

УДК 524.7

**В. В. Сагун<sup>1</sup>, Ю. И. Изотов<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Киевский национальный университет имени Тараса Шевченка  
пр. Глушкова 2, Киев, 03022<sup>2</sup>Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680**Содержание догалактического  $^4\text{He}$  с учетом новых данных о систематических ошибках в его определении**

*Проведено определение содержания первичного гелия во Вселенной на основе спектральных наблюдений голубых компактных карликовых галактик с малым содержанием тяжелых элементов. При коррекции интенсивностей наблюдаемых спектральных линий учитывался ряд механизмов, включая звездное поглощение и ударное возбуждение спектра излучения гелия и водорода. Значения параметров, необходимых для коррекции отклонений интенсивностей эмиссионных линий от их рекомбинационных значений, определялись при помощи метода Монте-Карло. Получено содержание первичного гелия  $0.2557 \pm 0.0014$ , что на 3 % выше, чем значение, полученное из анализа флуктуаций микроволнового реликтового излучения в предположении стандартной модели первичного нуклеосинтеза. Это указывает на существование в эпоху первичного нуклеосинтеза новых типов нейтрино в дополнение к известным трем.*

*ВМІСТ ДОГАЛАКТИЧНОГО  $^4\text{He}$  ІЗ ВРАХУВАННЯМ НОВИХ ДАНИХ ПРО СИСТЕМАТИЧНІ ПОХИБКИ У ЙОГО ВИЗНАЧЕННІ, Сагун В. В., Изотов Ю. І. — Визначено вміст первинного гелію у Всесвіті на основі спостережень голубих компактних карликових галактик з низьким вмістом важких елементів. При корекції інтенсивностей спостережуваних спектральних ліній враховувалося зоряне поглинання та ударне збудження спектру випромінювання гелію та водню. Параметри, що були необхідні для проведення корекції, визначалися за допомогою методу Монте-Карло. В результаті значення вмісту первинного гелію становить  $0.2557 \pm 0.0014$ , що на 3 % перевищує значення, отримане із аналізу флуктуацій реликтового випромінювання в наближенні стандартної моделі нуклеосинтезу. Це вказує на існуван-*

*ня в епоху первинного нуклеосинтезу нових типів нейтрино на додаток до трьох відомих.*

*THE PREGALACTIC  $^4\text{He}$  ABUNDANCE DETERMINATION INCLUDING NEW DATA ON SYSTEMATIC EFFECTS, by Sagun V. V., Izotov Yu. I. — We derived the primordial helium abundance in the Universe using spectral observations of low-metallicity blue compact dwarf galaxies. The intensities of hydrogen and helium emission lines were corrected for the stellar absorption and collisional excitation with the use of the Monte-Carlo simulations. As a result the best determined primordial helium abundance equals  $0.2557 \pm 0.0014$ , 3 % higher than that derived from the analysis of fluctuations of the microwave background radiation assuming standard model of nucleosynthesis. This implies that new types of light neutrino species were present at the epoch of the primordial nucleosynthesis in addition to three known ones.*

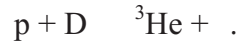
## **ВВЕДЕНИЕ**

Химические элементы во Вселенной начали образовываться в период с 0.01 до 200 с от начала ее расширения. Этот период получил название первичного нуклеосинтеза. Именно в то время образовались легкие элементы, почти 75 % общей массы которых составлял водород H, 25 % гелий  $^4\text{He}$ , а содержание других элементов и их изотопов, таких как дейтерий D, легкий изотоп гелия  $^3\text{He}$  и литий  $^7\text{Li}$ , составляло не больше 0.01 %. Более тяжелые элементы образовались значительно позже в недрах звезд после эпохи рекомбинации. Поэтому важное значение для проверки моделей эволюции Вселенной на ранних ее стадиях имеет определение содержания именно легких элементов. Описанию этих процессов было посвящено значительное количество работ. Были построены модели, которые в целом дают предсказания, хорошо согласующиеся с первичными содержаниями легких элементов, полученными из наблюдений флуктуаций реликтового излучения по данным спутника WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe).

Содержание легких химических элементов носит в себе отражение процессов, которые происходили в ранней Вселенной. Поэтому их исследование является уникальной возможностью заглянуть в прошлое Вселенной вплоть до времен, которые характеризуются значением красного смещения  $10^9$ . Более того, сравнивая предсказание стандартной теории нуклеосинтеза Большого Взрыва (СТНБВ) с данными, полученными на основе наблюдений, можно тестировать космологические модели и изучать свойства барионов и других частиц при сверхвысоких плотностях энергии. Укажем, что эта методика также дает возможность определять отклонение от стандартной модели элементарных частиц.

Тестирование СТНБВ может быть проведено сравнением теоретически предсказанных и экспериментально определенных первичных содержаний химических элементов.

Так, хотя дейтерий и образуется в ядрах звезд, он, не накапливаясь, превращается в  ${}^3\text{He}$  в реакции



Поэтому весь дейтерий, который наблюдается, образовался именно вследствие первичного нуклеосинтеза и имеет космологическое происхождение. Его количество, определенное на основе наблюдений, подтвердило модель горячей Вселенной, в частности той ее стадии, когда дейтерий образовался при температуре  $10^8$ — $10^9$  К. Следует отметить, что некоторое количество дейтерия сгорает в звездах, а нового образования в межзвездном пространстве не происходит. Поэтому его распространенность, определенная из наблюдений, является нижней границей распространенности первичного дейтерия. По данным многих наблюдений, эта величина, по отношению к количеству ядер водорода, составляет  $10^{-5}$  D/H  $2 \cdot 10^{-4}$ . Вследствие связи  ${}^3\text{He}$  с D их распространенности часто рассматривают вместе.

Содержание  ${}^3\text{He}$  может быть определено из наблюдений тел Солнечной системы и наблюдений ярких областей ионизированного водорода в радиодиапазоне. При этом вследствие значительных изменений, связанных с протеканием реакции (1), распространенность  ${}^3\text{He}$  увеличилась. Именно поэтому ее нужно рассматривать только как верхнюю границу его первичного содержания. Экспериментально определенная распространенность легкого изотопа гелия лежит в таких границах:

$$1.2 \cdot 10^{-5} < {}^3\text{He}/\text{H} < 1.5 \cdot 10^{-4}.$$

Другим элементом, первичное содержание которого можно определять экспериментально, является  ${}^7\text{Li}$ . Для точного определения этой величины можно использовать лишь результаты наблюдений очень старых звезд населения II с низким содержанием тяжелых элементов, т. е. элементов с атомными номерами больше 3. Эти наблюдения дают такую оценку его количества:  ${}^7\text{Li}/\text{H} = (1.4 \pm 0.2) \cdot 10^{-10}$ . Наблюдения галактических звезд населения I свидетельствуют о на порядок большем содержании  ${}^7\text{Li}$ .

Содержания более тяжелых химических элементов, таких как  ${}^9\text{Be}$  и  ${}^{11}\text{B}$ , определяются значениями на несколько порядков меньшими, по сравнению с определенным содержанием  ${}^7\text{Li}$ . Есть указания на то, что эти элементы образовались не при первичном нуклеосинтезе, а в недрах звезд. Подтверждением этого является высокая корреляция их содержания с содержанием еще более тяжелых элементов, которые с достоверностью образовались в звездах.

Для определения слабого отклонения от СТНБВ и космологических параметров наиболее приемлемым является использование данных о содержании первичного  ${}^4\text{He}$ . Для корректного тестирования теории его определение должно быть проведено с погрешностью не

больше чем 1 %. Именно точному определению первичного содержания  ${}^4\text{He}$  и посвящена данная работа.

### РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ${}^4\text{He}$

На распространенность  ${}^4\text{He}$  влияют несколько факторов, которые характеризуются такими параметрами, как время распада нейтрона, количество сортов нейтрино и отношение количества барионов к количеству фотонов. Определение содержания  ${}^4\text{He}$  (далее просто He) может быть проведено по наблюдениям областей ионизированного водорода H II в голубых компактных карликовых галактиках (ГККГ), которые имеют низкое содержание тяжелых элементов, и поэтому не испытали значительной химической эволюции. Наблюдается корреляция между содержаниями гелия и элементов тяжелее гелия. В качестве «металла-коррелятора» часто выбирают кислород или азот. Поскольку содержание тяжелых элементов увеличивается с возрастом Вселенной, наблюдения этих галактик дают возможность найти зависимость количества He от количества кислорода (азота), а потом экстраполировать эту зависимость к очень малому значению количества кислорода (азота), т. е. к времени первичного нуклеосинтеза [23]. Практически это означает, что определенная с помощью «металла-коррелятора» поправка на содержание He, синтезированного в звездах, может быть отнята от его современного содержания, что и даст возможность оценить первичную распространенность этого элемента.

Обычно распространенность He описывают его массовой долей  $Y$ . Измеренная величина  $Y$  рассматривается как верхняя граница первичного значения, поскольку ее количество может увеличиваться за счет ядерных реакций в звездах. В 1967 г. Фолкнер [9] на основе изучения субкарликов показал, что  $Y > 0.20$ . Изучение шаровых скоплений дало значение  $Y = 0.30$ . Для Солнца было определено  $Y = 0.23$ . Спектроскопическое изучение содержания этого элемента проводится с использованием его рекомбинационных линий в областях H II.

### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ПЕРВИЧНОГО He

Методика определения содержания первичного He сводится к трем этапам: 1) измерению интенсивностей эмиссионных линий в спектрах достаточно большого количества ГККГ; 2) коррекции отклонений наблюдаемых интенсивностей линий He и H от их рекомбинационных значений и 3) построению зависимости количества гелия от количества тяжелых элементов. Поскольку требуется большая точность в определении содержания первичного He, необходимо учитывать большое количество систематических эффектов, которые изменяют интенсивности линий водорода и гелия от их рекомбинационных значений. Среди них селективная экстинкция на пыли, наличие линий звездного

поглощения в спектрах областей Н II и ударное возбуждение линий Н и нейтрального He (в дальнейшем He I), флуоресценция, температурные флуктуации и т. п.

Впервые исследованию систематических эффектов, которые влияют на точность определения содержания He, была посвящена работа Пеймберта [23]. На сегодня количество эффектов, которые учитываются, значительно увеличилось, но в то же время используется несколько предположений, не обоснованных теоретически. Одним из них есть гипотеза о том, что флуктуации температуры в сильно и слабо ионизированных частях области Н II являются одинаковыми.

Проведенный анализ влияния разных систематических эффектов, которые имеют место при определении количества He, позволил определить наиболее существенные из них:

- ударное и флуоресцентное возбуждение спектральных линий Н;
- покраснение или селективная экстинция на пыли;
- температурные отличия в разных частях области Н II, а потому различия температур  $T_e(\text{He})$  и  $T_e(\text{O III})$  в областях свечения He I и O III;
- звездные линии поглощения Н и He I;
- ионизационная структура области Н II;
- ударное возбуждение в линиях He I;
- флуоресцентное излучение в линиях He I.

Учет последних двух факторов проводился на основе результатов работ Бенжамина [5, 6].

Для воспроизведения процессов, которые происходят в областях Н II, необходимо построение корректной модели их физических свойств (температура, плотность и др.), которые определялись совместно с определением содержания He.

Отношение содержания He к Н в областях Н II определяется формулой

$$y = \frac{\text{He}}{\text{H}},$$

но наличие большого количества неучтенных систематических эффектов приводит к возникновению погрешностей определения содержания He и Н. Поэтому необходимы коррекции экспериментально определенных количеств этих элементов.

Значение величины  $y^+$  определяется количествами He и Н, которые в свою очередь могут быть определены с помощью анализа их экспериментально измеренных спектров. Для определения  $y^+$  мы, следуя работам [12, 14—16], использовали пять наиболее интенсивных эмиссионных линий He I с длинами волн 388.9, 447.1, 587.6, 667.8 и 706.5 нм соответственно. Укажем, что большое значение для корректного определения интенсивностей исследуемых спектральных линий имеет учет ударного и флуоресцентного усиления линий.

Величина флуоресцентного усиления линий He I характеризуется оптической толщиной  $\tau(388.9)$  в линии He I 388.9 нм, тогда как удар-

ное усиление зависит от температуры и концентрации электронов. Проведение соответствующих расчетов количества ядер ионизированного He дало возможность определить концентрацию электронов в зоне свечения He I  $N_e(\text{He})$  и (388.9). Линии He I 388.9 и 706.5 нм играют важную роль в расчетах, которая связана с их особой чувствительностью к искомым величинам. Поскольку первая из них blendируется с линией H, которая имеет такую же длину волны, мы определили интенсивность линии He I, отняв от нее интенсивность линии водорода.

Кроме того, при расчетах важное значение имели: отношение усиления эмиссионной линии H вследствие ударного возбуждения к интенсивности самой линии  $I(\text{H})/I(\text{He})$ , концентрация электронов  $N_e(\text{He})$  в области ионизированного He, соответствующая электронная температура, эквивалентные ширины звездных линий поглощения  $EW_{abs}(388.9 \text{ нм})$ ,  $EW_{abs}(447.1 \text{ нм})$ ,  $EW_{abs}(587.6 \text{ нм})$ ,  $EW_{abs}(667.8 \text{ нм})$  и  $EW_{abs}(706.5 \text{ нм})$ .

Методом Монте-Карло, который был описан в работе [17], одновременно случайным образом варьировались следующие параметры:  $N_e(\text{He})$ , и (388.9 нм) в их соответствующих пределах. Наилучшее значение определялось минимизацией  $\chi^2$ . Было проведено  $10^7$  вариаций для отдельной области H II, покрывающие весь диапазон изменения параметров.

Всего к рассмотрению было отобрано 95 наблюдений 88 областей H II в 78 галактиках. Большинство этих галактик — ГККГ с низким содержанием тяжелых элементов. К рассмотрению привлекались независимые наблюдения на разных телескопах нескольких областей одной галактики — это и привело к расхождениям количества объектов и количества наблюдений. При коррекции наблюдений был использован наиболее полный перечень систематических эффектов, которые учитывались при моделировании методом Монте-Карло.

**Линейная регрессия.** Определив современное содержание He и используя отношение содержания кислорода к водороду как металл-коррелятора, можно определить первичное значение содержания гелия. В работе [23] была предложена линейная зависимость  $Y$  от  $O/H$ , на основе которой возможна линейная экстраполяция до значения  $O/H = 0$ , т. е. до первичного ( $Y$  и  $O/H$  соответственно — массовая доля наблюдаемого He и содержание кислорода по отношению к содержанию водорода):

$$Y = Y_p + \frac{dY}{d(O/H)} \frac{O}{H},$$

где

$$Y = \frac{4y(1-Z)}{1-4y},$$

$$y = (y - y^2) ICF(\text{He} - \text{He}^2),$$

$$y \frac{\text{He}}{\text{H}}, \quad y^2 \frac{\text{He}^2}{\text{H}^2}.$$

Здесь  $Y_p$  — массовая доля первичного He по отношению к водороду,  $Z$  — массовая доля элементов, тяжелее He,  $y$  — количество He,  $y^+$ ,  $y^{2+}$  — соответственно количество однократно и двукратно ионизированного He,  $ICF(\text{He} + \text{He}^2)$  коэффициент ионизационной коррекции, который будет рассмотрен ниже.

В соответствии с результатами Медера [20] для  $Z = 0.001$  находим

$$\frac{dY}{d(\text{O}/\text{H})} = 12 \frac{dY}{d\text{O}} = 18.2 \frac{dY}{dZ},$$

где  $O$ ,  $Z$  — массовые доли кислорода и тяжелых элементов соответственно.

Известно, что исходная функция масс (ИФМ) зависит от исходного относительного содержания металлов. Так, при низком содержании металлов образованные звезды будут более массивными. Отличия ИФМ приводят к нелинейной зависимости между  $Y$  и  $O/H$  [24]. Личейная зависимость означает независимость ИФМ от содержания металлов.

Значение погрешностей, возникающих вследствие отличий протекания звездного нуклеосинтеза и неоднородности распределения кислорода, очень сложно оценить. Использование большой выборки наблюдений низкометаллических областей дает возможность провести усреднение по этим эффектам.

**Температурная структура.** Для определения количества He было использовано предположение, что  $T_e(\text{H}) = T_e(\text{He})$ , так как области свечения водорода и гелия практически совпадают. Электронная температура в области  $\text{He}^+$  варьировалась в пределах  $T_e(\text{He}) = (0.95$

$1.05) \cdot T_e(\text{O III})$ . Величина  $T_e(\text{O III})$ , в свою очередь, определялась из отношения наблюдаемых потоков в эмиссионных линиях  $[\text{O III}]$

$436.3 / (495.9 + 500.7)$ . Различия между  $T_e(\text{O III})$  и  $T_e(\text{He})$  объясняются большой чувствительностью потока авроральной линии  $436.3$  нм к температуре  $T_e(\text{O III})$ , которая характеризует более горячую часть области H II по сравнению с холодной частью свечения однократно ионизованного гелия с  $T_e(\text{He})$ .

Количество кислорода определялось в предположении, что электронная температура равняется  $T_e(\text{O III})$ .

**Звездные линии поглощения.** На эмиссионные линии He I и H в спектрах областей H II накладываются линии звездного поглощения, которые связаны с наличием горячих звезд [8, 21]. Такое наложение приводит к уменьшению интенсивностей эмиссионных линий по сравнению с рекомбинационными значениями.

В работе [10] был рассчитан теоретический спектр в линиях поглощения Бальмера и He I для областей H II с разным возрастом. Полу-

ченное значение эквивалентной ширины линии поглощения He I 447.1 нм находится в диапазоне 40—50 пм, что составляет менее 10 % от эквивалентной ширины эмиссионной линии He I 447.1 нм в областях H II с возрастом менее 5 млн лет. К сожалению, значения эквивалентных ширин для других линий не определялись. Мы предполагаем, что эффект звездного поглощения меньше проявляется в линиях He I 587.6, 667.8 и 706.5 нм. Известно также, что эквивалентные ширины разных линий поглощения водорода различные. Для фиксированного возраста звездного населения  $EW_{abs}$  имеет наибольшее значение для линии H $\delta$ , и соответственно уменьшается для H $\gamma$ , H $\beta$ , H $\alpha$ . Но в любом случае поглощение во всех линиях нужно учитывать для получения необходимой точности 1 %.

Из вышеизложенного понятно, что коррекция за звездное поглощение в линиях He I различна для разных линий. Из пяти используемых эмиссионных линий, эффект звездного поглощения имеет наибольшее влияние на эмиссионную линию He I 447.1 нм, так как она имеет наименьшую эквивалентную ширину. Для линии He I 587.6 нм эффект звездного поглощения меньше. Эта эмиссионная линия имеет больший вес при определении Y, поскольку она примерно в три раза ярче, чем эмиссионная линия He I 447.1 нм. Поток в эмиссионной линии He I 388.9 нм примерно в два раза больший, чем в линии He I 447.1 нм, поэтому эффект звездного поглощения должен быть меньшим.

В разных работах по определению содержания He используются разные методы учета звездного поглощения. Поэтому мы провели четыре независимых моделирования методом Монте-Карло с разными значениями величин поглощения в линиях H и He.

**Диапазоны изменения базовых параметров.** Мы выбрали следующие значения базовых параметров:

- 1) электронная температура  $T_e(\text{He})$  области He варьировалась в пределах  $(0.95—1.05) \cdot T_e(\text{O III})$ ;
- 2) величины  $N_e(\text{He})$  и  $\lambda_{\text{eff}}(\lambda = 388.9 \text{ нм})$  варьировались в пределах  $10—450 \text{ см}^3$  и  $0—5$  соответственно;
- 3) доля излучения вследствие ударного возбуждения в линии H изменялась от 0 до 5 %;
- 4) значение эквивалентной ширины линии поглощения равнялось  $EW_{abs}(\lambda = 447.1) = 40 \text{ пм}$ .

**Алгоритм Монте-Карло для получения наилучшего значения y.** Для каждой области H II было найдено наилучшее значение  $y_m$  согласно критерию наименьшего значения  $\chi^2$ :

$$\chi^2 = \sum_i^n \frac{(y_i - y_m)^2}{\sigma_i^2}, \quad (1)$$

где  $y_i$  — количество He<sup>+</sup>, полученного из наблюдаемых потоков



излучения линий нейтрального гелия;  $(y_i)$  — ошибка определения значения  $y_i$  в линии с номером  $i$ .

Величина  $y_m$  — среднее экспериментальное значение, которое определяется по формуле

$$y_m = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{y_i}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{\sigma_i^2}}.$$

Для определения значения  $y_m$  нами были использованы все пять наиболее сильных He I эмиссионных линии ( $n = 5$ ), однако только три линии (He I 447.1, 587.6, 667.8 нм) учитывались при расчете  $y_m$  ( $k = 3$ ). Это связано с тем, что интенсивности линий He I 388.9 и 706.5 нм определены с большими ошибками.

Оценка систематической ошибки значения  $y_m$  может быть получена из  $\sigma_{syst}^2$ . Это значение зависит от количества степеней свободы в моделировании, которое отличается от количества наблюдаемых параметров, равного пяти (пять интенсивностей эмиссионных линий He I), и числа свободных параметров, равного четырем (отношение  $I(\text{H } \lambda)/I(\text{H } \lambda)$  вследствие ударного возбуждения в первых четырех моделированиях, параметр  $\alpha$  в моделированиях с четвертого по девятый,  $T_e(\text{He } \lambda)$ ,  $N_e(\text{He } \lambda)$  и  $\lambda = 388.9$  нм). Тогда количество степеней свободы, равно  $5 - 4 = 1$  ( $\sigma_{syst}^2 = 1$ ) в предположении независимости указанных параметров. Поэтому систематическая ошибка полученных значений  $y_m$  для решений  $\sigma_{syst}^2$  между  $\sigma_{min}^2$  и  $\sigma_{min}^2 + 1$  будет лежать в интервале 1. Полная ошибка значения  $y_m$  может быть представлена в виде  $\sigma_{tot}^2 = \sigma_{syst}^2 + \sigma_{stat}^2$ .

**Ударное возбуждение в спектральных линиях H.** В работе [7] было показано, что в горячих и плотных областях H II, ударное возбуждение спектральных линий H существенно влияет на отношение He/H. Исследование показало, что при учете этого эффекта полученное количество He повышается на 5 % в предположении, что превышение отношения интенсивностей спектральных линий H/H, по отношению к рекомбинационному, связано только с ударным возбуждением [25]. Луридиана и др. [19] детально проанализировали три области H II, включая фотоионизационный анализ и покраснение, и установили, что увеличение интенсивности линии H вследствие ударного возбуждения может превышать 8 %, а в линии H 2—2.5 %.

Ниже в первых четырех вариантах моделирования методом Монте-Карло мы варьировали вклад ударного возбуждения в интенсивность линии H в диапазоне 0—5 % от рекомбинационного значения. Это значение определялось вместе с другими параметрами путем минимизации  $\chi^2$ .

Для H эффект ударного усиления в три раза меньше, чем для H . Найденные значения усиления указанных линий вследствие ударного возбуждения были вычтены из начальных интенсивностей линий. После этого интенсивности всех эмиссионных линий корректировались за экстинкцию.

С целью сравнения результатов разных методик моделирования ударного возбуждения в последующих расчетах мы также использовали значения усиления линий вследствие ударного возбуждения из работы [3]. Для коррекции интенсивностей излучения линий водорода за ударное усиление была использована формула

$$\frac{C}{R}(\lambda) = \frac{K_{\text{эф}}}{\text{эф}} \sum_i a_i \exp \left( \frac{b_i}{T_4} T_4^{c_i} \right), \quad (2)$$

где  $T_4 = T/10^4$ ,  $K_{\text{эф}}$  — вероятность перехода вследствие столкновения с основного уровня на уровень  $i$ , минуя промежуточный уровень  $j$ ,  $\text{эф}$  — вероятность рекомбинации с уровня  $i$  на уровень  $j$ ,  $\text{эф} = 10^4 N(\text{H I})/N(\text{H II})$ ,  $N(\text{H I})$  и  $N(\text{H II})$  — концентрации нейтрального и ионизированного водорода. Значение параметра точно не определено (от 0 до 100 для разных объектов). Поэтому проведенное ниже моделирование преследовало цель проанализировать зависимость содержания первичного гелия от параметра .

В таблице приведены значения параметров  $a_i, b_i, c_i$ , которые использовались для коррекции интенсивностей линий нейтрального водорода вследствие ударного возбуждения.

**Межзвездное покраснение.** Межзвездное покраснение является результатом поглощения и рассеяния фотонов на пылинках. Поскольку этот процесс зависит от длины волны, то в каждой спектральной линии его влияние отличается. Коррекция полученных спектров проводилась с использованием кривой экстинкции Витфорда [26]. Бальмеровские линии водорода сначала корректировались за эффекты ударного возбуждения и флуоресценции, а потом определялся коэффици-

**Коэффициенты коррекции интенсивностей линий нейтрального водорода вследствие ударного возбуждения**

i	H			H			H			H		
	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$a_i$	$b_i$	$c_i$
1	0.4155	-14.80	0.4209	0.2384	-15.15	0.3082	0.3629	-15.15	0.3598	0.3629	-15.34	0.3598
2	2.4965	-14.03	0.5853	0.6964	-14.80	0.4978	0.8351	-15.15	0.6533	0.8351	-15.34	0.6533
3	2.4063	-14.03	0.6187	0.1991	-15.15	0.6017	2.0044	-15.15	0.7281	2.0044	-15.34	0.7281
4	0.2914	-14.80	0.6766	0.1409	-15.15	0.6765	1.4757	-15.15	0.7809	1.4757	-15.34	0.7809
5	0.3685	-14.80	0.7076	0.2201	-15.15	0.7293	2.7947	-15.15	0.8582	2.7947	-15.34	0.8582
6	4.6426	-14.03	0.7788	1.9228	-14.80	0.7535	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	1.4845	-14.80	0.7845	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	2.8179	-14.80	0.9352	—	—	—	—	—	—

ент экстинкции по декременту бальмеровских линий, который затем использовался для коррекции интенсивностей линий.

**Ионизационная структура области Н II.** Еще один источник систематических отклонений возникает, когда предполагается, что зоны Н и He в областях Н II совпадают. В действительности радиус зоны He может быть меньше радиуса зоны Н в случае мягкого ионизирующего излучения, или больше, в случае жесткого излучения. Однако этот эффект невелик, и учет ионизационной структуры не дает значительных изменений определяемого количества гелия. В работе [4] приведен один из способов определения  $ICF(\text{He} + \text{He}^2)$  по отношению наблюдаемых отношений интенсивностей эмиссионных линий [O III]  $500.7 \text{ нм}$  / [O I]  $630 \text{ нм}$ ). Ниже мы использовали выражения для  $ICF(\text{He} + \text{He}^2)$ , полученные Ю. И. Изотовым и др. [17]. В среднем для областей Н II из нашей выборки  $ICF(\text{He} + \text{He}^2) =$

0.99. Это обозначает, что радиус зоны He немного больше радиуса зоны Н вследствие довольно жесткого ионизирующего излучения.

**Учет количества кислорода в пылевых частицах.** В работе [13] было установлено, что отношение содержаний Ne/O увеличивается линейно с увеличением содержания O/H в ГККГ с низким содержанием тяжелых элементов:

$$\lg \frac{\text{Ne}}{\text{O}} = (0.088 - 0.018)X + (1.450 - 0.144), \quad (3)$$

где  $X = 12 + \lg \text{O}/\text{H}$ . Поскольку кислород и неон синтезируются в одних и тех же массивных звездах, то отношение их содержаний не должно изменяться с увеличением содержания кислорода. Наличие такой зависимости свидетельствует о том, что часть кислорода находится не в газовой фазе, а в пыли, и эта доля больше в ГККГ с большим содержанием O. В то же время неон как инертный газ практически не связывается в пылевых частицах. Этот эффект незначителен, и при увеличении содержания кислорода от  $12 + \lg \text{O}/\text{H} = 7.0$  до  $8.6$  значение  $\lg \text{Ne}/\text{O}$  увеличивается на  $0.1$ . Мы используем зависимость (3) для учета кислорода, связанного в пыли, в полном его содержании, принимая, что в ГККГ с  $12 + \lg \text{O}/\text{H} = 7.0$  весь кислород находится в газообразном состоянии.

**Результаты моделирования.** В первом варианте моделирования при учете эффекта звездных линий поглощения согласно данным [11, 17] принималось  $EW_{abs}(\lambda = 4471) = 40 \text{ пм}$ . Для других линий были зафиксированы такие значения:  $EW_{abs}(\lambda = 388.9)/EW_{abs}(\lambda = 447.1) = 1.0$ ,  $EW_{abs}(\lambda = 587.6)/EW_{abs}(\lambda = 447.1) = 0.8$ ,  $EW_{abs}(\lambda = 667.8)/EW_{abs}(\lambda = 447.1) = 0.4$ ,  $EW_{abs}(\lambda = 706.5)/EW_{abs}(\lambda = 447.1) = 0.4$ . Электронная температура области He варьировалась в пределах  $T_e(\text{He}) = (0.95 - 1.00) \cdot T_e(\text{O III})$ . Все другие использованные параметры были базовыми (см. [14]):  $N_e(\text{He})$  и  $n_e(\lambda = 388.9 \text{ нм})$  варьировались в пределах  $10 - 450 \text{ см}^{-3}$  и  $0 - 5$  соот-

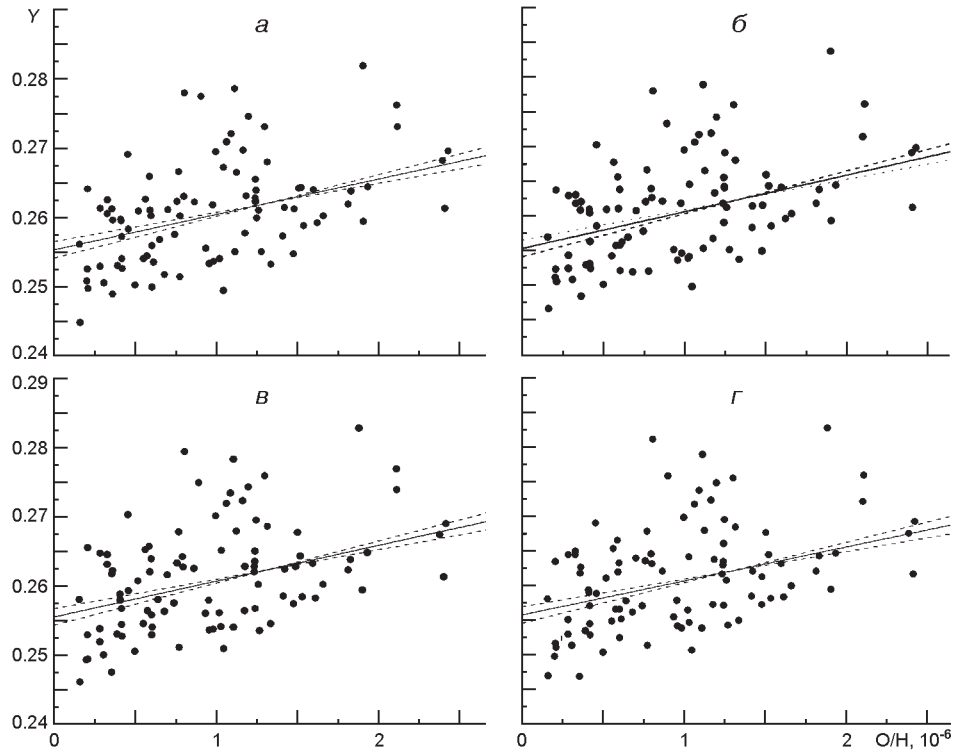


Рис. 1. Линейные регрессии  $Y = O/H$  для 95 наблюдений областей Н II для четырех вариантов наборов базовых параметров и значений эквивалентных ширин звездных линий (см. текст)

ветственно, усиление линии Н вследствие ударного возбуждения в диапазоне значений 0—5 %.

Наилучший набор значений параметров соответствует зависимости (см. рис. 1, а):

$$Y = (0.2553 \pm 0.0012) + (51.186 \pm 9.129) \cdot (O/H).$$

Во втором варианте эффект звездного поглощения учитывался по-разному. Значения эквивалентных ширин линий поглощения  $W_e$  использовались из первого моделирования, а значения эквивалентных ширин поглощения линий Н, нормированных на эквивалентную ширину линии Н, из работы [3]:  $a(H\beta) = 0.942$ ,  $a(H\gamma) = 1.000$ ,  $a(H\delta) = 0.959$ ,  $a(H\epsilon) = 0.896$ .

При этом абсолютное значение  $EW_{abs}(H\beta)$  определялось из наблюдаемого бальмеровского декремента совместно с коэффициентом экстинкции. Все другие использованные параметры были базовыми, включая изменения электронной температуры  $T_e$  области, в пределах  $T_e(H\beta) = (0.95 \dots 1.05) \cdot T_e(O III)$ . На рис. 1, б приведена полученная зависимость

$$Y = (0.2553 \pm 0.0012) + (52.763 \pm 9.039) \cdot (O/H).$$

В третьем варианте (рис. 1, в) были использованы значения эквивалентных ширин звездных линий поглощения  $W_e$ , нормированных на

эквивалентную ширину линии He I 447.1 нм, взятые из работы [3]:  $a(3889) = 1.400$ ,  $a(4026) = 1.347$ ,  $a(4471) = 1.000$ ,  $a(5876) = 0.874$ ,  $a(6678) = 0.525$ ,  $a(7065) = 0.400$ . Значения эквивалентных ширин звездных линий поглощения водорода принимались равными значениям, использованным в первом моделировании. Все использованные базовые параметры также варьировались в заданных пределах. Получена зависимость

$$Y = (0.2555 \pm 0.0012) + (51.669 \pm 9.142) \cdot (\text{O}/\text{H}).$$

В четвертом варианте моделирования включались значения эквивалентных ширин звездных линий поглощения H, нормированных на эквивалентную ширину звездной линии поглощения H $\alpha$ , и линий поглощения He, нормированных на эквивалентную ширину линии поглощения He I 447.1 нм [3]:  $a(\text{H}\alpha) = 0.942$ ,  $a(\text{H}\beta) = 1.000$ ,  $a(\text{H}\gamma) = 0.959$ ,  $a(\text{H}\delta) = 0.896$ ,  $a(388.9) = 1.400$ ,  $a(402.6) = 1.347$ ,  $a(447.1) = 1.000$ ,  $a(587.6) = 0.874$ ,  $a(667.8) = 0.525$ ,  $a(706.5) = 0.400$ . Результат этого моделирования приведен на рис. 1,  $z$ :

$$Y = (0.2557 \pm 0.0012) + (49.178 \pm 9.376) \cdot (\text{O}/\text{H}).$$

Результаты двух моделирований для разных диапазонов изменения значений параметра  $z$  (от 0 до 25 и от 0 до 100) приведены на рис. 2,  $a$  и  $b$  соответственно. Используемые значения параметра  $z$  и базовых параметров определялись путем  $\chi^2$ -минимизации. Анализируя рис. 2,  $b$  можно сделать вывод, что для семи объектов случайное значение  $z$  приводит к нереальным значениям  $Y$ . Это подтверждает результат моделирования со значением параметра  $z$  в пределах от 0 до 25, где эти семь объектов принимают допустимые значения  $Y$ . Все другие параметры моделирования были базовыми.

Исследуя зависимость  $Y$  от результатов разных моделей ударного возбуждения и звездного поглощения, мы провели ряд моделирований, включив одновременно все исследуемые параметры (рис. 3). Величины звездного поглощения в спектральных линиях He и H принимались равными значениям, использованным в предыдущем моделировании:  $a(\text{H}\alpha) = 0.942$ ,  $a(\text{H}\beta) = 1.000$ ,  $a(\text{H}\gamma) = 0.959$ ,  $a(\text{H}\delta) = 0.896$ ,  $a(388.9) = 1.400$ ,  $a(402.6) = 1.347$ ,  $a(447.1) = 1.000$ ,  $a(587.6) = 0.874$ ,  $a(667.8) = 0.525$ ,  $a(706.5) = 0.400$ .

Ударное возбуждение рассчитывалось в соответствии с формулой (2) по коэффициентам, приведенным в таблице. Но отношение плотности нейтрального водорода к ионизированному (т. е.  $n_{\text{H}}/n_{\text{H}^+}$ ) принималось разным. В первом моделировании параметр  $n_{\text{H}}/n_{\text{H}^+}$  случайным образом варьировался в диапазоне значений от 0 до 50, а во втором имел фиксированное значение 1.0, что соответствует значению, принятому в работе [3]. Результаты моделирования приведены на рис. 3,  $a$  и  $b$  соответственно.

Значения параметров (звездное поглощение, ударное возбуждение в спектре излучения гелия и водорода и параметр  $n_{\text{H}}/n_{\text{H}^+}$ ), на основе ко-

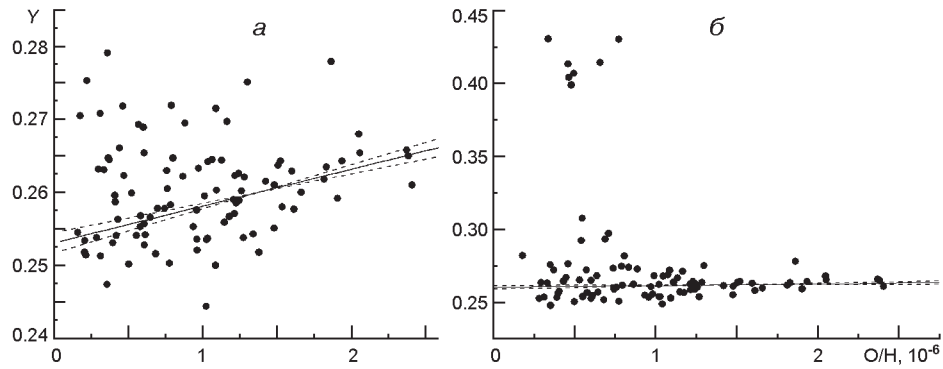


Рис. 2. Линейная регрессия  $Y = O/N$  на основе данных усиления линий Н вследствие ударного возбуждения, полученных в работе [3] со случайными значениями параметра в диапазоне 0—25 (а,  $Y = (0.2531 \pm 0.0014) + (50.466 \pm 10.242) \cdot (O/N)$ ) и 0—100 (б,  $Y = (0.2603 \pm 0.0012) + (11.669 \pm 8.252) \cdot (O/N)$ )

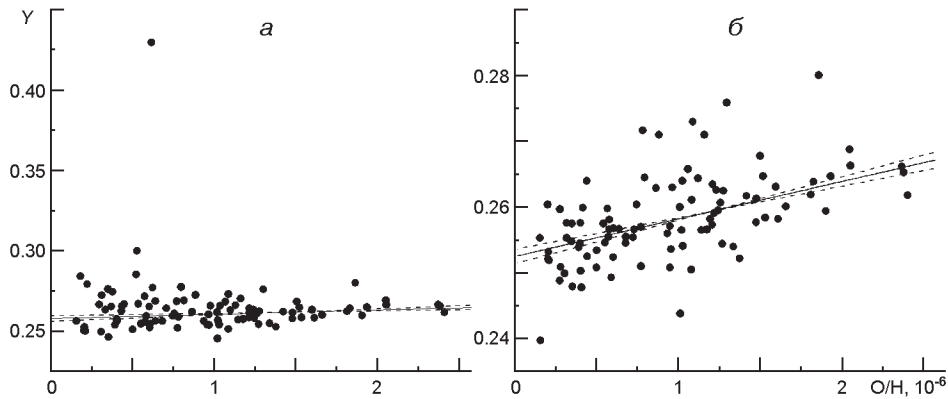


Рис. 3. Линейная регрессия  $Y = O/N$  для 95 областей Н II, полученная с использованием ранее значений базовых параметров, значений эквивалентных ширин из работы [3], усиления, вследствие ударного возбуждения при случайном значении параметра от 0 до 50 (а,  $Y = (0.2575 \pm 0.0017) + (26.828 \pm 11.798) \cdot (O/N)$ ) и фиксированном значении  $\alpha = 1.0$  (б,  $Y = (0.2524 \pm 0.0011) + (56.993 \pm 9.110) \cdot (O/N)$ )

торых проводилось последнее моделирование, в точности совпадают со значениями, принятыми в работе [3]. Это дает возможность сравнить наши результаты ( $Y_p = 0.2528 \pm 0.0011$ ) с результатами упомянутой работы ( $Y_p = 0.2561 \pm 0.108$ ). Как видно, полученные нами результаты имеют большую точность из-за использования большей выборки областей Н II.

Из рис. 3, а видно, что значение  $Y_p$  для объекта 0940+544N anomalously большое. Вероятно, для этого объекта значение параметра завышено. Поэтому, как и в работе [14], мы исключили этот объект из рассмотрения. Повторный расчет последней модели для 94 объектов дает значение первичного гелия  $Y_p = 0.2557 + 28.943 \cdot O/N$ , что хорошо согласуется с результатами работы [14] ( $Y_p = 0.2560 \pm 0.0011$ ) для 93

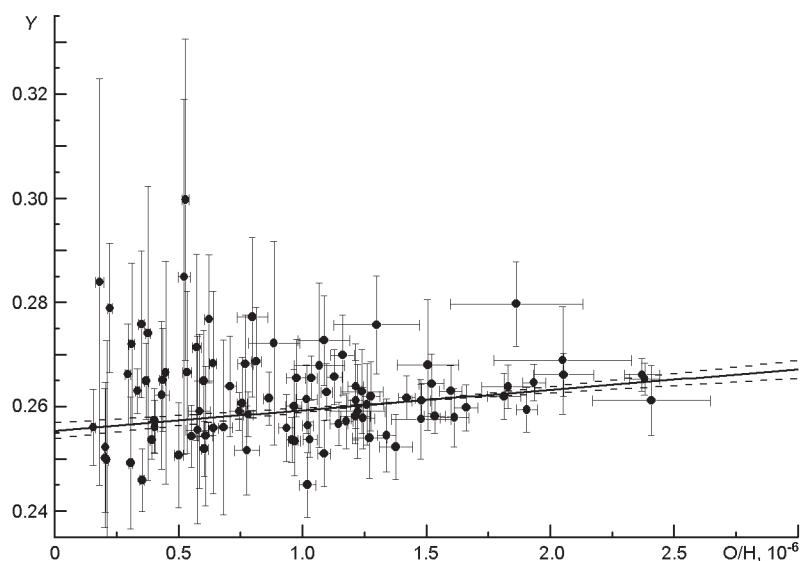


Рис. 4. Зависимости содержания первичного гелия и кислорода для 94 областей Н II. Значения эквивалентных ширин звездных линий поглощения He и H и значения усиления, вследствие ударного возбуждения, использовались из работы [3], при случайном изменении значений параметра в диапазоне от 0 до 50. Все другие использованные параметры были базовыми

объектов. Этот результат приведен на рис. 4. Это большое значение  $Y_p$ , которое заметно превосходит значение  $Y_p = 0.248$ , полученное из анализа микроволнового излучения в эксперименте WMAP в предположении стандартной модели первичного нуклеосинтеза, свидетельствует о возможном существовании дополнительных типов нейтрино, не обнаруженных экспериментально.

## ВЫВОДЫ

Представленная работа по определению содержания первичного гелия  $Y_p$  базируется на 95 наблюдениях 88 Н II областей в ГККГ с низким содержанием тяжелых элементов.

Для коррекции интенсивностей наблюдаемых эмиссионных линий гелия и водорода использовались последние данные о звездных линиях поглощения и ударном возбуждении. Методом Монте-Карло проведено ряд моделирований, в которых варьировались возможные различия в электронной температуре областей He и O III, электронная концентрация в области He и оптическая толщина в линии He I

388.9 нм. На основе проведенных расчетов можно сделать вывод, что значение параметра следует выбирать отдельно для каждого объекта, или задавать широкий диапазон варьирования, что и было реализовано в последнем моделировании. Для объекта 0940+544N значение параметра нужно принимать таким, что не превышает 15.

В результате определенное значение содержания первичного гелия составляет  $0.2557 \pm 0.0014$ , что на 3 % выше, чем значение, найденное из наблюдений микроволнового излучения спутником WMAP. Это указывает на возможное существование новых типов релятивистских нейтрино, в дополнение к трем известным.

1. *Aller L. H.* Physics of thermal gaseous nebulae. — Dordrecht: Reidel, 1984.— Vol. 112.—360 p.
2. *Anderson H., Ballance C. P., Badnell N. R., et al.* CORRIGENDUM: An R-matrix with pseudo-states approach to the electron-impact excitation of H I for diagnostic applications in fusion plasmas // *J. Phys. B Atom. Mol. Phys.*—2002.—**35**, N 6.— P. 1613—1615.
3. *Aver E., Olive K. A., Skillman E. D.* A new approach to systematic uncertainties and self-consistency in helium abundance determinations // *J. Cosmol. and Astropart. Phys.*—2010.—N 5.—P. 03.
4. *Ballantyne D. R., Ferland G. J., Martin P. G.* The primordial Helium abundance: Toward understanding and removing the cosmic scatter in the DY/DZ relation // *Astrophys. J.*—2000.—**536**, N 2.—P. 773—777.
5. *Benjamin R. A., Skillman E. D., Smits D. P.* Improving predictions for helium emission lines // *Astrophys. J.*—1999.—**514**, N 1.—P. 307—324.
6. *Benjamin R. A., Skillman E. D., Smits D. P.* Radiative transfer effects in He I emission lines // *Astrophys. J.*—2002.—**569**, N 1.—P. 288—294.
7. *Davidson K., Kinman T. D.* Primordial helium, spectrophotometric technique, and I Zwicky 18 // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1985.—**58**.—P. 321—340.
8. *Dinerstein H. L., Shields G. A.* Reassessing the primordial helium abundance. New observations of NGC 4861 and CG 1116+51 // *Astrophys. J.*—1986.—**311**.—P. 45—57.
9. *Faulkner J.* Surface Helium abundance in horizontal branch and halo B stars // *Nature.*—1967.—**215**, N 5096.—P. 44—45.
10. *Gonzalez Delgado R. M., Leitherer C., Heckman T. M.* Synthetic spectra of H Balmer and He I absorption lines. II. Evolutionary synthesis models for starburst and poststarburst galaxies // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1999.—**125**, N 2.—P. 489—509.
11. *Gonzalez Delgado R. M., Cerviño M., Martins L. P., et al.* Evolutionary stellar population synthesis at high spectral resolution: optical wavelengths // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2005.—**357**, N 3.—P. 945—960.
12. *Izotov Y. I., Thuan T. X.* The primordial abundance of  $^4\text{He}$  revisited // *Astrophys. J.*—1998.—**500**.—P. 188—216.
13. *Izotov Y. I., Stasinska G., Meynet G., et al.* The chemical composition of metal-poor emission-line galaxies in the Data Release 3 of the Sloan Digital Sky Survey // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**448**, N 3.—P. 955—970.
14. *Izotov Y. I., Thuan T. X.* The Primordial abundance of  $^4\text{He}$ : Evidence for non-standard big bang nucleosynthesis // *Astrophys. J. Letter.*—2010.—**710**, N 1.—P. L67—L71.
15. *Izotov Y. 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.
16. *Izotov Y. I., Thuan T. X., Lipovetsky V. A.* The primordial Helium abundance: Systematic effects and a new determination // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1997.—**108**.—P. 01.



17. *Izotov Y. I., Thuan T. X., Stasinska G.* The primordial abundance of  $^4\text{He}$ : A self-consistent empirical analysis of systematic effects in a large sample of low-metallicity H II Regions // *Astrophys. J.*—2007.—**662**, N 1.—P. 15—38.
18. *Luridiana V.* Collisional enhancement of H I Balmer lines in photoionized nebulae // *Astrophys. and Spase. Sci.*—2009.—**324**, N 2-4.—P. 361—365.
19. *Luridiana V., Peimbert A., Peimbert M., et al.* The effect of collisional enhancement of Balmer lines on the determination of the primordial Helium abundance // *Astrophys. J.*—2003.—**592**, N 2.—P. 846—865.
20. *Maeder A.* Stellar yields as a function of initial metallicity and mass limit for black hole formation // *Astron. and Astrophys.*—1992.—**264**, N 1.—P. 105—120.
21. *Pagel B. E. J., Simonson E. A., Terlevich R. J., et al.* The primordial helium abundance from observations of extragalactic H II regions // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1992.—**255**.—P. 325—345.
22. *Peimbert M., Luridiana V., Peimbert A.* Revised primordial Helium abundance based on new atomic data // *Astrophys. J.*—2007.—**666**, N 2.—P. 636—646.
23. *Peimbert M., Torres-Peimbert S.* Chemical composition of H II regions in the Large Magellanic Cloud and its cosmological implications // *Astrophys. J.*—1974.—**193**, N 1.—P. 327—333.
24. *Salvaterra R., Ferrara A.* Is primordial  $^4\text{He}$  truly from the Big Bang? // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2003.—**340**, N 3.—P. L17—L20.
25. *Stasinska G., Izotov Y. I.* Collisional excitation of hydrogen and the determination of the primordial helium abundance from H II regions // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**378**.—P. 817—825.
26. *Whitford A. E.* The law of interstellar reddening // *Astron. J.*—1958.—**63**.—P. 201—207.

Поступила в редакцию 17.02.11