10697  | 10848  |
| $T_e(\text{OII})$ (K)                 | 10917  | 9617                | 11692  | 11607  | 9461      | 10147      | 9441                    | 10589  | 10744  |
| $T_e(\text{SIII})$ (K)                | 9758   | 9543                | 10904  | 10776  | 9306      | 8658       | 8666                    | 9285   | 9508   |
| $n_e(\text{SII})$ (см <sup>-3</sup> ) | 60     | 60                  | 84     | 123    | 128       | 116        | 115                     | 51     | 23     |
| $O^+/H^+$ ( $\times 10^4$ )           | 2.46   | 5.31                | 4.06   | 3.91   | 11.12     | 4.69       | 7.40                    | 5.53   | 5.38   |
| $(O^+/H^+)_{\text{зп}} (\times 10^5)$ | 2.91   | 5.00                | 3.13   |        |           |            |                         |        |        |
| $O^{++}/H^+$ ( $\times 10^5$ )        | 2.28   | 3.77                | 6.25   | 7.98   | 11.22     | 4.22       | 11.87                   | 6.52   | 7.29   |
| $O^{+++}/H^+$ ( $\times 10^7$ )       |        |                     | 8.36   | 4.81   | 7.40      |            |                         |        |        |
| $O/H$ ( $\times 10^4$ )               | 5.20   | 8.77                | 9.39   | 11.95  | 22.42     | 8.91       | 19.27                   | 12.05  | 12.67  |
| $12+\log(O/H)$                        | 7.71   | 7.94                | 7.97   | 8.07   | 8.35      | 7.95       | 8.28                    | 8.08   | 8.10   |
| $N^+/H^+$ ( $\times 10^6$ )           | 8.71   | 12.14               | 2.82   | 1.68   | 7.12      | 8.84       | 10.70                   | 4.25   | 4.45   |
| ICF                                   | 1.93   | 1.69                | 2.56   | 3.04   | 2.39      | 1.90       | 2.62                    | 2.19   | 2.37   |
| $N/H$ ( $\times 10^6$ )               | 16.86  | 20.57               | 7.22   | 5.10   | 17.09     | 16.80      | 28.15                   | 9.35   | 10.58  |
| $12+\log(N/H)$                        | 7.23   | 7.31                | 6.85   | 6.70   | 7.24      | 7.22       | 7.45                    | 6.97   | 7.02   |
| $\log(N/O)$                           | -0.49  | -0.63               | -1.11  | -1.37  | -1.12     | -0.72      | -0.83                   | -1.11  | -1.08  |
| $Ne^{++}/H^+$ ( $\times 10^6$ )       | 5.30   | 9.65                | 15.15  | 16.70  | 22.59     | 5.69       | 19.77                   | 17.77  | 23.90  |
| ICF                                   | 1.22   | 1.26                | 1.17   | 1.14   | 1.71      | 1.23       | 1.16                    | 1.20   | 1.18   |
| $Ne/H$ ( $\times 10^6$ )              | 6.50   | 12.14               | 17.74  | 19.07  | 38.80     | 7.03       | 23.06                   | 21.35  | 28.30  |
| $12+\log(Ne/H)$                       | 6.81   | 7.08                | 7.25   | 7.28   | 7.58      | 6.84       | 7.36                    | 7.33   | 7.45   |
| $\log(Ne/O)$                          | -0.86  | -0.87               | -0.72  | -0.80  | -0.76     | -1.10      | -0.92                   | -0.75  | -0.65  |
| $S^+/H^+$ ( $\times 10^6$ )           | 1.19   | 1.63                | 0.88   | 0.54   | 1.09      | 1.07       | 1.28                    | 0.78   | 1.04   |
| $S^{++}/H^+$ ( $\times 10^6$ )        |        |                     | 1.59   | 2.00   | 3.15      | 4.01       | 3.99                    | 2.07   | 1.85   |
| ICF                                   |        |                     | 1.07   | 1.09   | 1.00      | 1.05       | 1.07                    | 1.05   | 1.06   |
| $S/H$ ( $\times 10^6$ )               |        |                     | 2.63   | 2.76   | 4.27      | 5.33       | 5.64                    | 3.01   | 3.06   |
| $12+\log(S/H)$                        |        |                     | 6.42   | 6.44   | 6.63      | 6.73       | 6.75                    | 6.47   | 6.48   |
| $\log(S/O)$                           |        |                     | -1.60  | -1.64  | -1.72     | -1.22      | -1.53                   | -1.60  | -1.61  |
| $Ar^{++}/H^+$ ( $\times 10^7$ )       | 3.22   | 3.40                | 4.26   | 4.31   | 8.17      | 7.31       | 7.29                    | 5.68   | 5.03   |
| ICF                                   | 1.07   | 1.08                | 1.07   | 1.08   | 1.10      | 1.08       | 1.07                    | 1.07   | 1.07   |
| $Ar/H$ ( $\times 10^7$ )              | 3.47   | 3.70                | 4.58   | 4.66   | 9.02      | 7.90       | 7.84                    | 6.10   | 5.40   |
| $12+\log(Ar/H)$                       | 5.54   | 5.57                | 5.66   | 5.67   | 5.95      | 5.90       | 5.89                    | 6.78   | 5.73   |
| $\log(Ar/O)$                          | -2.13  | -2.39               | -2.36  | -2.41  | -2.39     | -2.05      | -2.39                   | -2.29  | -2.37  |
| $y^+$ (среднее)                       | 0.0751 | 0.0730              | 0.0774 | 0.0767 | 0.0770    | 0.0747     | 0.0700                  | 0.0731 | 0.0759 |
| $y^{++}$ (4686)                       |        |                     | 0.0012 | 0.0006 | 0.0005    |            |                         |        |        |
| $\eta$                                |        |                     | 1.168  | 1.796  | 2.851     | 4.148      | 1.930                   | 2.350  | 2.130  |
| ICF(He)                               | 1.000  | 1.000               | 1.007  | 1.012  | 1.022     | 1.038      | 1.013                   | 1.017  | 1.015  |
| $y = y^+ + y^{++}$                    | 0.075  | 0.073               | 0.078  | 0.078  | 0.079     | 0.078      | 0.071                   | 0.074  | 0.077  |

<sup>1</sup> Значения, полученные по  $T_e(Ar/O)$  методу.

Электронная плотность  $n_e([SII])$  была определена с помощью отношения  $[SII]\lambda 6717/[SII]\lambda 6731$  (коэффициенты вероятностей спонтанных переходов для этих линий взяты из [21], а эффективные поперечные сечения для столкновений из [22]). Полученные значения  $n_e([SII])$  во всех случаях  $< 150 \text{ см}^{-3}$  (см., табл.3).

При определении электронной температуры для ионов OII, NeIII, SII, SIII, NII, ArIII, NeIII и HeII, использовались зависимости между  $T_e([OIII])$  и электронными температурами этих ионов из работы [3]. Электронные температуры в НII-областях для вышеупомянутых ионов приведены в табл.3.

Для определения обилия элементов использовались следующие линии: [OII]  $\lambda 3727$  (или [OII]  $\lambda\lambda 7320, 7331$ , если линия [OII]  $\lambda 3727$  не наблюдалась (для галактик с  $z < 0.025$ )) и [OIII]  $\lambda\lambda 4959, 5007$  - для кислорода, [NII]  $\lambda\lambda 6548, 6584$  - для азота, [NeIII]  $\lambda 3868$  - для неона, [SIII]  $\lambda 6312$  и [SII]  $\lambda\lambda 6717, 6731$  - для серы и линия [ArIII]  $\lambda 7135$  - для определения обилия аргона. При вычислении содержания этих ионов использовались формулы из [3].

Содержание кислорода вычислялось по:  $O/H = O^+/H^+ + O^{2+}/H^+$  кроме трех НII-областей, в которых наблюдалась линия HeII  $\lambda 4686$ . При определении полного содержания кислорода в этих трех НII-областях учитывалась также доля  $O^{3+}$  иона [3] (во всех трех случаях доля  $O^{3+}$  иона составила  $< 1\%$  полного содержания кислорода). Полное содержание остальных элементов вычислялось по  $X/H = ICF(X)(X^+/H^+)$ . Значения ICF тяжелых элементов определялись по формулам, приведенным в [3].

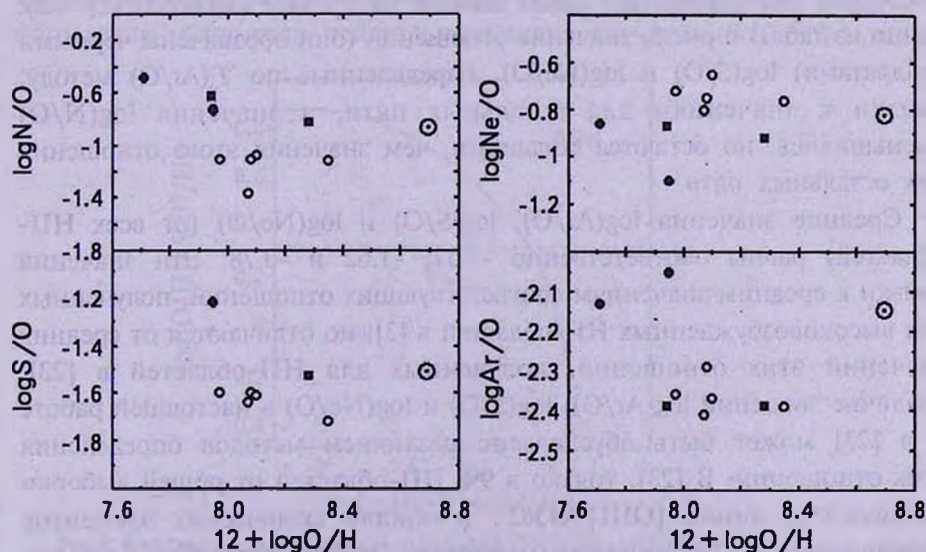


Рис.3. Зависимости  $\log(N/O)$ ,  $\log(Ne/O)$ ,  $\log(S/O)$  и  $\log(Ar/O)$  от  $12 + \log(O/H)$  для НII-областей. Значение этих отношений для Солнца [24] обозначены символом ⊙.

В табл.3 приведены содержание тяжелых элементов и их ионов, значение  $ICF$ ,  $T_e$  и  $n_e$  в исследуемых HII-областях.

На диаграмме рис.3 представлены зависимости отношений  $N/O$ ,  $S/O$ ,  $Ne/O$ ,  $Ar/O$  от  $12 + \log(O/H)$ . Заполненными кружками обозначены две низковозбужденные HII-области, для которых  $[OIII]\lambda 4959/H\beta < 0.7$ . Из этих диаграмм видно, что по всем значениям вышеупомянутых отношений, эти два объекта отличаются от остальных пяти, которые обозначены открытыми кружками. В работе [2] также наблюдалось такое различие и было предположено, что это различие, возможно, обусловлено неточностью определения интенсивности высоковозбужденной линии  $[OIII]\lambda 4363$  в низковозбужденных HII-областях (в таких областях эта линия слаба). Однако отмечалось и то, что в этих низковозбужденных HII-областях может быть дополнительный нагревающий механизм, кроме излучения молодыми звездами. В вышеупомянутых двух HII-областях  $I([OIII]\lambda 4363) < 0.01 \times I(H\beta)$  (см. табл.2) и неточность определения интенсивности линии  $[OIII]\lambda 4363$  может быть большой. Отметим, что эти два объекта находятся относительно ближе к центрам их РГ, чем остальные (см., табл.1).

Как альтернатива, для определения электронной температуры в вышеупомянутых HII-областях, использовался метод, представленный в [2]. Принимая, что  $\log(Ar/O) = -2.39$  [3], определялась соответствующая электронная температура, и с ее помощью определялось содержание остальных элементов ( $T_e(Ar/O)$  метод). Выбор отношения  $\log(Ar/O)$  для определения  $T_e$  целесообразнее, чем  $\log(S/O)$  или  $\log(Ne/O)$ , так как последние два отношения слабо зависят от  $T_e$ , чем  $\log(Ar/O)$  [2]. Как видно из табл.3 и рис.3, значение отношений (они обозначены черными квадратами)  $\log(S/O)$  и  $\log(Ne/O)$ , определенные по  $T_e(Ar/O)$  методу, близки к значениям для остальных пяти, а значения  $\log(N/O)$  уменьшились, но остаются большими, чем значения этого отношения для остальных пяти.

Средние значения  $\log(Ar/O)$ ,  $\log(S/O)$  и  $\log(Ne/O)$  (от всех HII-областей) равны соответственно -2.37, -1.62 и -0.78. Эти значения близки к средним значениям соответствующих отношений, полученных для высоковозбужденных HII-областей в [3], но отличаются от средних значений этих отношений, полученных для HII-областей в [23]. Различие значений  $\log(Ar/O)$ ,  $\log(S/O)$  и  $\log(Ne/O)$  в настоящей работе и в [23] может быть обусловлено различием методов определения этих отношений. В [23], только в 9% HII-областей от общей выборки наблюдалась линия  $[OIII]\lambda 4363$ , и обилие химических элементов определялось по эмпирическим методам. Эти различия более высоки для отношения  $\log(N/O)$ , так как оно более чувствительно к  $T_e$ , чем

остальные ( $\log(\text{Ar}/\text{O})$ ,  $\log(\text{S}/\text{O})$  и  $\log(\text{Ne}/\text{O})$ ) [2]. Значения вышеупомянутых отношений для Солнца равны соответственно -2.14, -1.5 и -0.82 [24]. Как видно, значения  $\log(\text{Ar}/\text{O})$  и  $\log(\text{S}/\text{O})$ , полученные в настоящей работе, отличаются от значений соответствующих отношений для Солнца. Эти различия могут быть обусловлены и неточностью определения этих отношений для Солнца (см., например, [3]) и неточностью определения в этой работе.

Значение  $\log(\text{N}/\text{O})$  для исследуемых НП-областей находится в интервале значений  $-0.63 \pm -1.37$ . При данной металличности значение  $\log(\text{N}/\text{O})$  для исследуемых НП-областей больше, чем для НП-областей, исследованных в [23]. На диаграмме  $\log(\text{N}/\text{O}) - 12 + \log(\text{O}/\text{H})$  исследуемые НП-области находятся в той же области, что и высоковозбужденные НП-области в [2,3], что указывает на похожую историю обогащения азотом. Это значит, что возраст исследуемых НП-областей больше 100-300 млн лет, необходимого для обогащения азотом звездами промежуточных масс [2,3,12].

**3.2. Содержание гелия.** Содержание гелия определялось по линиям,  $\text{HeI}\lambda 4471$ ,  $\text{HeI}\lambda 5876$ ,  $\text{HeI}\lambda 6678$  (для определения  $\text{He}^+$ ) и  $\text{HeII}\lambda 4686$  (для определения  $\text{He}^{++}$ ) с помощью формул, приведенных в [17,25].

Полное содержание гелия вычислялось по:  $\text{He}/\text{H} = \text{ICF}(\text{He})y$ , где  $y = y^+ + y^{2+} \equiv \text{He}^+/\text{H} + \text{He}^{++}/\text{H}$  и  $\text{ICF}(\text{He}) = 1 + \eta(0.005 + 0.001\eta)$  [26], где  $\eta = \text{O}^+\text{S}^{2+}/\text{S}^+\text{O}^{2+}$ .

Корректирующий фактор  $\text{ICF}(\text{He})$  учитывает содержание нейтрального гелия (хотя доля нейтрального гелия значительна ( $\geq 5\%$ )), когда

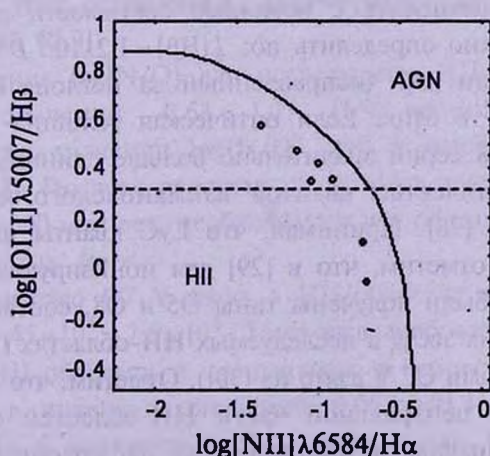


Рис.4. Классификационная диаграмма  $[\text{OIII}]\lambda 5007/\text{H}\beta$  -  $[\text{NII}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$ . Заполненными кружками обозначены НП-области, для которых  $[\text{OIII}]\lambda 4363/\text{H}\beta < 0.7$ , открытыми кружками обозначены НП-области, для которых  $[\text{OIII}]\lambda 4363/\text{H}\beta > 0.7$ . Сплошная кривая [27] отделяет НП-области от AGN, пунктирная линия соответствует  $[\text{OIII}]\lambda 4959/\text{H}\beta = 0.7$ .

$\eta \geq 10$  [26], а в исследуемых HII-областях  $\eta < 5$  (см. табл.3)). В Kaz429 эмиссионная линия [SIII]  $\lambda 6312$  не наблюдалась, поэтому для нее  $ICF(He) = 1$ .

Значения  $y^+$  (как величина средняя от значений  $y^+(4471)$ ,  $y^+(5876)$  и  $y^+(6678)$ ),  $y^{2+}$ ,  $\eta$ ,  $ICF(He)$  и  $u$  приведены в табл.3.

4. *Звездное население.* В HII-областях эмиссионные линии водорода являются индикаторами молодого звездного населения, так как они образуются после поглощения и переработки излучения этих звезд за границей лаймановской серии. С помощью этих линий

Таблица 4

## КОЛИЧЕСТВО ИОНИЗИРУЮЩИХ ЗВЕЗД В HII-ОБЛАСТЯХ

| Параметры                                      | Kaz429 | Kaz453 | Kaz459 | Kaz460(I) | Kaz460(II) | Kaz528 | Kaz530 |
|------------------------------------------------|--------|--------|--------|-----------|------------|--------|--------|
| $D$ (Мпк)                                      | 121.6  | 188.4  | 51.2   | 42        | 42         | 71.2   | 88.4   |
| $R$ (пк)                                       | 885    | 1370   | 370    | 305       | 305        | 517.5  | 640    |
| $r$ (пк)                                       | 885    | 1351   | 459    | 437       | 332        | 507    | 595    |
| $F(H\beta) (x10^{-17}) (эрг\ c^{-1}\ cm^{-2})$ | 398    | 861    | 1498   | 1575      | 1031       | 527    | 238    |
| $L(H\beta) (x10^{39}) (эрг\ c^{-1})$           | 7.06   | 36.68  | 4.71   | 3.33      | 2.18       | 3.20   | 2.23   |
| $N\ LyC (x10^{51})$                            | 14.55  | 75.56  | 9.71   | 6.87      | 4.50       | 6.60   | 4.60   |
| $N\ O7\ V$                                     | 1455   | 7556   | 971    | 687       | 450        | 660    | 460    |
| $SFR (x10^2) (M_{\odot}\ год^{-1})$            | 15.71  | 81.60  | 10.48  | 7.42      | 4.86       | 7.13   | 4.97   |

вычислены количество ионизирующих звезд и темп звездообразования в исследуемых HII-областях.

На двухмерной классификационной диаграмме рис.4 все семь исследуемых объектов расположены в области HII. Количество O-V звезд в HII-областях можно вычислить с помощью светимости линии  $H\beta$ . Светимость  $L(H\beta)$  можно определить по:  $L(H\beta) = 1.2 \cdot 10^{50} D^2 F(H\beta)$ , где  $F(H\beta)$  - поток в линии  $H\beta$  (исправленный за поглощение) и  $D$  - расстояние до объекта в Мпк. Если оптическая толщина области за пределом лаймановской серии значительно больше единицы ( $\tau_c \gg 1$ ), то при  $T_e = 10^4$  K количество квантов лаймановского континуума  $N\ LyC = 2.06 \cdot 10^{12} L(H\beta)$  [28]. Принимая, что  $LyC$  кванты испускаются звездами типа O7 V (отметим, что в [29] для ионизирующих звезд в Kaz460(I) и Kaz460(II) были получены типы O5 и O8, соответственно), получим количество этих звезд в исследуемых HII-областях (количество  $LyC$  испускаемых звездами O7 V взято из [30]). Отметим, что количество звезд подсчитано для центральной части HII-областей с угловым радиусом  $1''.5$  (такой диафрагме соответствуют наблюдаемые спектры SDSS).

В табл.4 приведены значения  $F(H\beta)$ ,  $L(H\beta)$ ,  $D$ ,  $N\ LyC$ , линейный радиус, соответствующий  $1''.5$  -  $R$ , линейный радиус всей HII-области -

$r$  и количество O7 V звезд в HII-области с угловым радиусом  $1''.5 - N$  (O7 V). Как видно из этой таблицы, различие между размерами всей HII-области ( $r$ ) и области, соответствующей  $1''.5$  ( $R$ ), сравнительно больше для Kaz 459, Kaz 460(I) и Kaz 460(II) (их красные смещения меньше красных смещений остальных). То есть, для них получен нижний предел количеств O7 V звезд. Количество O7 V звезд в HII-областях находится в интервале значений  $0.45 \times 10^3 \div 7.5 \times 10^3$ . Самое большое количество этих звезд получено для гигантской HII-области в галактике Kaz 453.

По значениям  $L(\text{H}\beta)$  определялся темп звездообразования - SFR (Star formation rate) [31]. Значения SFR для исследуемых HII-областей находятся в интервале значений  $0.05 \div 0.81 M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ . Из табл.4 видно, что темп звездообразования, так же, как количество O7 V звезд, самый большой в гигантской HII-области в иррегулярной галактике Kaz 453. Светимость  $L(\text{H}\beta)$ , а значит и темп звездообразования, одного порядка, что и в HII-областях в спиральных и иррегулярных галактиках [32].

5. *Заключение.* Резюмируя полученные результаты исследования семи HII-областей в галактиках Казаряна, можно сделать следующие выводы:

1. Среди исследованных HII-областей нет объекта с очень низкой металличностью ( $12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 7.6$ , т.е.  $Z < Z_{\odot}/12$ ). Содержание кислорода  $12 + \log(\text{O}/\text{H})$  в этих областях находится в интервале  $7.94(Z_{\odot}/5.6) \div +8.35(Z_{\odot}/2.2)$ . Средние значения отношений  $\log(\text{Ne}/\text{O})$ ,  $\log(\text{Ar}/\text{O})$  и  $\log(\text{S}/\text{O})$  равны соответственно  $-0.78$ ,  $-2.37$  и  $-1.63$ , что близко к значениям этих отношений, полученным для высоковозбужденных HII-областей [2,3].

2. Значение  $\log(\text{N}/\text{O})$  для исследуемых HII-областей находится в интервале значений  $-0.63 \div -1.37$ . При данной металличности они имеют те же значения  $\log(\text{N}/\text{O})$ , что и высоковозбужденные HII-области [2,3]. По всей вероятности возраст исследуемых HII-областей больше 100-300 млн лет, необходимого для обогащения азотом звездами промежуточных масс.

3. Количество O7 V звезд в HII-областях находится в интервале значений  $0.45 \times 10^3 \div 7.5 \times 10^3$ . Темп звездообразования одного порядка, что и в HII-областях в спиральных и иррегулярных галактиках и находится в интервале значений  $0.05 \div 0.81 M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ . Темп звездообразования и количество O7 V звезд самые большие в гигантской HII-области в иррегулярной галактике Kaz 453.

В работе использовались данные из базы данных внегалактических объектов Лион-Медон (HyperLeda), поддерживаемая группой LEDA в

обсерватории-CRAL в Лионе и из пятой базы данных Слоановского цифрового обзора неба (SDSS DR5), открытой для свободного доступа в <http://www.sdss.org/dr5>.

Автор благодарит А.Р.Петросяна и М.А.Казаряна за плодотворное обсуждение и ценные замечания.

Ереванский государственный университет,  
Армения, e-mail: [adbvardan@rambler.ru](mailto:adbvardan@rambler.ru)

## THE SPECTRAL INVESTIGATION OF SEVEN HII REGIONS IN KAZARIAN GALAXIES

V.Zh.ADIBEKYAN

According to SDSS DR5 spectra the spectrophotometric investigations of seven HII regions of six Kazarian galaxies are conducted. The abundances of heavy elements and helium and also quantity of ionizing stars and star formation rate are determined. The oxygen abundance  $12 + \log(\text{O}/\text{H})$  lies in the range  $7.94 \pm 0.35$ . The mean  $\log(\text{S}/\text{O})$ ,  $\log(\text{Ar}/\text{O})$  and  $\log(\text{Ne}/\text{O})$  abundance ratios are equal to:  $-1.63$ ,  $-2.37$  and  $-0.78$ , respectively. The  $\log(\text{N}/\text{O})$  abundance ratio of investigated HII regions is in the interval  $-0.63 \pm -1.37$ . They occupy the same area in the diagram  $\text{N}/\text{O} - \text{O}/\text{H}$  as the high-excitation HII regions. Most likely, the ages of investigated HII regions are larger than 100-300 Myr, required for the enrichment in nitrogen by intermediate-mass stars. The star formation rate is one order as in HII regions in spiral and irregular galaxies, and is in the interval  $0.05 \pm 0.81 M_{\odot} \text{year}^{-1}$ .

Key words: *HII regions: metallicity: star formation: UV - excess*

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.А.Амбарцумян, Эволюция звезд и астрофизика., АН Арм. ССР, Ереван, 1947.
2. Y.I.Izotov, G.Stasinska, N.G.Guseva, T.X.Thuan, Astron. Astrophys., 415, 87, 2004.
3. Y.I.Izotov, G.Stasinska, G.Meynet, N.G.Guseva, T.X.Thuan, Astron. Astrophys.,

448, 955, 2006.

4. *B.E.Pagel, M.G.Edmunds, D.E.Blackwell, M.S.Chun, G.Smith*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 189, 95, 1979.
5. *А.Р.Петросян*, Сообщ. Бюр. Обс., 61, 15, 1990.
6. *L.S.Pilyugin, T.Contini, J.M.Vi'lchez*, Astron. Astrophys., 423, 427, 2004.
7. *L.S.Pilyugin, J.M.Vi'lchez, T.Contini*, Astron. Astrophys., 425, 849, 2004.
8. *R.C.Kennicutt, M.S.Oey, D.Zaritsky, J.P.Huchra*, Rev. Mexic. de Astron. Astrofis., 27, 21, 1993.
9. *H.A.Kobulnicky, E.D.Skillman*, Astrophys. J., 471, 211, 1996.
10. *A.Maeder*, Astron. Astrophys., 264, 105, 1992.
11. *Y.I.Izotov, T.X.Thuan*, Astrophys. J., 511, 639, 1999.
12. *R.B.C.Henry, M.G.Edmunds, J.Köppen*, Astrophys. J., 541, 660, 2000.
13. *L. van Zee, J.J.Salazer, M.P.Haynes*, Astrophys. J., 497, 1, 1998.
14. *М.А.Казарян, Э.С.Казарян*, Астрофизика, 18, 512, 1982.
15. *М.А.Казарян, Э.С.Казарян*, Астрофизика, 19, 213, 1983.
16. *J.K.Adelman-McCarthy, M.A.Agueros, S.S.Alam et al.*, 2007yCat.2276....0A.
17. *Y.I.Izotov, T.X.Thuan, V.A.Lipovetsky*, Astrophys. J., 435, 647, 1994.
18. *A.E.Whitford*, Astrophys. J., 63, 201, 1958.
19. *M.Brocklehurst*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 157, 211, 1972.
20. *L.H.Aller*, Physics of Thermal Gaseous Nebulae (Dordrecht: Reidel) 1984.
21. *C.Mendoza, C.J.Zeppen*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 198, 127, 1982.
22. *F.P.Kennan, L.H.Aller, K.L.Bell et al.*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 281, 1073, 1996.
23. *L. van Zee, J.J.Salazer, M.P.Haynes*, Astron. J., 116, 2805, 1998.
24. *K.Lodders*, Astrophys. J., 591, 1220, 2003.
25. *Y.I.Izotov, T.X.Thuan, V.A.Lipovetsky*, Astrophys. J. Suppl. Ser., 108, 1, 1997.
26. *B.E.J.Pagel, E.A.Simonson, R.J.Terlevich, M.G.Edmunds*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 255, 325, 1992.
27. *G.Stasinska, R. Cid Fernandes et al.*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 371, 972, 2006.
28. *D.E.Osterbrock*, Astrophysics of Gaseous Nebulae., San Francisco: W.H.Freeman, 1974.
29. *М.А.Казарян*, Астрофизика, 29, 167, 1988.
30. *C.Leitherer*, Astrophys. J. Suppl. Ser., 73, 1, 1990.
31. *R.C.Kennicutt*, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 36, 189, 1998.
32. *R.C.Kennicutt, B.K.Edgar, P.W.Hodge*, Astrophys. J., 337, 761, 1989.