

УДК 524.523-36

Л. С. Пилюгин¹, Ф. Феррини^{2, 3}, Р. В. Шкварун⁴

¹ Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины,
03680 Киев ГСП, ул. Академика Заболотного 27

² Отделение астрономии Пизанского университета,
56100, пл. Торричелли 2, Пиза, Италия

³ INTAS, Аллея Искусств 58, 1000 Брюссель, Бельгия

⁴ Киевский Национальный университет имени Тараса Шевченко,
03022 Киев, пр. Глушкова 6

О содержании кислорода в областях H II Галактики

Определено содержание кислорода в областях H II Галактики при помощи классического T_e -метода в рамках двухзонной модели области H II, на основе собранных из литературных источников спектральных данных (69 спектров для 11 областей H II с галактоцентрическими расстояниями от 6.6 до 14.8 кпк). Полученное радиальное распределение содержания кислорода сравнивается с радиальным распределением из работы Shaver et al. (1983), которое широко используется при построении моделей химической эволюции Галактики. Показано, что содержания кислорода из работы Shaver et al. (1983) завышены на 0.2—0.3 dex.

ПРО ВМІСТ КИСНЮ В ОБЛАСТЯХ H II ГАЛАКТИКИ, Пілюгін Л. С., Ферріні Ф., Шкварун Р. В. — Визначено вміст кисню в областях H II Галактики за допомогою класичного T_e -методу в рамках двохзонної моделі областей H II на основі зібраних з літературних джерел спектральних даних (69 спектрів для 11 областей H II з галактоцентричними відстанями від 6.6 до 14.8 кпк). Отриманий радіальний розподіл вмісту кисню порівнюється з радіальним розподілом з роботи Shaver et al. (1983), який широко використовується при побудові моделей хімічної еволюції Галактики. Показано, що вміст кисню з роботи Shaver et al. (1983) завищений на 0.2—0.3 dex.

ON THE OXYGEN ABUNDANCES IN H II REGIONS OF THE GALAXY, by Pilyugin L. S., Ferrini F., Shkvarun R. V. — Oxygen abundances in H II regions of the Galaxy were derived with the classical T_e -method within the framework of the two-zone H II region model using published spectrophotometric data (69 spectra of 11 H II regions in the range of galactocentric distances from 6.6 to 14.8 kpc). The derived radial distribution of the oxygen abundance was compared with that from Shaver et al. (1983), which is widely used in constructing the model of the chemical evolution of the Galaxy. It was found that the oxygen abundances given by Shaver et al. are overestimated by 0.2—0.3 dex.

ВВЕДЕНИЕ

Надежные определения химического состава газа в галактиках важны для построения теории формирования и эволюции галактик. Кислород играет ключевую роль в исследованиях химической эволюции галактик. Значение содержания кислорода в системе несет важную информацию о характере эволюции системы. Происхождение кислорода установлено, по-видимому, весьма надежно: массивные звезды синтезируют и поставляют в межзвездную среду подавляющую долю кислорода; вклад маломассивных звезд и звезд промежуточной массы в производство кислорода пренебрежимо мал. Так как синтезируемый массивными звездами кислород выбрасывается в межзвездную среду за короткий интервал времени по сравнению со временем эволюции галактик, то приближение мгновенного кругооборота вещества применимо (как первое приближение) для описания эволюционного изменения содержания кислорода в системе. Поэтому содержание кислорода зависит только от доли массы газа в системе и практически не зависит от истории звездообразования [1]. Отклонение измеренного содержания кислорода от «стандартного» содержания для данного значения доли массы газа является надежным свидетельством того, что эволюция галактики сопровождалась обменом газом между галактикой и межгалактической средой (галактический ветер, приток газа в галактику) [47, 48].

Самым надежным методом определения содержаний кислорода в областях Н II является классический T_e -метод. Однако T_e -метод применим только в том случае, когда измерены чувствительные к температуре отношения интенсивностей линий, такие как $[O III]\lambda\lambda 4959, 5007/[O III]\lambda 4363$. В спектрах областей Н II спиральных галактик линия $[O III]\lambda 4363$ слишком слабая и, как правило, не обнаруживается (из-за низкой электронной температуры в областях Н II с высоким содержанием кислорода). Поэтому содержания кислорода в большинстве областей Н II не могут быть определены при помощи T_e -метода, что послужило причиной разработки альтернативных методов определения содержания кислорода в областях Н II: R_{23} -метод [15, 16, 29], P -метод [42, 43].

Использование разных методов определения содержания кислорода в областях Н II приводит к тому, что многие оценки содержания кислорода не согласуются между собой. Очевидно, что использование значений содержания кислорода, полученных разными методами, имеет смысл только тогда, когда они согласуются. Для Галактики получено радиальное распределение содержания кислорода и других элементов [52]. Электронная температура оценивалась по рекомбинационным радиолиниям. Возникает вопрос — согласуются ли полученные в работе [52] содержания кислорода с другими оценками? Цель нашей работы — определить содержания кислорода в галактических областях Н II разными методами и проверить степень согласия между ними.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА В ОБЛАСТЯХ Н II

T_e -метод. Теория свечения газовых туманностей принадлежит к числу наиболее разработанных разделов астрофизики. Решена и обратная задача — применение теории свечения для определения физических характеристик индивидуальных газовых туманностей. Строгий метод определения электронной температуры, электронной плотности и химического состава газовых туманностей по отношению интенсивностей запрещенных эмиссионных линий в их спектрах был предложен несколько десятков лет назад и детально описан [2, 3 и др.]. Этот метод определения химического состава

областей Н II мы будем называть T_e -методом.

Однозначность строгого и логически безупречного T_e -метода теряется при практической реализации в работах разных авторов по двум причинам. Во-первых, по мере появления все более точных квантовомеханических расчетов и накопления экспериментальных данных происходит уточнение атомных констант: вероятностей переходов и параметров столкновений. Поэтому в работах, выполненных в разные годы, могут использоваться разные значения атомных констант. Во-вторых, используются разные модели для описания распределения температуры в области Н II: модель с единым значением температуры, двухзонная модель, модель с мелкомасштабными температурными флуктуациями.

Поэтому значения содержания кислорода в областях Н II Галактики, найденные при помощи T_e -метода на протяжении свыше 30 лет, нельзя рассматривать как однородный массив данных. Для того чтобы получить однородный массив, мы переопределили содержания кислорода в Н II в рамках двухзонной модели по измеренным отношениям интенсивностей линий [O III] $\lambda\lambda$ 4959, 5007 / λ 4363. Соответствующие соотношения взяты из работы [35]:

$$\frac{O}{H} = \frac{O^+}{H^+} + \frac{O^{++}}{H^+}, \quad (1)$$

$$12 + \lg(O^{++}/H^+) = \lg \frac{I_{[OIII] \lambda 4959 + \lambda 5007}}{I_{H\beta}} + 6.174 + \frac{1.251}{t_3} - 0.55 \lg t_3, \quad (2)$$

$$12 + \lg(O^+/H^+) = \lg \frac{I_{[OII] \lambda 3726 + \lambda 3729}}{I_{H\beta}} + 5.890 + \frac{1.676}{t_2} - 0.40 \lg t_2 + \lg(1 + 1.35x), \quad (3)$$

$$t_3 = 1.432 \left[\lg \frac{I_{[OIII] \lambda 4959 + \lambda 5007}}{I_{[OIII] \lambda 4363}} - 0.85 + 0.03 \lg t_3 + \lg(1 + 0.0433x t_3^{0.06}) \right]^{-1}, \quad (4)$$

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

где n_e , см^{-3} — электронная концентрация, t_2 и t_3 — электронная температура в зоне свечения [O II] и [O III] в единицах 10^4 К. Соотношение между электронными температурами взято из работы [20]:

$$t_2 = 0.7 t_3 + 0.3. \quad (6)$$

Содержание кислорода, определенное при помощи уравнений (1)—(6), будем обозначать $(O/H)_{Te}$.

Иногда электронную температуру в областях Н II определяют не по запрещенным линиям. Авторы работы [52] использовали для этого комбинационные радиолнии водорода. Они полагают, что точность полученных значений не хуже 5 %, и что найденная таким способом электронная температура соответствует зоне свечения [O III]. Однако найденные в [52] значения содержания кислорода систематически выше значений, найденных с электронными температурами, определенными по запрещенным линиям [O III] (см. ниже).

R₂₃-метод. При помощи классического T_e -метода надежные значения содержания кислорода могут быть определены только в тех областях Н II, где надежно измерены отношения интенсивностей линий [O III] $\lambda\lambda$ 4959, 5007 / [O III] λ 4363. В спектрах областей Н II спиральных галактик линия [O III] λ 4363 слишком слабая и, как правило, не обнаруживается (из-за низкой электронной температуры в областях Н II с высоким содержанием

кислорода). Поэтому содержание кислорода в большинстве областей Н II не может быть определено при помощи T_e -метода. В то же время интенсивности сильных эмиссионных линий кислорода [O II] $\lambda\lambda$ 3726, 3729 и [O III] $\lambda\lambda$ 4959, 5007 могут быть измерены достаточно точно в спектрах областей Н II в нашей и других галактиках.

В работе [34] предложен метод определения содержания кислорода в областях Н II только по интенсивности сильных кислородных линий. В качестве индикатора содержания кислорода в области Н II используется величина $R_{23} = (I_{[\text{OII}] \lambda 3727, \lambda 3729} + I_{[\text{OIII}] \lambda 4959, \lambda 5007})/I_{\text{H}\beta}$. Это предложение получило широкое признание и применение.

Опираясь на данные об областях Н II, в которых содержание кислорода определено при помощи T_e -метода, и на модели областей Н II, в ряде работ было получено соотношение между содержанием кислорода и величиной R_{23} [15, 16, 29]. Соотношение между содержанием кислорода и величиной R_{23} обычно называют R_{23} -калибровкой, метод определения содержания кислорода в областях Н II при помощи соотношения между содержанием кислорода и величиной R_{23} называют R_{23} -методом. Чаще других используется калибровка, предложенная Эдмундсом и Пейджелом [16]. Эта калибровка показана на рис. 1 сплошной линией. Мы аппроксимировали калибровку [16] для содержаний кислорода $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) > 8.2$ полиномом

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{R_{23}} = 9.302 - 0.403x - 0.675x^2 - 0.701x^3 + 0.666x^4, \quad (7)$$

где $x = \lg R_{23}$. Определенные при помощи R_{23} -метода (7) содержания кислорода в областях Н II мы будем обозначать как $(\text{O}/\text{H})_{R_{23}}$.

Следует отметить, что наряду с R_{23} -методом предложены и другие методы, в которых постулируется соответствие между содержанием кислорода в области Н II и некоторой комбинацией интенсивностей сильных линий в ее спектре.

В качестве индикатора содержания кислорода в областях Н II предложено использовать величины $[\text{O III}]/[\text{N II}] = I_{[\text{OIII}] \lambda 4959, \lambda 5007}/I_{[\text{NII}] \lambda 6548, \lambda 6584}$ [4] и $S_{23} = (I_{[\text{SII}] \lambda 6717, \lambda 6731} + I_{[\text{SIII}] \lambda 9069, \lambda 9532})/I_{\text{H}\beta}$ [14].

Интенсивности сильных эмиссионных линий кислорода известны для нескольких сотен областей Н II в неправильных и спиральных галактиках [8, 9, 13, 27—29, 32, 59, 60]. Содержание кислорода в большом количестве областей Н II в спиральных галактиках определены при помощи R_{23} -метода [57, 59]. Однако сам факт наличия разных R_{23} -калибровок [15, 16, 29, 59]

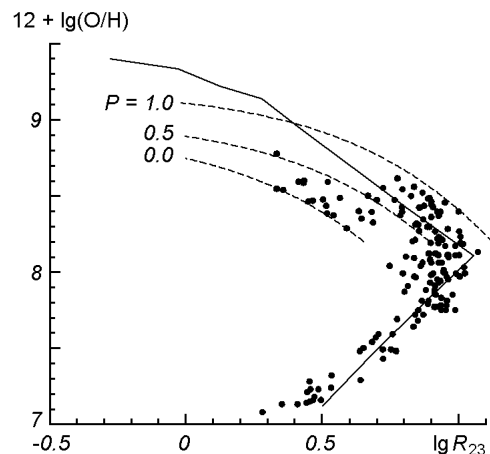


Рис. 1. Диаграмма $R_{23} - \text{O}/\text{H}$: точки — положения областей Н II, в которых содержания кислорода определены при помощи T_e -метода; сплошная линия — R_{23} калибровка [16]; штриховые линии — соотношения (8) в рамках P -метода для трех значений P

порождает вопрос — согласуются ли содержания кислорода, полученные при помощи R_{23} -метода и строгого T_e -метода? Ответ может быть получен путем непосредственного сравнения, так как к настоящему времени интенсивность линии [O III] λ 4363 измерена в спектрах нескольких десятков областей Н II с высоким содержанием кислорода ($12 + \lg(O/H) > 8.2$). Важно отметить, что одни и те же измерения интенсивностей линий [O II] λ 3726, 3729 и [O III] λ 4959, 5007 используются в T_e - и R_{23} -методе, что обеспечивает корректность сравнения.

Литературные данные для областей Н II, в спектрах которых измерены чувствительные к температуре отношения интенсивностей линий, собраны и проанализированы в наших недавних работах [42—44]. Используя уравнения (1)—(6), мы получили однородный (с точки зрения методики определения содержания кислорода) массив значений $(O/H)_{T_e}$. Положения областей Н II на диаграмме $O/H - R_{23}$ показаны точками на рис. 1. Видно, что однозначного соответствия между содержанием кислорода и величиной R_{23} нет. Более того, разность $\Delta(O/H) = (O/H)_{R_{23}} - (O/H)_{T_e}$ зависит от параметра возбуждения области Н II [42, 43], т. е. ошибки R_{23} -метода не являются случайными, а носят систематический характер. Природа систематической ошибки R_{23} -метода очевидна. В общем случае интенсивности кислородных линий в спектре области Н II зависят от обилия кислорода и физических условий в туманности. В T_e -методе различия физических условий в разных туманностях с одинаковыми значениями R_{23} учитываются при помощи электронной температуры, а в R_{23} -методе они игнорируются.

Таким образом, предположение об однозначном соответствии между содержанием кислорода и величиной R_{23} , положенное в основу R_{23} -метода, не подтверждается данными об областях Н II, в которых содержание кислорода определено при помощи T_e -метода. Ошибки значений содержания кислорода, полученных при помощи R_{23} -метода, носят систематический характер.

P-метод. Нами было показано [42, 43], что различия физических условий в разных туманностях с одинаковыми значениями R_{23} могут быть учтены при помощи параметра возбуждения P . Используя базовую выборку областей Н II, содержание кислорода в которых надежно определено при помощи T_e -метода, мы получили соотношение между содержанием кислорода в области Н II и интенсивностями сильных кислородных линий в ее спектре:

$$12 + \lg(O/H)_P = \frac{R_{23} + 54.2 + 59.45P + 7.31P^2}{6.07 + 6.71P + 0.37P^2 + 0.243R_{23}}, \quad (8)$$

где $R_{23} = R_2 + R_3$, $R_2 = I_{[\text{O II}] \lambda 3726 + \lambda 3729} / I_{\text{H}\beta}$, $R_3 = I_{[\text{O III}] \lambda 4959 + \lambda 5007} / I_{\text{H}\beta}$, $P = R_3 / R_{23}$. Принципиальное различие между традиционным R_{23} -методом и предложенным P -методом заключается в том, что в P -методе нет предположения об однозначном соответствии между содержанием кислорода и величиной R_{23} . Наоборот, каждому значению параметра возбуждения P соответствует свое соотношение между содержанием кислорода и величиной R_{23} . Соотношения между содержанием кислорода и величиной R_{23} для трех значений параметра возбуждения P показаны на рис. 1 штриховыми линиями.

Следует подчеркнуть, что в рамках P -метода используется интегральный параметр возбуждения P , определенный для области Н II в целом. Поэтому для корректного применения P -метода необходимо, чтобы либо спектр был получен для всей области Н II, либо чтобы отношение

интенсивностей линий [O II] и [O III] в спектре соответствовало этому отношению для всей туманности. Это условие обычно выполняется для внегалактических областей Н II. В случае галактических областей Н II, которые имеют большие угловые размеры, спектры часто получают только для малой части области Н II. Из-за стратификации излучения в областях Н II отношение интенсивностей линий [O II] и [O III] в спектре малой центральной или малой периферийной части области Н II может существенно отличаться от этого отношения в интегральном спектре. В этом случае содержание кислорода, определенное при помощи P -метода, будет содержать большую ошибку.

Утверждение о том, что различия физических условий в разных туманностях с одинаковыми значениями R_{23} могут быть установлены и корректно учтены при помощи параметра возбуждения P , легко проверяется. Для базовой выборки областей Н II было получено соотношение между электронной температурой в зоне свечения [O III] и интенсивностями сильных кислородных линий [43]:

$$t_P = \frac{R_{23} + 3.09 + 7.05P + 2.87P^2}{9.90 + 11.86P + 7.05P^2 - 0.583R_{23}} \quad (9)$$

Значения электронной температуры, найденные из выражения (9), хорошо согласуются со значениями электронной температуры, найденными из выражения (4), т. е. физические условия (электронная температура) в области Н II устанавливаются достаточно надежно и корректно учитываются при помощи параметра возбуждения P . Тем самым получило подтверждение предположение МакГоха [30] о том, что сильные кислородные линии содержат достаточную информацию для определения содержания кислорода в областях Н II. Точность определения содержания кислорода при помощи P -метода для базовой выборки областей Н II сравнима с точностью T_e -метода. Определенные при помощи P -метода (8) содержания кислорода в областях Н II мы будем обозначать как $(O/N)_P$.

Основным достоинством P -метода является использование только сильных кислородных линий, которые могут быть надежно измерены в областях Н II многих галактик. При этом P -метод обеспечивает точность определения содержания кислорода, сравнимую с точностью классического T_e -метода. Недостатком P -метода является то, что необходимо предварительно установить принадлежность области Н II к верхней или нижней ветви диаграммы $R_{23} - O/N$.

СОДЕРЖАНИЕ КИСЛОРОДА В ГАЛАКТИЧЕСКИХ ОБЛАСТЯХ Н II

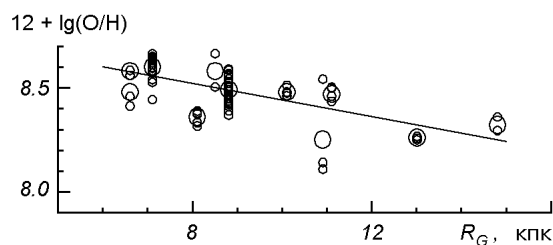
Области Н II с измеренной линией [O III] λ 4363. Измеренные интенсивности линий [O II] $\lambda\lambda$ 3726, 3729, [O III] $\lambda\lambda$ 4959, 5007, 4363 в спектрах 11 галактических областей Н II приведены в работах [6, 7, 9, 13, 17—19, 33, 36—40, 52] (список областей Н II приведен в табл. 1). В большинстве цитированных работ были определены содержания кислорода $(O/N)_{T_e}$. Как отмечалось выше, полученные в этих работах значения $(O/N)_{T_e}$ нельзя рассматривать как однородный массив данных.

Используя уравнения (1)—(6), мы получили однородный массив содержаний кислорода $(O/N)_{T_e}$. Для ряда областей Н II измерены интенсивности линии [O III] λ 5007, но нет данных об интенсивности линии [O III] λ 4959. В этих случаях суммарная интенсивность линий [O III] вычислялась как $I_{[OIII] \lambda 4959 + \lambda 5007} = 1.34I_{[OIII] \lambda 5007}$. Значения электронной концентрации взяты

Таблица 1. Содержания кислорода (средние значения $\langle(O/H)_{Te}\rangle$) в галактических областях Н II с измеренной интенсивностью диагностической линии [OII] λ 4363

Область Н II	Расстояние от центра Галактики, кпк	Количество измерений	Литературный источник	$\lg(O/H)_{Te} + 12$
M8	6.6	3	[18, 36, 38]	8.48 ± 0.06
M16=Sh49	6.6	1	[9, 13]	8.58
M17	7.1	18	[19, 36, 40]	8.60 ± 0.05
Carina	8.1	5	[39]	8.36 ± 0.03
Sh117	8.5	2	[9, 13]	8.58 ± 0.08
Orion	8.8	24	[6, 7, 9, 13, 17, 33, 36, 37]	8.49 ± 0.06
Sh184	10.1	4	[9, 13]	8.48 ± 0.02
Sh311	10.9	3	[38, 52]	8.26 ± 0.20
Sh206	11.1	4	[9, 13]	8.47 ± 0.03
Sh298	13.0	3	[38, 52]	8.26 ± 0.01
Sh212	14.8	2	[9, 13]	8.32 ± 0.04

Рис. 2. Содержание кислорода в галактических областях Н II в зависимости от галактоцентрического расстояния R_G . Маленькие кружки — содержания кислорода для индивидуальных измерений $(O/H)_{Te}$, сплошная линия — аппроксимация (11), большие кружки — средние значения



из тех же источников, что и интенсивности линий. Если электронная концентрация не определена, то она принималась равной 100 cm^{-3} . Найденные содержания кислорода $(O/H)_{Te}$ в галактических областях Н II для индивидуальных измерений представлены на рис. 2 маленькими кружками.

Систематическое уменьшение содержания кислорода от центра диска спиральных галактик к периферии было обнаружено около 30 лет назад [51, 53]. Этот градиент хорошо описывается экспоненциальной функцией [25, 59, 60] (в логарифмической шкале — линейной):

$$12 + \lg(O/H) = a + bR_G, \quad (10)$$

где a — содержание кислорода в центре диска, b — величина градиента. Используя метод наименьших квадратов, мы определили коэффициенты a и b для радиального распределения $(O/H)_{Te}$ в диске Галактики для областей Н II из нашей выборки:

$$12 + \lg(O/H)_{Te} = 8.84 - 0.04R_G. \quad (11)$$

Зависимость (11) показана на рис. 2 сплошной линией.

Были вычислены среднее арифметическое значение $\langle \lg(O/H)_{Te} \rangle$ содержаний кислорода и их дисперсия σ_{Te}^2 для каждой области Н II. Найденные значения $\langle \lg(O/H)_{Te} \rangle$ и σ_{Te} приведены в табл. 1. Средние значения содержания кислорода представлены на рис. 2 большими кружками.

Области Н II из работы [52]. Содержание кислорода в галактических областях Н II определялось в работе [52]. Эти значения мы будем обозначать $(O/H)_{SH}$. Для оценки электронной температуры использовались рекомбинационные радиолнии водорода. Найденное в этой работе радиальное распределение содержания кислорода и других элементов неоднократно использовалось при построении моделей химической эволюции Галактики [21, 55, 56]. Согласуются ли содержания кислорода $(O/H)_{SH}$ с содержания-

ми кислорода $(O/H)_{Te}$, найденными при помощи T_e -метода? Так как в большинстве спектров, использованных в работе [52], линия $[O III] \lambda 4363$ не измерена, то степень согласия между $(O/H)_{SH}$ и $(O/H)_{Te}$ может быть выявлена двумя косвенными способами. Во-первых, если содержания кислорода $(O/H)_{SH}$ находятся в согласии с содержаниями $(O/H)_{Te}$, то параметры радиального распределения $(O/H)_{SH}$ должны быть близки к соответствующим параметрам радиального распределения $(O/H)_{Te}$. С другой стороны, в работах [43, 44] показано, что значения $(O/H)_P$ хорошо согласуются со значениями $(O/H)_{Te}$. Поэтому сравнение $(O/H)_{SH}$ и $(O/H)_P$ для индивидуальных Н II областей может служить тестом согласия содержаний $(O/H)_{SH}$ и $(O/H)_{Te}$.

Содержания кислорода в галактических областях Н II, найденные в работе [52], показаны на рис. 3 светлыми квадратиками. Галактоцентрические расстояния взяты из [13]. Данные [52] аппроксимируются соотношением

$$12 + \lg(O/H)_{SH} = 9.27 - 0.06R_G. \quad (12)$$

Полученная нами зависимость $(O/H)_{SH} - R_G$ несколько отличается от зависимости, приведенной в работе [52], по двум причинам. Во-первых, принятые в работе [52] расстояния отличаются от использованных нами. Во-вторых, мы рассматривали только области Н II, в спектрах которых надежно измерены линии $I_{[OII]\lambda 3727 + \lambda 3729}$ и $I_{[OIII]\lambda 4959 + \lambda 5007}$. Полученная нами зависимость $(O/H)_{SH} - R_G$ показана на рис. 3 штриховой линией. Сплошной линией представлено соотношение (11). Видно, что значения $(O/H)_{SH}$ систематически на 0.2—0.3 dex выше, чем характерные содержания кислорода $(O/H)_{Te}$.

Содержания кислорода в областях Н II из работы [52] были переопределены нами при помощи P -метода с использованием интенсивностей линий из [52].

Содержания кислорода, найденные в работе [52], и содержания кислорода, найденными нами при помощи P -метода, приведены в табл. 2. Рассматривались только области Н II, в спектрах которых надежно измерены линии $I_{[OII]\lambda 3727 + \lambda 3729}$ и $I_{[OIII]\lambda 4959 + \lambda 5007}$.

Содержания кислорода для областей Н II из работы [52], найденные нами при помощи P -метода с использованием интенсивностей сильных кислородных линий из работы [52], показаны на рис. 3 зачерненными ромбиками. Зависимость $(O/H)_P$ от R_G аппроксимируется выражением

$$12 + \lg(O/H)_P = 8.95 - 0.05R_G. \quad (13)$$

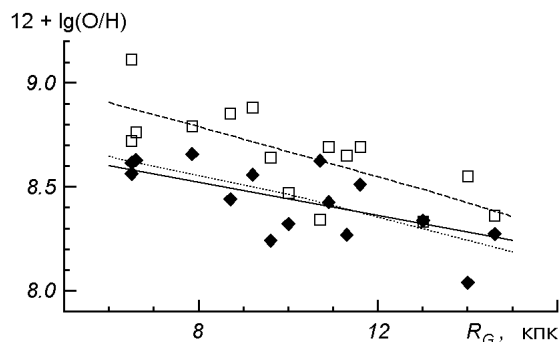


Рис. 3. Содержание кислорода в галактических областях Н II в зависимости от галактоцентрического расстояния R_G . Светлые квадратики и штриховая линия — содержания $(O/H)_{SH}$ [52] и их аппроксимация (12); темные ромбики и пунктирная линия — содержания $(O/H)_P$, найденные при помощи P -метода с использованием спектральных данных [52]; сплошная линия — зависимость $(O/H)_{Te} - R_G$ (11). Галактоцентрические расстояния взяты из работы [13]

Таблица 2. Содержание кислорода в галактических областях Н II из работы [52]

Область Н II	Расстояние от центра Галактики, кпк	$\lg(\text{O}/\text{H})_{\text{SH}} + 12$ [52]	$\lg(\text{O}/\text{H})_{\text{P}} + 12$ данная работа
NGC6604-1	6.5	9.11	8.61
NGC6604-2	6.5	8.72	8.56
M16	6.6	8.76	8.63
1 Cen-2	7.8	8.79	8.66
RCW40	8.7	8.85	8.44
RCW34	9.2	8.88	8.56
RCW19	9.6	8.64	8.24
Rosette-1	10.0	8.47	8.32
S252-1	10.7	8.34	8.62
RCW16-1	10.9	8.69	8.42
RCW8	11.3	8.65	8.27
RCW6	11.6	8.69	8.51
RCW5-1=S298	13.0	8.33	8.34
G201.6+1.6	14.0	8.55	8.04
S284	14.6	8.36	8.27

Зависимость $(\text{O}/\text{H})_{\text{P}} - R_{\text{G}}$ показана на рис. 3 пунктирной линией. Зависимости $(\text{O}/\text{H})_{\text{P}} - R_{\text{G}}$ и $(\text{O}/\text{H})_{\text{Te}} - R_{\text{G}}$ хорошо согласуются между собой. Таким образом, сравнение радиальных распределений $(\text{O}/\text{H})_{\text{Te}}$ и $(\text{O}/\text{H})_{\text{P}}$ в диске нашей Галактики подтверждает сделанное в работах [42—44] заключение о том, что значения $(\text{O}/\text{H})_{\text{P}}$ хорошо согласуются со значениями $(\text{O}/\text{H})_{\text{Te}}$. С другой стороны, данные табл. 2 и рис. 3 показывают, что значения $(\text{O}/\text{H})_{\text{SH}}$ из работы [52] систематически выше (на 0.2—0.3 dex), чем значения $(\text{O}/\text{H})_{\text{P}}$ для тех же Н II областей. Этот факт ставит под сомнение реалистичность моделей химической эволюции нашей Галактики, которые базируются на данных [52].

ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно полученным выше соотношениям $(\text{O}/\text{H})_{\text{P}} - R_{\text{G}}$ и $(\text{O}/\text{H})_{\text{Te}} - R_{\text{G}}$ содержание кислорода на галактоцентрическом расстоянии Солнца (8.5 кпк) составляет $\lg(\text{O}/\text{H})_{\text{R}_{\odot}} + 12 \approx 8.5$, величина радиального градиента составляет 0.04—0.05 dex/кпк (рис. 3). Мы использовали все опубликованные спектральные данные (интенсивности линий [O II] $\lambda\lambda$ 3726, 3729, [O III] $\lambda\lambda$ 4959, 5007, [O III] λ 4363) за тридцать лет. В последние годы содержание кислорода в областях Н II Галактики определялось в работах [13, 50]. В работе [50] определены содержания кислорода в семи близких (на расстояниях до 2 кпк от Солнца) областях Н II. Значения содержания кислорода для этих областей Н II совпадают в пределах ошибок (8.45 ± 0.1). В работе [13] определены содержания кислорода в шести областях Н II на галактоцентрических расстояниях между 6.6 и 14.8 кпк (спектральные данные из этой работы были включены в нашу выборку) и получены значение содержания кислорода 8.48 на галактоцентрическом расстоянии Солнца и величина градиента 0.0395 dex/кпк. Согласие полученных нами значений с [13, 50] позволяет заключить, что ранние спектральные данные (по крайней мере значительная их часть) так же надежны, как и современные спектральные данные, что оправдывает их использование для определения радиального распределения содержания кислорода в Галактике. Данные табл. 1 показывают, что содержания кислорода, определенные по разным спектральным данным, согласуются между собой. Для туманности Ориона

формальная ошибка определения содержания кислорода в рамках двухзонной модели составляет ± 0.06 dex для 24 измерений из восьми работ. Поэтому трудно ожидать, что в рамках двухзонной модели более точные спектральные данные для областей Н II приведут к драматическому изменению значения содержания кислорода, найденного здесь (а также в работах [13, 50]) для галактоцентрического расстояния Солнца. Другими словами, реалистичность определения содержания кислорода в областях Н II определяется главным образом надежностью метода определения содержания кислорода (насколько адекватно двухзонная модель описывает реальное поле температур в области Н II). Некоторое представление о реалистичности определения содержания кислорода в областях Н II с использованием двухзонной модели может быть получено путем сравнения значения содержания кислорода на галактоцентрическом расстоянии Солнца, найденного по Н II областям, со значениями содержания кислорода, найденными другими способами.

Содержание кислорода в межзвездном газе в солнечной окрестности можно определить по межзвездным линиям поглощения в спектрах звезд. Исследования такого рода показали, что в межзвездном газе до расстояний 1.5 кпк от Солнца содержание кислорода практически одинаково во всех направлениях и составляет $\lg(O/H)_{\text{ISM}} + 12 = 8.47 \dots 8.50$ [31, 54]. Следует подчеркнуть, что содержание кислорода в межзвездном газе определяется с высокой точностью, погрешность не превышает ± 0.05 dex (или 10 %) [31]. Согласие значения содержания кислорода на галактоцентрическом расстоянии Солнца, найденного по областям Н II, со значением содержания кислорода, найденным по межзвездным линиям поглощения в спектрах звезд, может служить весомым аргументом в пользу справедливости двухзонной модели областей Н II.

Химический состав атмосфер непроэволюционировавших звезд отражает химический состав газа, из которого образовались эти звезды. Поэтому содержание кислорода в атмосферах молодых звезд также можно использовать для определения содержания кислорода в солнечной окрестности в современную эпоху. К настоящему времени содержания кислорода в атмосферах ряда В звезд определены с учетом отклонения от локального термодинамического равновесия. Среднее значение содержания кислорода для 17 ОВ звезд в ассоциации Сер ОВ2 составляет 8.55 ± 0.15 [10, 11], среднее значение для двух В-звезд в η и χ Per — 8.51 ± 0.1 [24], среднее значение для семи В-звезд в η и χ Per — 8.68 ± 0.14 [58], среднее значение содержания кислорода в атмосферах 15 В-звезд, принадлежащих пяти близким ОВ-ассоциациям, равно 8.60 ± 0.18 [12]. Таким образом, содержание кислорода на галактоцентрическом расстоянии Солнца, найденное по данным о химическом составе атмосфер В-звезд, составляет 8.60 ± 0.20 . При сравнении химического состава межзвездного газа (областей Н II) и химического состава звездных атмосфер следует учитывать, что наряду с газом в межзвездной среде (в областях Н II) есть пылевые частицы. Так как часть атомов кислорода заключена в пылевых частицах, то содержание кислорода в газе ниже полного содержания кислорода в межзвездной среде (в областях Н II). Поэтому неудивительно, что содержание кислорода в атмосферах В-звезд на 0.10 ± 0.15 dex выше, чем содержание кислорода в межзвездном газе. Это служит указанием на то, что полное содержание кислорода в межзвездной среде на 25–40 % выше, чем содержание кислорода в межзвездном газе.

Итак, совпадение содержания кислорода на галактоцентрическом расстоянии Солнца, найденного по Н II областям, с содержанием кислорода, найденным по межзвездным линиям поглощения в спектрах звезд, может

служить аргументом в пользу справедливости двухзонной модели областей Н II. Для того чтобы этот аргумент стал неоспоримым, необходимо доказать, что доля кислорода, содержащегося в пылевых частицах, одинакова для областей Н II и межзвездной среды в солнечной окрестности. Если же в областях Н II доля кислорода в пылевых частицах ниже, чем в межзвездной среде, то двухзонная модель областей Н II дает заниженное значение содержания кислорода. В наиболее неблагоприятном случае, если пыли в областях Н II вообще нет, содержание кислорода в рамках двухзонной модели недооценивается на величину, равную содержанию кислорода в пылевых частицах в межзвездной среде. В работе [31] показано, что содержание кислорода в пылевых частицах в межзвездной среде в солнечной окрестности не может превышать 40÷50 % содержания кислорода в межзвездном газе. Следовательно, максимальная возможная систематическая ошибка определения содержания кислорода в рамках двухзонной модели не может превышать 0.15 dex. Поскольку пыль есть в областях Н II (пыль обнаружена даже в очень горячих областях Н II в голубых компактных карликовых галактиках), то систематическая ошибка определения содержания кислорода в рамках двухзонной модели значительно ниже предельно возможной ошибки, либо отсутствует вообще.

Многие годы широко обсуждается факт, что содержание кислорода в солнечной атмосфере выше, чем содержание кислорода в межзвездной среде на галактоцентрическом расстоянии Солнца в современную эпоху. На протяжении последних лет наблюдается тенденция к уменьшению принимаемого значения содержания кислорода в солнечной атмосфере: $\lg(O/H)_{\odot} + 12 = 8.93$ (1989 г., [5]), 8.87 (1996 г., [22]), 8.83 (1998 г., [23]), 8.736 (2000 г., [26]), 8.69 (2001 г., [49]). Тем не менее, последние значения содержания кислорода в солнечной атмосфере превышают содержание кислорода в межзвездной среде на галактоцентрическом расстоянии Солнца в современную эпоху. Этот факт свидетельствует о том, что эволюционное изменение содержания кислорода в солнечной окрестности не является монотонным, и следовательно, химическая эволюция солнечной окрестности описывается моделью с (эпизодическим) притоком газа с низким содержанием тяжелых элементов в диск [41, 45, 46].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы определили содержание кислорода $(O/H)_{Te}$ в областях Н II нашей Галактики при помощи классического T_e -метода в рамках двухзонной модели области Н II, используя собранные из литературных источников спектральные данные (69 спектров для 11 областей Н II с галактоцентрическими расстояниями от 6.6 до 14.8 кпк). Получены параметры радиального распределения содержания кислорода в диске нашей Галактики. Найденное нами содержание кислорода на галактоцентрическом расстоянии Солнца совпадает с содержанием кислорода в межзвездном газе в солнечной окрестности, найденным с высокой точностью по межзвездным линиям поглощения в спектрах звезд [31, 54], что свидетельствует о справедливости двухзонной модели областей Н II.

Полученное нами радиальное распределение содержания кислорода $(O/H)_{Te} - R_G$ сравнивается с радиальным распределением $(O/H)_{SH} - R_G$ из работы [52], которое широко используется при построении моделей химической эволюции нашей Галактики. Показано, что содержания кислорода $(O/H)_{SH}$, найденные в работе [52], систематически выше (на 0.2—0.3 dex), чем характерные содержания кислорода $(O/H)_{Te}$ на тех же галактоцентрических расстояниях. Этот факт ставит под сомнение реалистичность моде-

лей химической эволюции нашей Галактики, которые базируются на данных [52].

Содержания кислорода в областях Н II из выборки [52] были переопределены нами при помощи P -метода. Соответствующее радиальное распределение $(\text{O}/\text{H})_P - R_G$ согласуется с радиальным распределением $(\text{O}/\text{H})_{T_e} - R_G$, что подтверждает сделанное в работах [42—44] заключение о том, что содержания кислорода $(\text{O}/\text{H})_P$, определенные при помощи P -метода, хорошо согласуются с содержаниями кислорода $(\text{O}/\text{H})_{T_e}$, определенными при помощи T_e -метода.

Авторы выражают благодарность рецензенту за конструктивные замечания. Данная работа была частично финансирована Украинским фондом фундаментальных исследований (грант 02.07/00132).

1. Пилюгин Л. С. Влияние галактического ветра на химическую эволюцию неправильных галактик. Численное моделирование и аналитическое описание. // Астрон. журн.—1994.—71, № 6.—С. 825—832.
2. Соболев В. В. Курс теоретической астрофизики. — М.: Наука, 1967.—528 с.
3. Хромов Г. С. Планетарные туманности: Физика. Эволюция. Космогония. — М.: Наука, 1985.—296 с.
4. Alloin D., Collin-Souffrin S., Joly M., Vigroux L. Nitrogen and oxygen abundances in galaxies // Astron. and Astrophys.—1979.—78, N 2.—P. 200—216.
5. Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements — meteoritic and solar // Geochimica et Cosmochimica Acta.—1989.—53.—P. 197—214.
6. Baldwin J. A., Ferland G. J., Martin P. G., et al. Physical conditions in the Orion nebula and an assessment of its helium abundance // Astrophys. J.—1991.—374, N 2.—P. 580—609.
7. Baldwin J. A., Verner E. M., Verner D. A., et al. High-resolution spectroscopy of faint emission lines in the Orion nebula // Astrophys. J. Suppl. Ser.—2000.—129, N 1.—P. 229—246.
8. Bresolin F., Kennicutt R. C., Garnett D. R. The ionizing stars of extragalactic H II regions // Astrophys. J.—1999.—510, N 1.—P. 104—124.
9. Caplan J., Deharveng L., Peña M., et al. Oxygen and helium abundances in Galactic H II regions. I. Observations // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2000.—311, N 2.—P. 317—328.
10. Daflon S., Cunha K., Becker S. R. Chemical abundances of OB stars in the Cepheus OB2 association // Astrophys. J.—1999.—522, N 2.—P. 950—959.
11. Daflon S., Cunha K., Becker S. R., Smith V. V. Chemical abundances of OB stars in five OB association // Astrophys. J.—2001.—552, N 1.—P. 309—320.
12. Daflon S., Cunha K., Butler K., Smith V. V. Chemical abundances of OB stars with high projected rotational velocities // Astrophys. J.—2001.—563, N 1.—P. 325—333.
13. Deharveng L., Peña M., Caplan J., Costero R. Oxygen and helium abundances in Galactic H II regions. II. Abundance gradients // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2000.—311, N 2.—P. 329—345.
14. Diaz A. I., Perez-Montero E. An empirical calibration of nebular abundances based on the sulphur emission lines // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2000.—312, N 1.—P. 130—138.
15. Dopita M. A., Evans I. N. Theoretical models for H II regions. II. The extragalactic H II region abundance sequence // Astrophys. J.—1986.—307, N 2.—P. 431—440.
16. 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.
17. Esteban C., Peimbert M., Torres-Peimbert S., Escalante V. Chemical composition of the Orion nebula derived from echele spectrophotometry // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1998.—295, N 2.—P. 401—422.
18. Esteban C., Peimbert M., Torres-Peimbert S., et al. Faint emission lines and temperature fluctuations in M8 // Astrophys. J. Suppl. Ser.—1999.—120, N 1.—P. 113—129.
19. Esteban C. Chemical composition and temperature fluctuations in M17 // Rev. Mexicana Astron. Astrof.—1999.—35, N 1.—P. 65—84.
20. Garnett D. R. Electron temperature variations and the measurement of nebular abundances // Astron. J.—1992.—103, N 4.—P. 1330—1337.
21. Giovagnoli A., Tosi M. Chemical evolution models with a new stellar nucleosynthesis // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1995.—273, N 2.—P. 499—504.
22. Grevesse N., Noels A., Sauval A. J. Standard abundances // Astron. Soc. of the Pacif. Conf. Ser.—1996.—99.—P. 117.
23. Grevesse N., Sauval A. J. Standard solar composition // Solar composition and its evolution— from core to corona / Eds Frühlich C., Huber M. C. E., Solanki S. K., von Steiger R. — Netherlands: Kluwer Acad. Publ., 1998.—5.—P. 161—174.—(Space Sciences Series of ISSI).

24. *Gummersbach C. A., Kaufer A., Schäfer D. R.* B stars and the chemical evolution of the Galactic disk // *Astron. and Astrophys.*—1998.—338, N 3.—P. 881—896.
25. *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.
26. *Holweber H.* Photospheric abundances: problems, updates, implications // *Solar and galactic composition* / Ed. R. F. Wimmer-Schweingruber. — Berlin: Springer, 2002.— (astro-ph/0107426).
27. *Izotov Yu. I., Thuan T. X.* The primordial abundance of ^4He revisited // *Astrophys. J.*—1998.—500, N 1.—P. 188—216.
28. *Izotov Yu. I., Thuan T. X., Lipovetsky V. A.* The primordial helium abundance from a new sample of metal-deficient blue compact galaxies // *Astrophys. J.*—1994.—435, N 2.—P. 647—667.
29. *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.
30. *McGaugh S. S.* H II region abundances: model oxygen line ratios // *Astrophys. J.*—1991.—380, N 1.—P. 140—150.
31. *Meyer D. M., Jura M., Cardelli J. A.* The definitive abundance of interstellar oxygen // *Astrophys. J.*—1998.—493, N 1.—P. 222—229.
32. *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.
33. *Osterbrock D. E., Tran H. D., Veilleux S.* Faint emission lines in the spectrum of the Orion nebula and the abundances of some of the rarer elements // *Astrophys. J.*—1992.—389, N 1.—P. 305—324.
34. *Pagel B. E. J., Edmunds M. G., Blackwell D. E., et al.* On the composition of H II regions in southern galaxies. I. NGC300 and 1365 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1979.—189, N 1.—P. 95—113.
35. *Pagel B. E. J., Simonson E. A., Terlevich R. J., 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.
36. *Peimbert M., Costero R.* Chemical abundances in galactic H II regions // *Boletín de los observatorios de Tonanzintla y Tacubaya.*—1969.—31, N 5.—P. 3—22.
37. *Peimbert M., Torres-Peimbert S.* Chemical composition of the Orion nebula // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1977.—179, N 1.—P. 217—234.
38. *Peimbert M., Torres-Peimbert S., Dufour R. J.* Chemical composition of M8 based on IUE and visual observations // *Astrophys. J.*—1993.—418, N 2.—P. 760—766.
39. *Peimbert M., Torres-Peimbert S., Rayo J. F.* Abundance gradients in the Galaxy derived from H II regions // *Astrophys. J.*—1978.—220, N 2.—P. 516—524.
40. *Peimbert M., Torres-Peimbert S., Ruiz M. T.* The chemical composition of the Galactic H II region M17 // *Rev. Mexicana Astron. Astrof.*—1992.—24, N 1.—P. 155—177.
41. *Pilyugin L. S.* Chemical evolution of the Milky Way Galaxy. III. Is the disk formed through mergers of fragments? // *Astron. and Astrophys.*—1996.—313, N 3.—P. 803—809.
42. *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 1.—P. 325—332.
43. *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.
44. *Pilyugin L. S.* The oxygen abundance distribution in M 101 // *Astron. and Astrophys.*—2001.—373, N 1.—P. 56—62.
45. *Pilyugin L. S., Edmunds M. G.* Chemical evolution of the Milky Way Galaxy. I. On the infall model of galactic chemical evolution // *Astron. and Astrophys.*—1996.—313, N 3.—P. 783—791.
46. *Pilyugin L. S., Edmunds M. G.* Chemical evolution of the Milky Way Galaxy. II. On the origin of scatter in the age-metallicity relation // *Astron. and Astrophys.*—1996.—313, N 3.—P. 792—802.
47. *Pilyugin L. S., Ferrini F.* On the oxygen abundance deficiency in spiral galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1998.—336, N 1.—P. 103—115.
48. *Pilyugin L. S., Ferrini F.* On the oxygen abundance deficiency in irregular galaxies // *Astron. and Astrophys.*—2000.—354, N 3.—P. 874—880.
49. *Prieto C. A., Lambert D. L., Asplund M.* The forbidden abundance of oxygen in the Sun // *Astrophys. J. Lett.*—2001.—556, N 1.—P. 63L—66L.
50. *Rodríguez M.* The abundances of O, S, Cl, N, Ar, He and C in seven Galactic H II regions // *Astron. and Astrophys.*—1999.—351, N 3.—P. 1075—1086.
51. *Searle L.* Evidence for composition gradients across the disks of spiral galaxies // *Astrophys. J.*—1971.—168, N 3.—P. 327—341.

52. *Shaver P. A., McGee R. X., Newton L. M., et al.* The galactic abundance gradient // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1983.—**204**, N 1.—P. 53—112.
53. *Smith H. E.* Spectrophotometric observations of ionized hydrogen regions in nearby spiral and irregular galaxies // *Astrophys. J.*—1975.—**199**, N 3.—P. 591—610.
54. *Sofia U. J., Meyer D. M.* Interstellar abundance standards revisited // *Astrophys. J. Lett.*—2001.—**554**, N 2.—P. L221—L224.
55. *Thon R., Meusinger H.* Models of the long-term evolution of the Galactic disk with viscous flows and gas infall // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**338**, N 2.—P. 413—434.
56. *Tosi M.* The effect of metal-rich infall on galactic chemical evolution // *Astron. and Astrophys.*—1988.—**197**, N 1.—P. 47—51.
57. *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.
58. *Vrancken M., Lennon D. J., Dufton P. L., Lambert D. L.* The atmospheric parameters and chemical composition of early B-type giants in η and χ Persei // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**358**, N 2.—P. 639—650.
59. *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.
60. *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.

Поступила в редакцию 18.10.01