

УДК 524.523-36

Р. В. Шкварун¹, Х. М. Вильчез², Л. С. Пилюгин¹¹Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 ГСП, Киев, ул. Академика Заболотного, 27²Институт Астрофизики Андалусии
Апдо, 3004, 18080 Гранада, Испания

Содержание неона в дисках спиральных галактик

При помощи P-метода на основе литературных данных определены содержания неона и кислорода в областях H II семи спиральных галактик. Оказалось, что наклоны радиальных распределений содержания неона и кислорода согласуются между собой, т. е. отношение содержаний неона и кислорода является постоянным в пределах ошибок.

ВМІСТ НЕОНУ В ДИСКАХ СПІРАЛЬНИХ ГАЛАКТИК, Шкварун Р. В., Вільчез Х. М., Пілюгін Л. С. — За допомогою P-методу на основі літературних даних визначено вміст неону і кисню в областях H II семи спіральних галактик. Виявилось, що нахили радіальних розподілів вмісту неону і кисню узгоджуються між собою, тобто відношення вмістів неону і кисню є постійним в межах похибок.

NEON ABUNDANCE IN DISCS OF SPIRAL GALAXIES, by Shkvarun R. V., Vilchez J. M., Pilyugin L. S. — The neon and oxygen abundances in H II regions of seven spiral galaxies are determined through the P-method using published spectra. The parameters of radial distributions of neon and oxygen abundances in the discs of those galaxies are obtained. Comparison between the radial distributions of the neon and oxygen abundances in the galaxies shows that the trends in these distributions are in agreement. This indicates that the neon-to-oxygen abundances ratio is constant within the abundance determination uncertainties.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время общепринято, что неон является продуктом α -процесса и производится в тех же массивных звездах, в которых синтезируется кислород. Следовательно, отношение содержаний неона и кислорода Ne/O не должно зависеть от содержания кислорода O/H [11]. Наиболее надежные определения содержаний неона и кислорода при низких металличностях в неправильных галактиках дают значения $\lg(\text{Ne}/\text{O}) \approx -0.7$ [12]. Исследование содержания неона в областях H II с высокой металличностью в дисках

спиральных галактик является сложной задачей, потому что измерения спектральных линий неона там не обладают высокой точностью.

В работе [32] на основе спектральных наблюдений областей Н II в ИК-диапазоне исследовано содержание неона в 25 областях Н II спиральной галактики М33 (NGC 598).

Согласно полученным данным радиальное распределение содержания неона имеет заметно меньший наклон, чем радиальное распределение содержания кислорода, полученное R_{23} -методом [10, 15, 31, 33]. Данный результат противоречит выводу о том, что отношение Ne/O не зависит от O/H [11].

Цель данного исследования — на основе анализа литературных данных определить степень различия радиальных распределений содержания неона и кислорода в спиральных галактиках. Содержания рассчитывались с помощью Р- и T_e -методов по интенсивности спектральных линий неона и кислорода в Н II областях для галактик NGC 598, NGC 628, NGC 925, NGC 2403, NGC 2805, NGC 4395 и NGC 5457.

СОДЕРЖАНИЯ НЕОНА И КИСЛОРОДА

Методика определения содержаний. Содержание неона и кислорода в большинстве областей Н II будем определять при помощи эмпирического метода. Классический T_e -метод здесь неприменим, потому что в спектрах большинства областей Н II с высокими металличностями не наблюдается авроральная линия кислорода [O III] λ 436.3 нм, которая является индикатором электронной температуры.

В работе приняты следующие обозначения: t_2 и t_3 — электронные температуры в зонах свечения [O II] и [O III] соответственно (в единицах 10^4 К), $I_{[OII]}$ — сумма интенсивностей небулярных линий кислорода [O II] λ 3726 + λ 3729, $I_{[OIII]}$ — сумма интенсивностей небулярных линий кислорода [O III] λ 4959 + λ 5007, $I_{[NeIII]}$ — интенсивность спектральной линии неона [Ne III] λ 3869, $I_{H\beta}$ — интенсивность спектральной линии $H\beta$ для наблюдаемой области Н II, n_e — электронная концентрация. Поскольку исследуются области Н II с низкой электронной концентрацией, будем использовать общепринятое приближение $n_e = 100 \text{ см}^{-3}$. Распределение электронной температуры в области Н II будем описывать с помощью двухзонной модели: первая — зона высокой ионизации с электронной температурой $t_3 = t_{[OIII]} = t_{[NeIII]}$, и вторая — зона низкой ионизации с электронной температурой $t_2 = t_{[OII]}$. Соотношение между электронными температурами согласно [6] следующее:

$$t_2 = 0.7t_3 + 0.3. \quad (1)$$

Уравнение классического T_e -метода для определения содержания кислорода в области Н II взяты из работы [17]:

$$\frac{O}{H} = \frac{O^+}{H^+} + \frac{O^{++}}{H^+}, \quad (2)$$

$$12 + \lg \frac{O^{++}}{H^+} = \lg \frac{I_{[OIII]}}{I_{H\beta}} + 6.174 + \frac{1.251}{t_3} - 0.55 \lg t_3, \quad (3)$$

$$12 + \lg(O^+/H^+) = \lg \frac{I_{[OII]}}{I_{H\beta}} + 5.890 + \frac{1.676}{t_2} - 0.40 \lg t_2 + \lg(1 + 1.35x), \quad (4)$$

$$x = 10^{-4} n_e t_2^{-1/2}. \quad (5)$$

Сначала определяется содержание кислорода в области Н II при помощи Р-метода [20, 21, 22]. Согласно данным [23] значения содержаний кислорода, определенные Р-методом, хорошо согласуются с оценками, полученными T_e -методом. Далее с использованием найденного содержания кислорода решается система уравнений (1)—(5) относительно t_3 . Отношение ионных содержаний $\text{Ne}^{++}/\text{O}^{++}$ определяется из выражения [17]

$$\lg \frac{\text{O}^{++}}{\text{Ne}^{++}} = \lg \frac{I_{[\text{OIII}]}}{I_{[\text{NeIII}]}} - 0.215 - \frac{0.355}{t_3} - 0.13 \lg t_3. \quad (6)$$

Следуя [18] принимаем, что отношение полных содержаний неона и кислорода в области Н II равно

$$\frac{\text{Ne}}{\text{O}} = \frac{\text{Ne}^{++}}{\text{O}^{++}}. \quad (7)$$

Содержание неона в области Н II равно

$$12 + \lg(\text{Ne}/\text{H}) = 12 + \lg(\text{O}/\text{H}) + \lg(\text{Ne}/\text{O}). \quad (8)$$

Результаты. Радиальное распределение содержания кислорода в дисках спиральных галактик хорошо описывается уравнением типа

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = A_{\text{O}} + B_{\text{O}} (R/R_{25}), \quad (9)$$

где $A_{\text{O}} = 12 + \lg(\text{O}/\text{H})_0$ — содержание кислорода, экстраполированное к центру галактики, B_{O} — градиент содержания кислорода, выраженный в единицах dex/ R_{25} , и R/R_{25} — галактоцентрическое расстояние, нормированное на изофотный радиус галактики R_{25} [24].

В табл. 1 представлены параметры радиального распределения содержания кислорода для семи галактик: содержание A_{O} кислорода, экстраполированное к центру галактики, радиальный градиент B_{O} , разброс $\Delta \lg(\text{O}/\text{H})$

Таблица 1. Параметры радиального распределения содержания кислорода в галактиках

Галактика	A_{O}	B_{O} , dex/ R_{25}	$\Delta \lg(\text{O}/\text{H})$, dex	Количество спектров	Литературный источник
NGC 0598	8.565	-0.167	0.085	42	[1, 2, 7, 15, 16, 18, 26, 27, 31]
NGC 0628	8.637	-0.365	0.112	35	[1, 4, 16, 30]
NGC 0925	8.448	-0.262	0.082	52	[30, 33]
NGC 2403	8.533	-0.360	0.091	54	[1, 5, 9, 8, 16, 27, 30]
NGC 2805	8.437	-0.263	0.224	17	[30]
NGC 4395	8.267	-0.017	0.138	16	[16, 30]
NGC 5457	8.778	-0.811	0.094	84	[1, 14, 13, 16, 25, 26, 27]

Таблица 2. Параметры радиального распределения содержания неона в галактиках

Галактика	A_{Ne}	B_{Ne} , dex/ R_{25}	$\Delta \lg(\text{Ne}/\text{H})$, dex	Количество спектров	Литературный источник
NGC 0598	7.900	-0.183	0.148	45	[7, 15, 16, 27, 31, 32]
NGC 0628	7.907	-0.363	0.626	9	[16, 30]
NGC 0925	7.953	-0.330	0.218	22	[30]
NGC 2403	7.881	-0.451	0.214	28	[5, 9, 16, 27, 30]
NGC 2805	7.873	-0.274	0.229	11	[30]
NGC 4395	7.773	-0.305	0.244	13	[16, 30]
NGC 5457	7.821	-0.168	0.411	31	[13, 16, 25, 28, 29, 30]

Таблица 3. Параметры радиального распределения содержания кислорода в галактике М33, полученные с использованием содержаний в областях Н II, рассчитанных Р- и R_{23} -методами

Метод определения содержания кислорода	A_O	$B_O, \text{ dex}/R_{25}$	$\Delta \lg(O/H), \text{ dex}$
Р-метод	8.565	-0.167	0.085
R_{23} -метод (калибровка [3])	9.018	-0.987	0.125
R_{23} -метод (калибровка [33])	9.130	-0.941	0.118

значений содержания кислорода в областях Н II с близкими галактоцентрическими расстояниями.

Радиальное распределение содержания неона в дисках спиральных галактик также будем описывать уравнением типа

$$12 + \lg(\text{Ne}/\text{H}) = A_{\text{Ne}} + B_{\text{Ne}}(R/R_{25}), \quad (11)$$

где $A_{\text{Ne}} = 12 + \lg(\text{Ne}/\text{H})_0$ — содержание неона, экстраполированное к центру галактики, B_{Ne} — градиент содержания неона. Параметры радиального распределения содержания неона в галактиках представлены в табл. 2. Параметры радиального распределения содержания кислорода в галактике М33, полученные методом наименьших квадратов на основе Р- и R_{23} -оценок, приведены в табл. 3. Содержания кислорода определялись разными методами по одним и тем же измерениям спектральных линий.

На рис. 1 представлены радиальные распределения содержания кислорода и неона в диске галактики М33. Содержания кислорода в индивидуальных областях Н II показаны точками, сплошной и штриховыми линиями показаны линейная аппроксимация и $\pm 0.2 \text{ dex}$. Крестиками показаны содержания, полученные T_e -методом. Пунктирной линией показано распределение содержания кислорода, рассчитанное с использованием калибровки [33] (R_{23} -метод).

Радиальное распределение содержания неона (рис. 1, б) в галактике М33 получены разными методами: Р-методом (кружки), по спектральным наблюдениям областей Н II в ИК-диапазоне [32] (квадратики), T_e -методом (крестики). Сплошная и штриховые линии представляют распределение кислорода (рис. 1, а), смещенное на -0.7 dex . Пунктирная линия — та же аппроксимация для неона (табл. 2). Градиент содержания неона в диске галактики М33 получен с использованием содержаний неона, полученных Р-методом, и содержаний неона, полученных по спектральным наблюдениям областей Н II в ИК-диапазоне в галактике М33 [32].

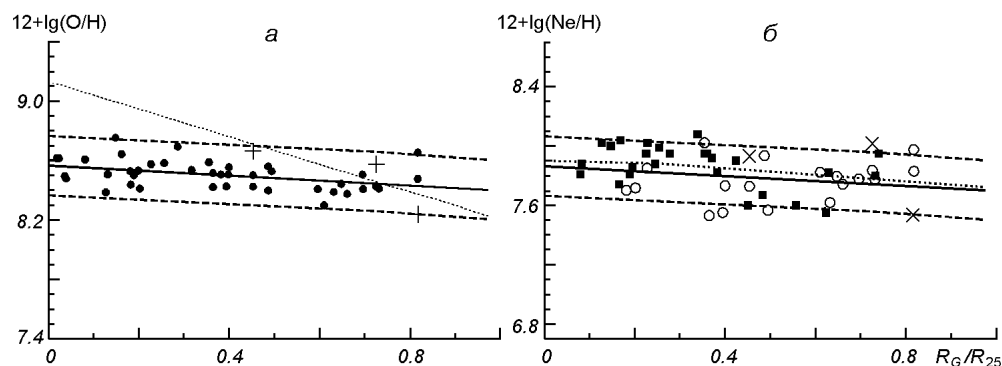


Рис. 1. Радиальное распределение содержаний кислорода (а) и неона (б) в галактике М 33 (обозначения см. в тексте)

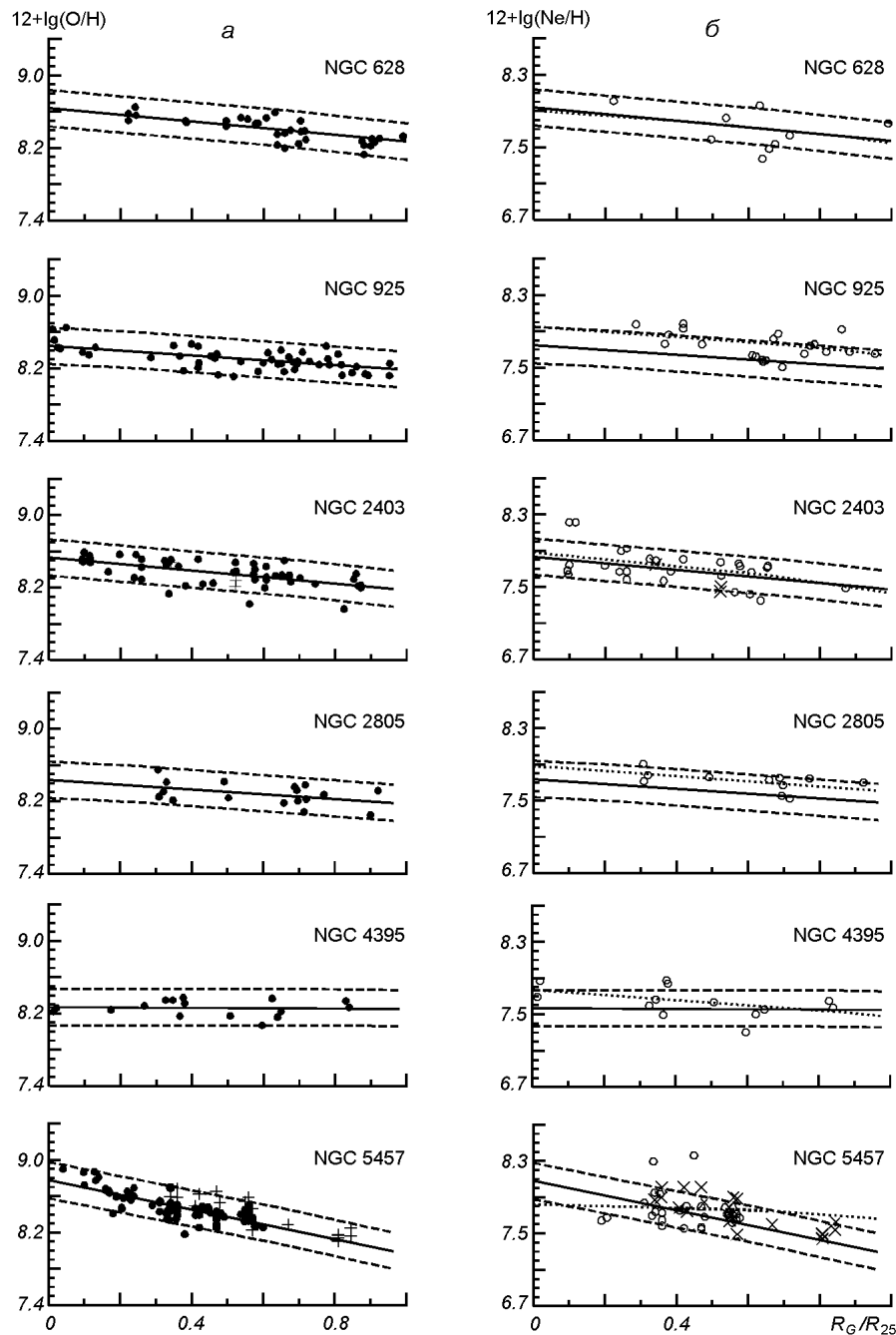


Рис. 2. Радиальные распределения содержаний кислорода (точки) и неона (кружки) в галактиках NGC 628, NGC 925, NGC 2403, NGC 2805, NGC 4395 и NGC 5457

На рис. 2 показаны аналогичные радиальные распределения содержаний кислорода и неона в галактиках NGC 628, NGC 925, NGC 2403, NGC 2805, NGC 4395 и NGC 5457. Содержания кислорода показаны точками, сплошными линиями показаны градиенты содержания кислорода, штриховые линии смещены на $\pm 0.2\text{dex}$ по вертикали.

Крестиками показаны содержания, полученные T_e -методом. Содержания неона, полученные с использованием P- и T_e -метода, обозначены кружками и крестиками соответственно. Сплошные линии соответствуют

градиентам содержания кислорода, сдвинутым на -0.7dex , а штриховые линии смещены на $\pm 0.2\text{dex}$ по оси Y относительно этих линий, соответственно. Пунктирные линии — аппроксимации содержаний неона в дисках галактик. Как и на рис. 1, б, на все распределения для неона наложены линии, аппроксимирующие распределения кислорода, и сдвинутые вниз на 0.7dex .

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ показывает, что полученные радиальные распределения содержаний неона и кислорода хорошо согласуются между собой с учетом принятого соотношения $\lg(\text{Ne}/\text{O}) \approx -0.7$.

Наличие разных оценок содержания неона в галактике M33 дает возможность проверить достоверность полученного распределения. Как хорошо видно из рис. 1, б, найденные нами содержания неона согласуются с оценками [32]. Заметно также согласие распределения содержания неона и кислорода. Это позволяет сделать вывод, что для галактики M33 содержания неона согласуются с предсказаниями теории химической эволюции галактик. В то же время это противоречит выводу работы [32] о том, что радиальное распределение содержания кислорода в M33 имеет значительно более крутой наклон, чем распределение содержания неона. Это разногласие объясняется тем, что для сравнения радиальных распределений содержания неона и кислорода в работе [32] использовались значения содержаний кислорода, полученные R_{23} -методом. Известно, что чем ближе область H II к центру галактики, тем выше ее металличность и ниже возбуждение. В R_{23} -методе параметр возбуждения области H II игнорируется. Как следствие, R_{23} -метод дает завышенные значения содержаний кислорода, особенно при приближении к центру галактики (табл. 3 и рис. 1, а). Поэтому R_{23} -метод приводит к более крутому распределению и к завышению градиента содержания кислорода в дисках галактик.

Радиальные распределения содержания неона и кислорода в галактиках NGC 2403 и NGC 5457 не противоречат друг другу, хотя формально значения градиентов содержания неона и кислорода в галактике NGC 5457 различны. Как видно из рис. 2, почти все области H II с определенными содержаниями неона в галактике NGC 5457 сконцентрированы в малом интервале галактоцентрических расстояний, и параметры радиального распределения содержания неона для данной галактики определены ненадежно. В галактиках NGC 628, NGC 925, NGC 2805 и NGC 4395 областей H II с измеренными линиями неона мало. Поэтому невозможно надежно определить значение градиента распределения неона. Однако большинство областей H II с определенными содержаниями неона лежат в полосе, которая соответствует полосе кислорода, смещенной на -0.7dex .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе спектральных данных из разных литературных источников при помощи Р-метода определены содержания неона и кислорода в областях H II семи спиральных галактик.

Получены параметры радиального распределения содержания неона и кислорода в дисках галактик. Сравнение показывает, что наклоны распределений во всех галактиках одинаковы.

Полученные Р-методом содержания неона для галактики M33 согласуются с оценками [32]. Радиальные распределения содержания неона и кислорода в галактике M33 также согласуются между собою.

Работа выполнена при частичной поддержке государственного фонда Испании по Астрономии и Астрофизике (AYA2001-3939-C03-01) и Украинского фонда фундаментальных исследований (грант 02.07/00132) .

1. *Bresolin F., Kennicutt R. C., Garnett D. R.* The ionising stars of extragalactic H II regions // *Astrophys. J.*—1999.—**510**, N 1.—P. 104—124.
2. *Diaz A. I., Terlevich E., Pagel B. E. J., Vilchez J. M., Edmunds M. G.* Detailed spectrophotometric study of the giant H II region NGC 604 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1987.—**226**, N 1.—P. 19—37.
3. *Edmunds M. G., Pagel B. E. J.* On the composition of H II regions in southern galaxies—III. NGC 2997 and 7793 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1984.—**211**, N 3.—P. 507—519.
4. *Ferguson A. M. N., Gallagher J. S., Wyse R. F. G.* The extreme outer regions of disk galaxies. I. Chemical abundances of H II regions // *Astron. J.*—1998.—**116**, N 2.—P. 673—690.
5. *Fierro J., Torres-Peimbert S., Peimbert M.* Chemical composition gradient in NGC 2403 and the stellar mass limit // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*—1986.—**98**, N 2.—P. 1032—1040.
6. *Garnett D. R.* Electron temperature variations and the measurement of nebular abundances // *Astron. J.*—1992.—**103**, N 3.—P. 1330—1337.
7. *Garnett D. R., Odewahn S. C., Skillman E. D.* Deciphering a Rosetta Stone — The nebula MA 1 in M33 // *Astron. J.*—1992.—**104**, N 4.—P. 1714—1720.
8. *Garnett D. R., Shields G. A., Peimbert M., et al.* Carbon in spiral galaxies from Hubble Space Telescope spectroscopy // *Astrophys. J.*—1999.—**513**, N 1.—P. 168—179.
9. *Garnett D. R., Shields G. A., Skillman E. D., et al.* Interstellar abundance gradients in NGC 2403: comparison to M33 // *Astron. J.*—1997.—**489**, N 1.—P. 63—86.
10. *Henry R. B. C., Howard J. W.* The form of abundance gradients in three nearby spiral galaxies: M33, M81 and M101 // *Astrophys. J.*—1995.—**438**, N 1.—P. 170—180.
11. *Henry R. B. C., Worthey G.* The distribution of heavy elements in spiral and elliptical galaxies // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*—1999.—**111**, N 2.—P. 919—945.
12. *Izotov Yu. I., Thuan T. X.* Heavy-element abundances in blue compact galaxies // *Astrophys. J.*—1999.—**511**, N 2.—P. 639—659.
13. *Kennicutt R. C., Bresolin F., Garnett D. R.* The composition gradient in M101 Revisited. II. Electron temperatures and implications for the nebular abundance scale // *Astrophys. J.*—2003.—**591**, N 2.—P. 801—820.
14. *Kennicutt R. C., Garnett D. R.* The composition gradient in M101 revisited. 1. H II region spectra and excitation properties // *Astrophys. J.*—1996.—**456**, N 2.—P. 504—518.
15. *Kwitter K. B., Aller L. H.* Chemical compositions of H II regions in the Triangulum spiral, M33 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1981.—**195**, N 2.—P. 939—957.
16. *McCall M. L., Rybski P. M., Shields G. A.* The chemistry of galaxies. I. The nature of giant extragalactic H II regions // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1985.—**57**, N 1.—P. 1—62.
17. *Pagel B. E. J., Simonson E. A., Terlevich R. G., Edmunds M. G.* The primordial helium abundance from observations of extragalactic H II regions // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1992.—**255**, N 2.—P. 325—345.
18. *Peimbert M.* On the oxygen abundance and electron temperature of NGC 604 // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*—1970.—**82**, N 2.—P. 636—639.
19. *Peimbert M., Costero R.* Chemical abundances in Galactic H II regions // *Bol. Obs. Tonantzintla y Tacubaya.*—1969.—**5**, N 1.—P. 3—22.
20. *Pilyugin L. S.* On the oxygen abundance determination in H II regions. The problem of the line intensities — oxygen abundance calibration // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**362**, N 2.—P. 325—332.
21. *Pilyugin L. S.* Oxygen abundances in dwarf irregular galaxies and the metallicity—luminosity relationship // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**374**, N 2.—P. 412—420.
22. *Pilyugin L. S.* On the oxygen abundance determination in H II regions. High-metallicity regions // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**369**, N 3.—P. 594—604.
23. *Pilyugin L. S., Ferrini F., Shkvarun R. V.* On the oxygen abundance in our Galaxy // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**401**, N 2.—P. 557—563.
24. *Pilyugin L. S., Vilchez J. M., Contini T.* Oxygen and nitrogen abundances in nearby galaxies. Correlations between oxygen abundance and macroscopic properties // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**425**, N 5.—P. 849—869.
25. *Rayo J. F., Peimbert M., Torres-Peibert S.* Gradients in the physical conditions of M101 and the pregalactic helium abundance // *Astron. J.*—1982.—**255**, N 1.—P. 1—10.
26. *Searle L.* Evidence for composition gradients across the disks of spiral galaxies // *Astrophys. J.*—1971.—**168**, N 3.—P. 327—341.
27. *Shields G. A., Searle L.* The composition gradient across M101 // *Astron. J.*—1978.—**222**, N 3.—P. 821—832.
28. *Smith H. E.* Spectrophotometric observations of ionized hydrogen regions in nearby spiral and irregular galaxies // *Astrophys. J.*—1975.—**199**, N 3.—P. 591—610.

29. *Torres-Peimbert S., Peimbert M., Fierro J.* Physical condition of H II region in M101 and the pregalactic helium abundance // *Astron. J.*—1989.—**345**, N 1.—P. 186—195.
30. *van Zee L., Salzer J. J., Haynes M. P., et al.* Spectroscopy of outlying H II regions in spiral galaxies: abundances and radial gradients // *Astron. J.*—1998.—**116**, N 6.—P. 2805—2833.
31. *Vilchez J. M., Pagel B. E. J., Diaz A. I., Terlevich E., Edmunds M. G.* The chemical composition gradient across M33 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1988.—**235**, N 2.—P. 633—653.
32. *Willner S. P., Nelson-Patel K.* Neon abundance in the H II regions of M33 // *Astrophys. J.*—2002.—**568**, N 1.—P. 679—688.
33. *Zaritsky D., Kennicutt R. C., Huchra J. P.* H II regions and the abundance properties of spiral galaxies // *Astrophys. J.*—1994.—**420**, N 1.—P. 87—109.

Поступила в редакцию 09.03.05