

УДК 524.523-36

Р. В. Шкварун, Л. С. Пилюгин

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
03680 Киев ГСП, ул. Академика Заболотного 27

### Распределение содержания кислорода в дисках восьми спиральных галактик

*На основе литературных данных о 314 спектрах областей H II восьми спиральных галактик при помощи р-метода определено содержание кислорода. Определены параметры радиального распределения содержания кислорода в дисках галактик. Распределения содержания кислорода в дисках исследованных галактик оказались азимутально-симметричными в пределах ошибок измерений. В галактике NGC 2903 обнаружена группа областей H II, где содержание кислорода значительно ниже среднего содержания для данного галактоцентрического расстояния.*

*РОЗПОДІЛ ВМІСТУ КИСНЮ В ДИСКАХ ВОСЬМИ СПІРАЛЬНИХ ГАЛАКТИК, Шкварун Р. В., Пілюгін Л. С. — На основі літературних даних про 314 спектрів областей H II восьми спіральних галактик за допомогою р-методу визначено вміст кисню. Визначено параметри радіального розподілу вмісту кисню в дисках галактик. Розподіл вмісту кисню в дисках досліджуваних галактик виявився азимутально-симетричним у межах похибок вимірювань. У галактиці NGC 2903 виявлено групу областей H II, де вміст кисню значно менший, ніж середній вміст для даної галактоцентричної відстані.*

*DISTRIBUTION OF THE OXYGEN ABUNDANCE OVER THE DISCS OF EIGHT SPIRAL GALAXIES, by Shkvarun R. V., Pilyugin L. S. — Oxygen abundances in H II regions of eight spiral galaxies are derived through the p-method using published spectrophotometric data (314 spectra of H II regions in eight spiral galaxies). The values of the radial oxygen abundance gradients were determined. The search for a global asymmetry in oxygen abundance distributions over the disks of galaxies was carried out. We do not find a significant signs of global asymmetry with one exception. In the galaxy NGC 2903, a compact area with several H II regions is revealed in which the oxygen abundance is considerably less than the average oxygen abundance for the same distance from the galaxy centre.*

#### ВВЕДЕНИЕ

Радиальный градиент содержания элементов в дисках спиральных галактик был обнаружен Сирлом (1971) [18]. Исследования радиального распределе-

ния содержания кислорода в дисках спиральных галактик показали, что распределение O/H можно хорошо представить единой экспоненциальной функцией [15, 22, 24]:

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = a + b \cdot r, \quad (1)$$

где O/H — отношение количества атомов кислорода к количеству атомов водорода на галактоцентрическом расстоянии  $r$ ;  $a$  и  $b$  — коэффициенты. Мы используем нормированные галактоцентрические расстояния  $r = R/R_{25}$ , где  $R$  — галактоцентрическое расстояние области H II в галактике,  $R_{25}$  — изофотный радиус галактики (радиус изофоты с яркостью  $25^m/\square''$  в полосе  $B$ , исправленной за поглощение и наклон диска галактики к картинной плоскости).

Исследования показывают, что в дисках всех галактик наблюдается разброс значений содержаний кислорода в областях H II с близкими галактоцентрическими расстояниями [4, 15, 22, 24]. Несомненно, разброс частично (возможно, большей частью) обусловлен ошибками определения содержаний. При определении радиального распределения содержания кислорода в дисках галактик неявно предполагается азимутальная симметрия в распределении содержания кислорода, т. е. предполагается, что области H II с близкими галактоцентрическими расстояниями имеют близкие содержания тяжелых элементов. В действительности же две области с галактоцентрическими расстояниями, скажем 10 кпк, могут быть пространственно удалены друг от друга на 20 кпк. Эволюционировать эти области галактики будут независимо, и не исключено, что они не будут иметь одинакового химического состава. Азимутальная асимметрия должна увеличивать разброс содержания кислорода в областях H II с близкими галактоцентрическими расстояниями.

Целью нашей работы было исследование азимутальной асимметрии распределения содержания кислорода в дисках спиральных галактик. Возможность такой азимутальной асимметрии была впервые отмечена Гарнеттом в его работе [4] для галактики NGC 5457.

#### ДААННЫЕ

Содержания кислорода в областях H II спиральных галактик определялись при помощи р-метода. Измеренные интенсивности линий в спектрах областей H II были взяты из работ [1, 2, 4—10, 16—22, 24]. Были рассмотрены галактики, для которых имеются наблюдательные данные для достаточно большого количества областей H II. Характеристики исследованных галактик приведены в таблице: номер галактики в каталоге NGC, абсолютная фотографическая звездная величина в полосе  $B$  ( $M_B$ ), наклон  $i$  галактики к картинной плоскости, позиционный угол  $a_p$ , измеряемый в градусах с севера на восток (всегда меньше  $180^\circ$ ), изофотный радиус  $R_{25}$  галактики, количество исследуемых областей H II, в скобках — количество областей H II, в которых отклонения содержания кислорода от типичного значения для данного галактоцентрического расстояния превышают 0.1 dex. Данные об абсолютной звездной величине, позиционном угле и фотометрическом радиусе галактик были взяты из Третьего каталога ярких галактик Вокулера (RC3) [3].

Поскольку исследуемые области H II имеют низкую электронную температуру  $T_e$ , то не представляется возможным наблюдение запрещенной линии дважды ионизированного кислорода [O III]  $\lambda$  4363, чувствительной к электронной температуре. Использование классического  $T_e$ -метода для определения содержания кислорода в нашем случае невозможно. Поэтому для

Характеристики исследованных галактик

Галактика	$M_B$	$i$ , град	$a_p$ , град	$R_{25}$	Количество областей Н II	Литературный источник
NGC 0628	-20.1	25	25	5.36	31 (7)	[2, 8, 22]
NGC 0925	-19.8	58	102	5.48	29 (9)	[22, 24]
NGC 1365	-21.3	40	32	5.61	54 (24)	[1, 10, 17]
NGC 2403	-19.1	60	127	11.45	43 (15)	[2, 5, 8, 22]
NGC 2903	-19.9	64	17	6.29	35 (6)	[2, 8, 22]
NGC 3184	-19.3	21	135	3.71	30 (1)	[8, 22, 24]
NGC 4258	-20.6	69	150	9.31	25 (4)	[2, 9, 24]
NGC 5457	-21.2	18	37	14.42	67 (16)	[4, 6—8, 16, 18—22]

определения содержания кислорода использовался р-метод. Этот метод устанавливает соотношение между содержанием кислорода и интенсивностями запрещенных линий однократно и дважды ионизированного кислорода [12, 14]:

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H})_p = \frac{R_{23} + 54.2 + 59.45P + 7.31P^2}{6.07 + 6.71P + 0.37P^2 + 0.243R_{23}}, \quad (2)$$

где

$$R_{23} = R_2 + R_3, \quad R_2 = I_{[\text{OII}]\lambda 3727 + \lambda 3729} / I_{\text{H}\beta}, \quad R_3 = I_{[\text{OIII}]\lambda 4959 + \lambda 5007} / I_{\text{H}\beta},$$

$P = R_3 / R_{23}$ ,  $I_{[\text{OII}]\lambda 3727 + \lambda 3729}$  — интенсивности запрещенных спектральных линий однократно ионизированного кислорода [O II],  $I_{[\text{OIII}]\lambda 4959 + \lambda 5007}$  — интенсивности запрещенных спектральных линий двукратно ионизированного кислорода [O III],  $I_{\text{H}\beta}$  — интенсивность спектральной линии  $\text{H}\beta$  для наблюдаемой области Н II. Если данных для линии  $\lambda 4959$  не было, то использовалось соотношение  $I_{\lambda 4959 + \lambda 5007} = 1.34 I_{\lambda 5007}$  [12, 14].

С помощью р-метода можно получить реалистичные содержания кислорода для  $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) > 8.2$  и  $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) < 8.0$ . В интервале от 8.0 до 8.2 р-метод не дает реалистичных содержаний кислорода [11, 13]. В ряде работ [15, 22, 24] установлено, что содержание кислорода уменьшается от центра галактики к периферии. В некоторых галактиках на расстоянии  $r^*$  от центра содержание кислорода уменьшается до  $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.2$ . В этих случаях области Н II с галактоцентрическими расстояниями  $r > r^*$  отбрасывались. Таким образом, изучение градиента распределения содержания кислорода в галактиках ограничивалось расстоянием  $r^*$ , где содержание кислорода в областях Н II уменьшается до  $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.2$ .

Для каждой области Н II определялись галактоцентрические координаты  $X$  и  $Y$  в единицах фотометрического радиуса галактики  $R_{25}$ . Проводилась коррекция  $X$  и  $Y$  за наклон галактики к картинной плоскости.

Для восьми спиральных галактик найдены радиальные распределения содержания кислорода, т. е. определены параметры  $a$  и  $b$  уравнения (1). Для галактик NGC 628, NGC 925, NGC 1365, NGC 2403, NGC 3184, NGC 4258 полученные распределения представлены на рис. 1, для галактики NGC 2903 — на рис. 2, для галактики NGC 5457 — на рис. 3. Точками обозначены области Н II; сплошные прямые найдены методом наименьших квадратов; штриховые линии смещены на значения  $\pm 0.1$  dex, равные погрешности определения содержания кислорода р-методом. Для каждой области Н II мы находили отклонения содержания кислорода от типичного

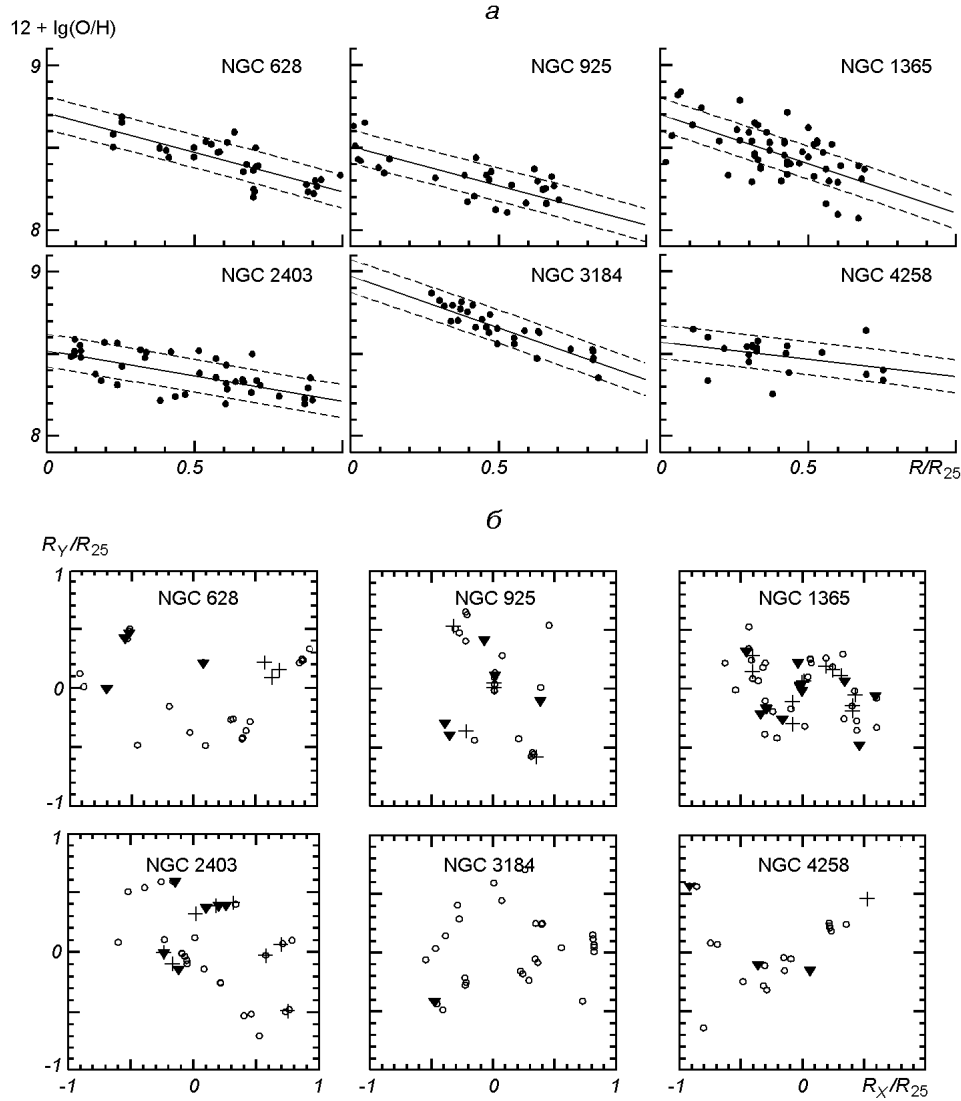


Рис. 1. Радиальные распределения содержания кислорода в шести галактиках (а: сплошные и штриховые прямые — МНК-аппроксимации и отклонения от них на  $\pm 0.1$  dex) и локализация областей Н II на плоскостях  $X-Y$  (б: кружки — области Н II, в которых  $-0.1 \text{ dex} < \Delta(O/H) < 0.1 \text{ dex}$  для данного галактоцентрического расстояния, крестики — области Н II, в которых  $\Delta(O/H) > 0.1 \text{ dex}$ , треугольники — области Н II, в которых  $\Delta(O/H) < -0.1 \text{ dex}$

для данного галактоцентрического расстояния:  $\Delta(O/H) = \lg(O/H)_{\text{obs}} - \lg(O/H)_r$ , где значение  $(O/H)_{\text{obs}}$  определено по спектральным данным, а значение  $(O/H)_r$  определено при помощи уравнения (1) для данного галактоцентрического расстояния  $r$ . Если величина  $\Delta(O/H) > 0.1 \text{ dex}$ , то Н II область будем относить к областям с повышенным содержанием кислорода, если  $\Delta(O/H) < -0.1 \text{ dex}$  — с пониженным. На рис. 1, б — рис. 3, б показаны положения Н II областей на плоскости  $X-Y$ . Кружками обозначены области Н II, в которых  $-0.1 \text{ dex} < \Delta(O/H) < 0.1 \text{ dex}$ , крестиками — области Н II с повышенными содержаниями кислорода, треугольниками — области Н II с пониженными содержаниями. На рис. 4 показана зависимость значений  $\Delta(O/H)$  от азимутального угла.

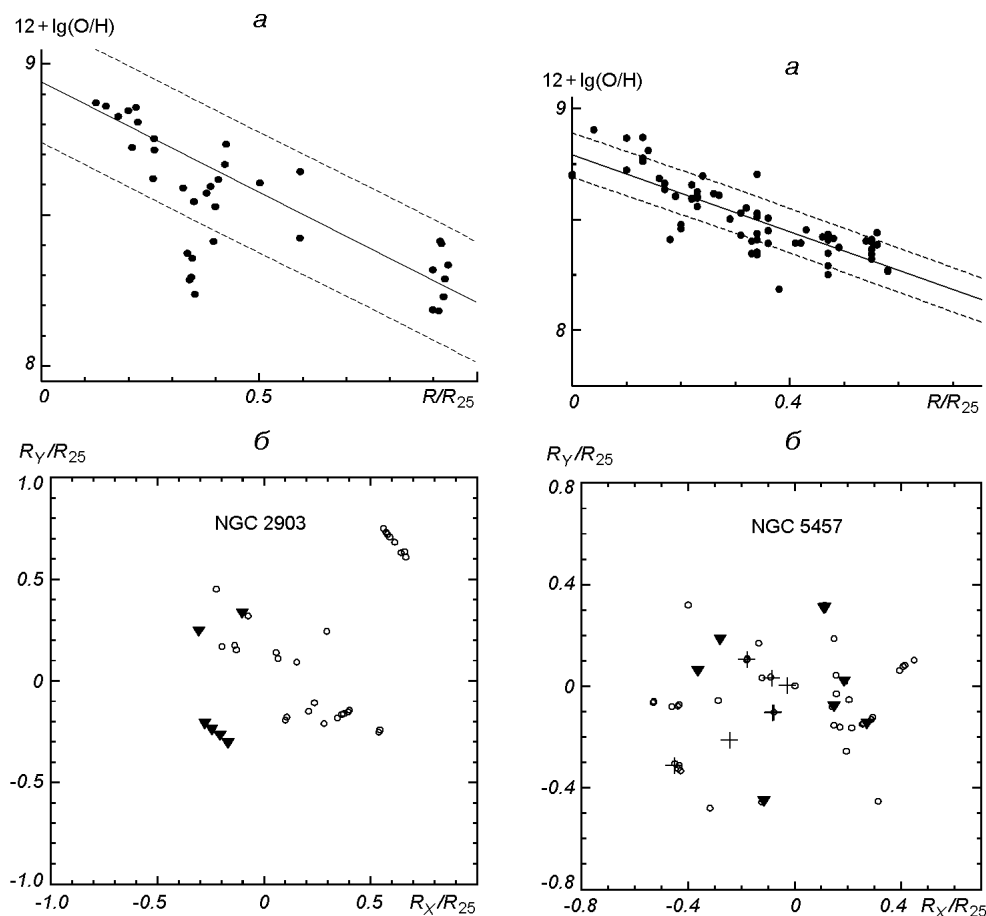


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для галактики NGC 2903

Рис. 3. То же, что на рис. 1, для галактики NGC 5457

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Галактики NGC 0628, NGC 0925, NGC 1365, NGC 2403, NGC 3184, NGC 4258. Как хорошо видно на рис. 1 и 4, в дисках галактик NGC 628, NGC 925, NGC 1365, NGC 2403, NGC 3184 и NGC 4258 не обнаружено отклонений от азимутальной симметрии распределения содержания кислорода. К сожалению, в галактике NGC 925 содержание кислорода уменьшилось до  $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.2$  на галактоцентрическом расстоянии  $0.6R_{25}$ , поэтому внешняя часть галактики ( $r > 0.6R_{25}$ ) не исследовалась на наличие азимутальной асимметрии.

Следует отметить, что дисперсия содержаний кислорода в областях H II с близкими галактоцентрическими расстояниями в галактике NGC 1365 выше, чем в других галактиках (рис. 1 и 4), так как для этой галактики интенсивности эмиссионных линий в областях H II определялись путем фотографирования галактики в определенном фильтре [17]. Таким способом удалось получить интенсивности линий большого количества областей H II одновременно. Точность таких одновременных измерений ниже точности спектральных наблюдений каждой области H II отдельно, что и стало причиной большего разброса содержаний кислорода.

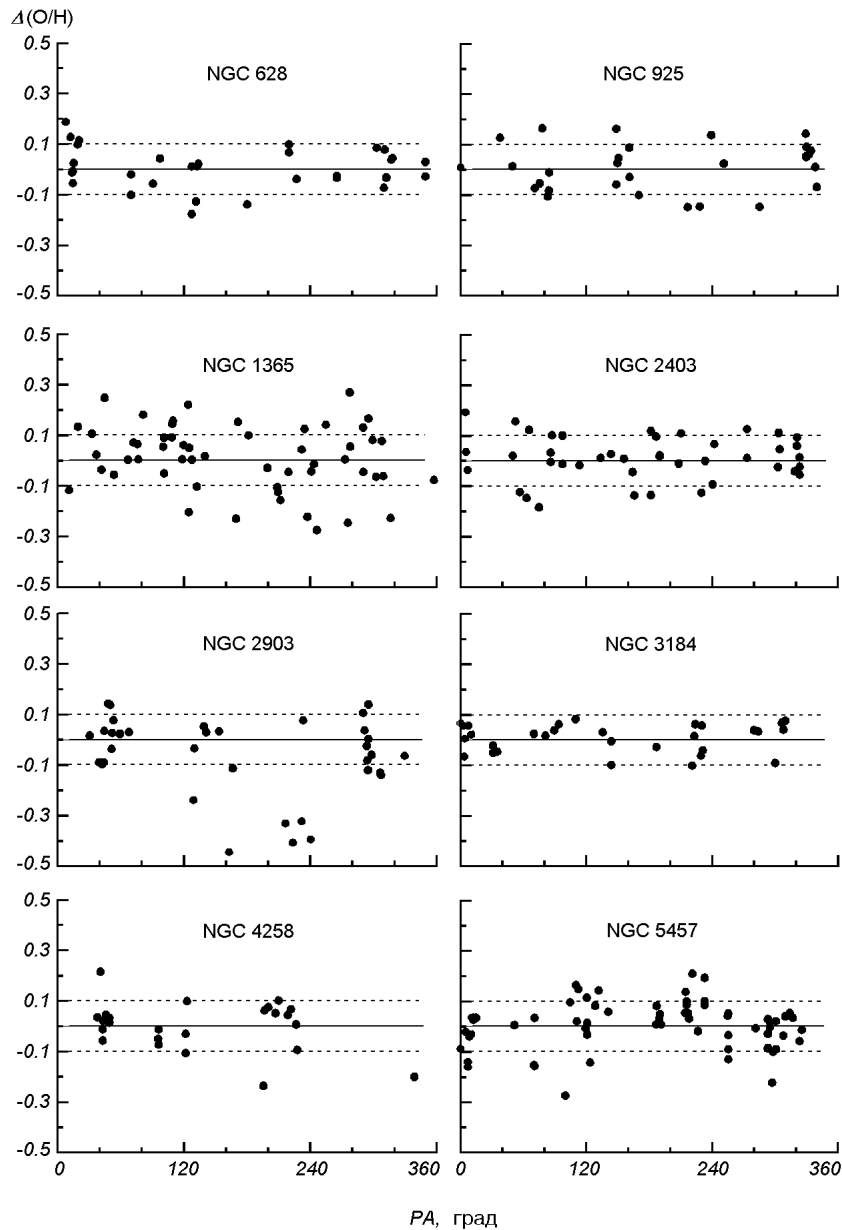


Рис. 4. Значения  $\Delta(O/H)$  для областей H II в зависимости от азимутального угла

**Галактика NGC 2903.** Для данной галактики имеется достаточное количество наблюдательных данных. Характеристики галактики NGC 2903 приведены в таблице. Как видно на рис. 2 и 4, в галактике NGC 2903 обнаружена группа областей H II, в которых содержание кислорода значительно отличается от среднего для данного галактоцентрического расстояния. Важно отметить, что эта группа областей H II занимает небольшую площадь в галактике. Причина пониженного содержания кислорода в этой группе областей H II неизвестна. Можно предложить несколько объяснений этого феномена. Например, локальный приток газа с пониженным содержанием кислорода (и других тяжелых элементов) из внегалактической среды (и/или захват галактикой маломассивной карликовой галактики), что

может привести к образованию в галактике области с пониженным содержанием тяжелых элементов. Во-вторых, эта группа областей H II может быть расположена не в самой галактике NGC 2903, а находится в близкой к NGC 2903 карликовой галактике, проектируясь на галактику NGC 2903. В этом случае в областях H II содержание элементов будет иным, чем в галактике NGC 2903. Не исключено, что отклонение содержания кислорода в этих областях H II обусловлено ошибками определения содержания кислорода. Например, некорректным учетом экстинкции. Выбор между данными возможностями может быть сделан на основе дополнительных наблюдений.

**Галактика NGC 5457.** В случае данной галактики распределение содержания кислорода в областях H II уменьшается до  $12 + \lg(O/H) = 8.2$  на галактоцентрическом расстоянии  $r = 0.6R_{25}$ , поэтому области H II с галактоцентрическими расстояниями большими  $0.6 R_{25}$  не использовались для поиска азимутальной асимметрии в галактике NGC 5457. На рис. 3 и 4 видно, что области с повышенным содержанием кислорода лежат в секторе позиционных углов от  $110^\circ$  до  $240^\circ$ . Это можно рассматривать как указание на азимутальную асимметрию. Однако надежные выводы об азимутальной асимметрии в галактике NGC 5457 могут быть сделаны только после получения более точных наблюдательных данных.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, используя р-метод, мы определили содержание кислорода в областях H II восьми спиральных галактик и определили параметры радиального распределения содержания кислорода для каждой галактики. Полученные результаты показывают, что распределения содержания кислорода в исследованных галактиках обладают азимутальной симметрией, по крайней мере в первом приближении. В галактике NGC 2903 обнаружена компактная группа областей H II, в которых содержание кислорода ниже среднего значения для данного галактоцентрического расстояния на 0.3—0.4 dex. В галактике NGC 5457 области H II с повышенным содержанием кислорода концентрируются в секторе с углом раствора около  $130^\circ$ , что может свидетельствовать об отклонении распределения содержания кислорода от азимутальной симметрии. Однако надежные выводы об азимутальной асимметрии в данной галактике могут быть сделаны только на основе более точных наблюдательных данных.

Работа была частично финансирована Украинским фондом фундаментальных исследований (грант 02.07/00132).

1. Alloin D., Edmunds M. G., Lindblad P. O., Pagel B. E. J. The metal abundance gradient of NGC 1365 // *Astron. and Astrophys.*—1981.—101, N 1.—P. 377—384.
2. 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.
3. de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A., Corvin H. G., et al. Third Reference Catalog of bright Galaxies. — New York: Sprider, 1991.
4. Garnett D. R., Kennicutt R. C. A very metal poor H II region in the outer disk of M101 // *Astrophys. J.*—1994.—426, N 1.—P. 123—130.
5. Garnett D. R., Shields G. A., Skillman D. E., et al. Interstellar abundance gradients in NGC 2403: comparison to M33 // *Astron. J.*—1997.—489, N 1.—P. 63—86.
6. Kennicutt R.C., Garnett D. R. The composition gradient in M101 revisited. I. H II region spectra and excitation properties // *Astrophys. J.*—1996.—456, N 2.—P. 504—518.
7. Kinkel U., Rosa M. R. How metal-rich are metal-rich H II region // *Astron. and Astrophys.*—1994.—282, N 3.—P. L37—L40.
8. Call 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.

9. *Oey M. S., Kennicutt R. C.* Abundances of H II regions in early-type spiral galaxies // *Astrophys. J.*—1993.—**411**, N 1.—P. 137—152.
10. *Pagel B. E. J., Edmunds M. G., Blackwell D. E., et al.* On the composition of H II regions in southern galaxies. I. NGC 300 and NGC 1365 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1979.—**189**, N 1.—P. 95—113.
11. *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.
12. *Pilyugin L. S.* Oxygen abundances in dwarf irregular galaxies and the metallicity — luminosity relationship // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**374**, N 2.—P. 412—420.
13. *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.
14. *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.
15. *Pilyugin L. S., Vilchez J. M., Contini T.* Oxygen and nitrogen abundances in spiral galaxies. I. Radial distributions // *Astron. and Astrophys.*—2003.
16. *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.
17. *Roy J. R., Walsh J. R.* The abundance gradient of NGC 1365: evidence for a recently formed bar in an archetype barred spiral galaxy // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1997.—**288**, N 3.—P. 715—728.
18. *Searle L.* Evidence for composition gradients across the disks of spiral galaxies // *Astrophys. J.*—1971.—**168**, N 3.—P. 327—341.
19. *Shields G. A., Searle L.* The composition gradient across M101 // *Astron. J.*—1978.—**222**, N 3.—P. 821—832.
20. *Smith H. E.* Spectrophotometric observations of ionized hydrogen regions in nearby spiral and irregular galaxies // *Astrophys. J.*—1975.—**199**, N 3.—P. 591—610.
21. *Torres-Peibert 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.
22. *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.
23. *Vila-Costas M. B., Edmunds M. G.* The relation between abundance gradients and the physical properties of spiral galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1992.—**259**, N 1.—P. 121—145.
24. *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 24.09.03