

УДК 524.78

И. А. Зинченко, Л. С. Пилюгин

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680
zinchenko@mao.kiev.ua

Эволюция содержания кислорода и азота в SDSS-галактиках

Предложен новый вариант ON- и NS-калибровок (ON11- и NS11-калибровки) для определения содержания кислорода и азота в областях H II. Предложены также новые критерии разделения туманностей на три класса: холодные, теплые и горячие. ON11- и NS11-калибровки обеспечивают более высокую точность определения содержаний кислорода и азота по интегральным эмиссионным спектрам по сравнению с ON- и NS-калибровками. Определено содержание кислорода и азота для выборки 57470 SDSS-галактик с использованием ON11- и NS11-калибровок. Измеренные потоки в сильных линиях в SDSS-спектрах этих галактик взяты из каталога MPA/JHU. Построена диаграмма «масса — металличность» для нескольких диапазонов красных смещений. Найдено, что межзвездная среда галактик с массой $\lg M/M_{\odot} > 11.3$ за последние 4 млрд лет, что соответствует диапазону красных смещений $z = 0...0.4$, практически не обогатилась ни кислородом, ни азотом. Это значит, что активная стадия звездообразования в массивных галактиках закончилась более 4 млрд лет назад. Для галактик меньшей массы изменения содержания азота и кислорода за указанный период увеличиваются с уменьшением массы галактики.

ЕВОЛЮЦІЯ ВМІСТІВ КИСНЮ І АЗОТУ В SDSS-ГАЛАКТИКАХ, Зінченко І. А., Пілюгін Л. С. — Запропоновано новий варіант ON- і NS-калібрувань (ON11- і NS11-калібрування) для визначення вмістів кисню і азоту в областях H II. Запропоновано нові критерії поділу туманностей на три класи: холодні, теплі та гарячі. ON11- і NS11-калібрування забезпечують вищу точність визначення вмістів кисню і азоту по інтегральних емісійних спектрах у порівнянні з ON- і NS-калібруваннями. Визначено вмісти кисню і азоту для вибірки 57470

SDSS-галактик з використанням ON11- і NS11-калібрувань. Виміри потоків у сильних лініях у SDSS-спектрах цих галактик отримано із каталогу MPA/JHU. Побудовано діаграму «маса — металічність» для кількох діапазонів червоних зміщень. Встановлено, що міжзоряне середовище галактик з масою $\lg(M/M_{\odot}) > 11.3$ за останні 4 млрд років, що відповідає інтервалу червоних зміщень $z = 0 \dots 0.4$, майже не збагатилось ні киснем, ні азотом. Це значить, що активна стадія зореутворення у масивних галактиках закінчилась більш ніж 4 млрд років тому. Для галактик меншої маси зміна вмісту азоту і кисню за вказаний період збільшується зі зменшенням маси галактики.

EVOLUTION OF OXYGEN AND NITROGEN ABUNDANCES IN SDSS GALAXIES, by Zinchenko I. A., Pilyugin L. S. — New expressions for the ON and NS calibrations (ON11 and NS11 calibrations) for the determination of oxygen and nitrogen abundances in H II regions are proposed. New criteria to divide the H II regions into three classes (hot, warm and cold) are also suggested. The ON11 and NS11 calibrations provide more accurate abundance determination from global spectra in comparison to the ON and NS calibrations. The O and N abundances are estimated for a sample of 57470 SDSS galaxies using the ON11 and NS11 calibrations. The strong line flux measurements for the SDSS spectra of those galaxies are taken from the MPA/JHU catalogue. A mass — metallicity diagram for several redshift ranges are constructed. It is found that the interstellar medium of galaxies with high masses $\lg(M/M_{\odot}) > 11.3$ was not enriched in both oxygen and nitrogen during the last 4 Gyrs (corresponding to the redshift interval $z = 0 — 0.4$). This indicates that the significant star formation in those galaxies was completed more than 4 Gyrs ago. For galaxies of lower masses, the changes in oxygen and nitrogen abundances increase with decreasing the mass of a galaxy for the time under consideration.

ВВЕДЕНИЕ

Предположение о том, что свойства областей H II в галактиках поздних типов коррелируют с макроскопическими характеристиками галактик, таких как светимость и морфологический тип галактики, появилось еще в середине 1970-х гг. [31]. Леке и др. [19] обнаружили, что содержание кислорода в неправильных галактиках увеличивается с увеличением массы галактик. Эта корреляция получила название зависимость «масса — металличность». В конце 1980-х годов такая корреляция была обнаружена Гарнеттом и Шилдсом [11] и для спиральных галактик. Они нашли, что содержание кислорода в диске спиральной галактики также коррелирует со светимостью галактики.

Так как точные значения масс известны только для небольшого количества близких галактик, а массы остальных галактик оцениваются методами, основанными на интерпретации интегральных спектров и светимостей галактик [34—36], то во многих случаях исследуется не

зависимость «масса — металличность», а зависимость «светимость — металличность» [3, 24, 29, 30]. Однако из-за красного смещения при наблюдениях галактик на разных расстояниях светимости в данном спектральном диапазоне будут разными [15]. Влияние этого эффекта возрастает с увеличением расстояния до галактики и уменьшением спектрального диапазона фильтра, в котором измеряется светимость галактики. Наличие в спектре сильных и узких эмиссионных линий еще более усложняет приведение светимости галактик на разных расстояниях к единой шкале. Поскольку целью данной работы является исследование эволюции содержания кислорода и азота в галактиках различных масс за последние 4 млрд лет, что соответствует красному смещению $z \approx 0.4$, мы будем использовать массы галактик, а не светимости.

В результате проведения спектральных обзоров, таких как KISS (KPNO International Spectroscopic Survey), 2dF Galaxy Redshift Survey, за последнее десятилетие получены спектры большого количества галактик с эмиссионными линиями. Измеренные интенсивности сильных линий в этих спектрах используются для определения содержания кислорода в галактиках и исследования зависимости «светимость — металличность» [18, 22]. Отдельно следует отметить базу данных цифрового обзора неба Sloan Digital Sky Survey (SDSS) [38], которая содержит более 1.6 млн спектров и покрывает площадь неба, превышающую 9000 кв. градусов. Значительная часть спектров в каталоге принадлежит внегалактическим областям H II. SDSS-спектры покрывают диапазон длин волн $\lambda = 380\text{--}920$ нм. Широкий спектральный диапазон дает возможность измерять параметры эмиссионных линий ионов кислорода, азота и других химических элементов. При сравнительно высоком отношении сигнал/шум это позволяет достаточно надежно определять химический состав межзвездной среды галактик, в которых наблюдаются эмиссионные линии областей H II.

Тремonti и др. [36] при помощи собственного варианта одномерной R_{23} -калибровки, использующей в качестве индикатора металличности интенсивностей линий $R_{23} = ([\text{O II}] \lambda 372.7 + [\text{O III}] \lambda 495.9, 500.7)/\text{H}$, определили содержание кислорода в 53000 SDSS-галактик и построили диаграммы «светимость — металличность» и «масса — металличность». Найдено среднее значение содержания кислорода в галактиках высокой светимости $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) \approx 8.65$. В работе [10] при помощи N2-калибровки ($\text{N2} = [\text{N II}] \lambda 654.8/\text{H}$) содержание кислорода в тех же галактиках было переопределено, и получено среднее значение $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) \approx 8.65$. В работе [5] определены содержания кислорода в 82302 галактиках из обзора SDSS при помощи O_3N_2 -калибровки ($\text{O}_3\text{N}_2 = [\text{O III}] \lambda 500.7/[\text{N II}] \lambda 658.4$), предложенной Стасиньской [32]. Полученные значения на 0.3 dex ниже значений [36]. Однако они на 0.2 dex выше значений, найденных при помощи классического T_e -метода, который основан на идее Амбарцумяна [1] о том, что электронную температуру (и химический состав) туманности

можно определить по отношению интенсивностей небулярных и авроральных линий. Таким образом, найденное значение содержания кислорода в галактике сильно зависит от используемой калибровки [17].

Туан и др. [33] исследовали эволюцию содержания кислорода и азота в зависимости от красного смещения и масс SDSS-галактик в диапазоне красных смещений $0.02 < z < 0.3$. Было показано, что галактики с массами более $\lg(M/M_{\odot}) = 11.2$ за последние 3 млрд лет не обогащались ни кислородом, ни азотом, а галактики в диапазоне масс $11.0 < \lg(M/M_{\odot}) < 11.2$ не обогащались кислородом, но обогащались азотом. Найденное среднее значение содержания кислорода и азота в массивных галактиках составляет $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.67$ и $12 + \lg(\text{N}/\text{H}) = 7.88$.

При исследовании эволюции содержания кислорода и азота в галактиках необходимо надежно определить содержания кислорода и азота. В работах [25, 28] было показано, что содержания кислорода и азота в областях Н II достаточно надежно определяются при помощи NS- и ON-калибровок. При построении NS- и ON-калибровок в качестве калибровочных точек использовались области Н II в близких галактиках, в которых содержания кислорода и азота определялись классическим T_e -методом (доступны для измерения слабые авроральные линии кислорода [O III] 436.3 нм и/или азота [N II] 575.5 нм). Области Н II разделены на три класса: холодные, теплые и горячие. Для каждого класса получены свои соотношения между содержаниями химических элементов и индикаторами металличности, что обеспечивает более высокую точность калибровок, чем в случае одного соотношения для всех областей Н II.

Спектры далеких SDSS-галактик являются интегральными спектрами всей галактики (или значительной ее части), а значит, области Н II с разными физическими условиями могут вносить вклад в интегральный (суммарный) спектр объекта. В работе [2] показано, что для холодных SDSS-туманностей наблюдается хорошее согласие между содержаниями кислорода и азота, определенными при помощи NS- и ON-калибровок. Однако в работе [27] указывается на возможную переоценку содержания тяжелых элементов в случае применения NS- и ON-калибровок к интегральным спектрам галактик промежуточной металличности $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) \approx 8.1$. Галактики с такими значениями содержания кислорода классифицируются как теплые или горячие области Н II. Поэтому, прежде чем приступать к определению содержания кислорода и азота в SDSS-объектах, мы исследуем надежность значений металличностей, определяемых при помощи NS- и ON-калибровок по интегральным эмиссионным спектрам. Для этого мы воспользуемся методикой, детально описанной в работе [2].

В работе использованы стандартные обозначения для интенсивностей эмиссионных линий:

$$R_2 = [\text{O II}] \lambda_{372.7} \lambda_{372.9} I_{[\text{O III}] \lambda_{372.7} \lambda_{372.9}} / I_{\text{H}} ,$$

$$R_3 \quad [\text{O III}] \quad 495.9 \quad 500.7 \quad I_{[\text{OIII}]} \quad 495.9 \quad 500.7 / I_{\text{H}} ,$$

$$N_2 \quad [\text{N II}] \quad 654.8 \quad 658.4 \quad I_{[\text{NII}]} \quad 654.8 \quad 658.4 / I_{\text{H}} ,$$

$$S_2 \quad [\text{S II}] \quad 671.7 \quad 673.1 \quad I_{[\text{SII}]} \quad 671.7 \quad 673.1 / I_{\text{H}} .$$

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЙ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Исследование достоверности содержаний кислорода и азота, найденных при помощи NS- и ON-калибровок по интегральным спектрам. Для проверки надежности содержаний, вычисленных с использованием NS- и ON-калибровок по интегральным спектрам, мы воспользуемся двумя выборками объектов:

1) выборка 309 областей H II в близких галактиках, для которых имеются измерения интенсивностей сильных небулярных линий R_2 , R_3 , N_2 и S_2 [7—9, 16, 37];

2) выборка SDSS-галактик с эмиссионными спектрами (эта выборка будет детально описана ниже).

В ON-калибровке как индикатор металличности и электронной температуры используется комбинация небулярных линий ионов [O II], [O III] и [N II]. Уравнения для определения содержаний кислорода и азота приведены в работе [28]. В NS-калибровке для определения содержаний кислорода и азота используются интенсивности небулярных линий ионов [O III], [N II] и [S II]. Уравнения NS-калибровки детально описаны в работе [25].

Как было отмечено выше, спектры SDSS покрывают интервал длин волн от 380 до 920 нм. Поэтому спектры близких объектов (с красными смещениями $z < 0.023$) не содержат небулярной линии кислорода [O II] 372.7 нм, которая используется в ON-калибровке, а спектры далеких объектов (с красными смещениями $z > 0.37$) не содержат дублет небулярных линий серы [S II] 671.7, 673.1 нм. Интенсивности линий серы [S II] 671.7, 673.1 нм входят не только в уравнения NS-калибровки, но и в критерий разделения областей H II на теплые и горячие, что делает невозможным применение обеих калибровок для определения металличностей далеких объектов. Поэтому для сравнения металличностей, полученных при помощи разных калибровок, мы выбрали только те спектры, которые имеют полный набор линий, необходимых для применения обеих калибровок. Так как интенсивность линии на границе спектрального диапазона приемника излучения измеряется хуже, чем интенсивность линии, далекой от границы спектрального диапазона приемника, при сравнении металличностей мы исключили спектры галактик, линии [O II] или [S II] для которых находятся вблизи границ спектрального диапазона = 380...920 нм. По этой причине значения содержания кислорода и азота при помощи ON-калибровки были вычислены для галактик из обзора SDSS с красными смещениями $0.026 < z < 0.3$. При вычислении

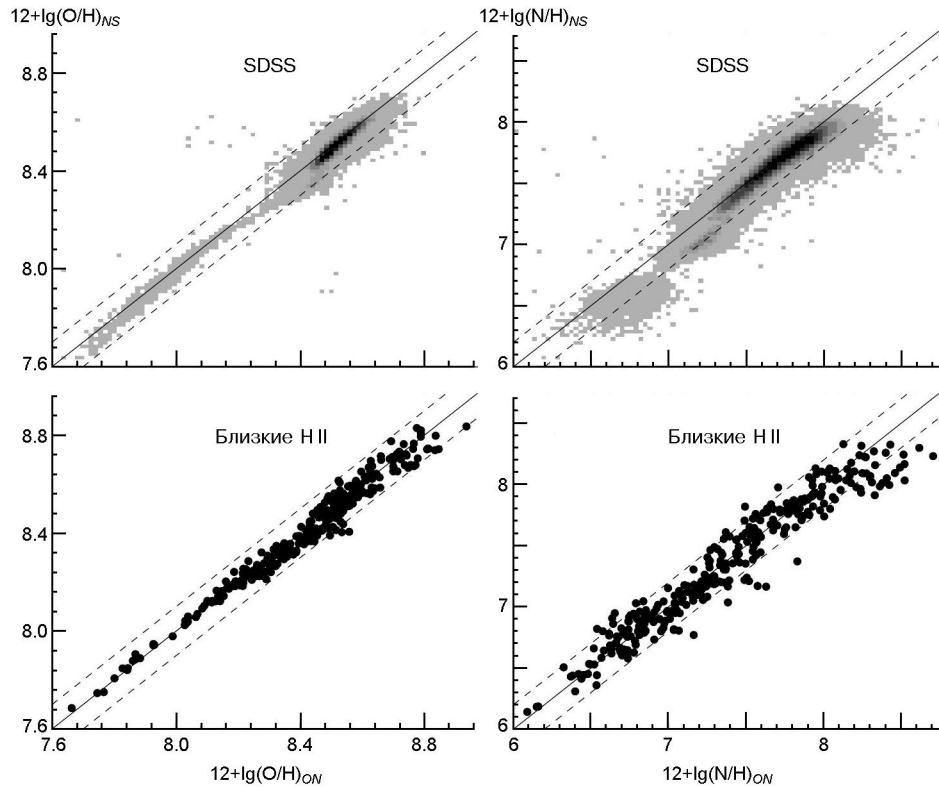


Рис. 1. Сравнение значений содержаний кислорода $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$ и азота $12 + \lg(\text{N}/\text{H})$, найденных с помощью ON- и NS-калибровок для нашей выборки SDSS-объектов (верхние панели) и выборки областей H II в близких галактиках (нижние панели). Сплошная линия — линия равных значений металличности, штриховые линии — отклонение 0.1 dex (для кислорода) и 0.2 dex (для азота)

значения содержания кислорода и азота по NS-калибровке диапазон допустимых красных смещений был расширен до $z = 0.0 \dots 0.3$.

Чтобы оценить надежность значений содержаний кислорода и азота, полученных при помощи ON- и NS-калибровок, мы рассмотрели диаграмму O/H — N/O для каждой из калибровок. Для сравнения полученных металличностей SDSS-галактик мы рассмотрели галактики, металличности для которых вычислены при помощи обеих калибровок, т. е. только галактики в диапазоне $0.026 < z < 0.3$. При построении диаграммы O/H — N/O диапазон красных смещений SDSS-галактик выбирался соответственно применяемой калибровке.

На рис. 1 сравниваются значения содержаний кислорода и азота, найденные с помощью ON- и NS-калибровок для нашей выборки SDSS-объектов (верхняя панель) и выборки областей H II в близких галактиках (нижняя панель). Сплошная линия соответствует равенству металличностей, штриховые линии — отклонению 0.1 dex для кислорода и 0.2 dex для азота. Видно, что содержания кислорода для подавляющего большинства SDSS-объектов с высокой и низкой металличностью (холодных и горячих областей H II соответственно) со-

гласуются с точностью не хуже 0.05 dex. Однако для галактик в диапазоне значений $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.2 \dots 8.4$ видны систематические расхождения, хотя и в этом случае расхождение не превышает 0.1 dex. На неточность определения содержания кислорода в галактиках с металличностями в этом диапазоне также указывает практически полное отсутствие галактик со значениями содержания кислорода $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$

8.2. Данное значение металличности соответствует границе между теплыми и горячими областями H II. Для областей H II в близких галактиках значительных систематических расхождений между полученными при помощи NS- и ON-калибровок значениями содержаний кислорода нет.

Сравнение содержаний азота, вычисленных при помощи NS- и ON-калибровок, показывает, что для SDSS-объектов промежуточной и низкой металличности также наблюдаются систематические расхождения между значениями содержания азота, найденными при помощи NS- и ON-калибровок. Практически отсутствуют SDSS-объекты со значениями содержания азота $12 + \lg(\text{N}/\text{H}) \approx 7.0$, которое соответствует границе между теплыми и горячими областями H II. Для областей H II в близких галактиках систематических расхождений между полученными при помощи NS- и ON-калибровок значениями содержаний азота нет.

Другим способом проверки достоверности найденных значений содержаний азота и кислорода, а следовательно, и надежности применяемых для определения содержаний калибровок, является сравнение значений содержания кислорода и азота для туманностей, вычисленных при помощи калибровок, и значений содержания, вычисленных прямым T_e -методом. На рис. 2 представлены диаграммы O/H — N/O для выборки SDSS-галактик и областей H II в близких галактиках, для которых содержания кислорода и азота вычислены по ON- и NS-калибровкам. Серым цветом показаны SDSS-галактики, точками — области H II в близких галактиках, квадратами показаны калибровочные области H II (содержания кислорода и азота в которых вычислены прямым T_e -методом). Подавляющее большинство SDSS-объектов, содержание кислорода в которых превышает $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.4$, на диаграмме O/H — N/O находится в той же самой области, что и калибровочные области H II. Но на диаграмме O/H — N/O для SDSS-галактик виден пробел вблизи $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.2$, наиболее четко выраженный в случае использования ON-калибровки. Для областей H II в близких галактиках пробела не наблюдается. Однако у части горячих областей H II в близких галактиках, металличности которых определены при помощи ON-калибровки, наблюдается заниженное значение отношения N/O.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Для холодных туманностей ON- и NS-калибровки дают достоверные значения содержаний азота и кислорода в случае интегральных спектров SDSS-галактик.

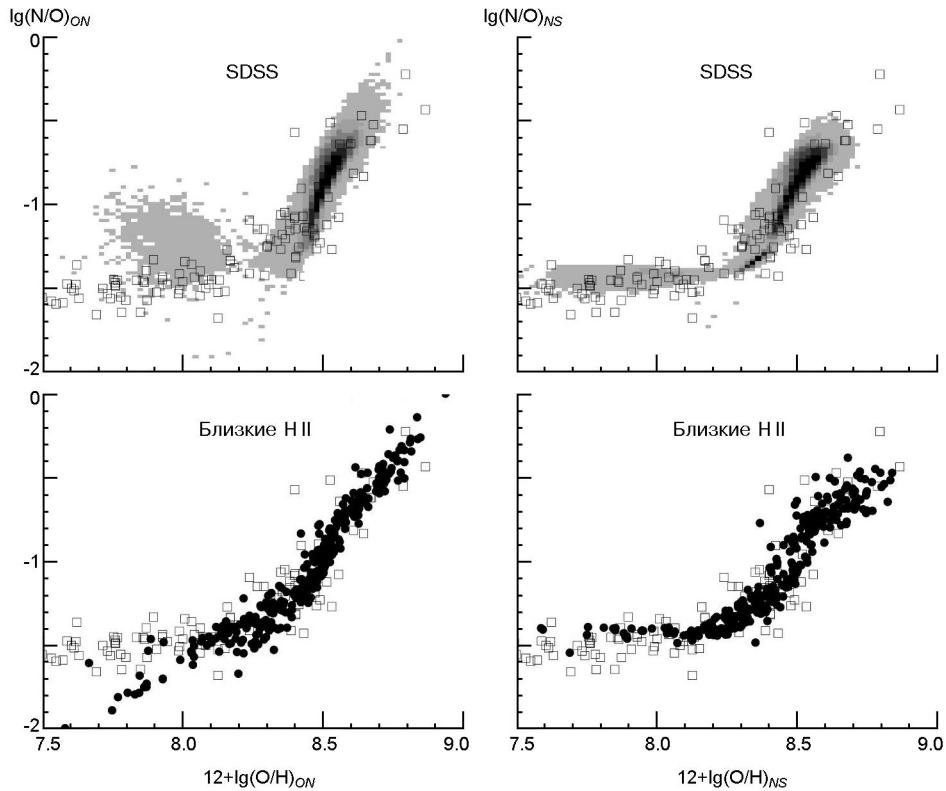


Рис. 2. Диаграмма O/H — N/O для нашей выборки SDSS-объектов (верхние панели) и выборки областей H II в близких галактиках (нижние панели). Содержания кислорода и азота вычислены при помощи ON- и NS-калибровок: точки — значения для областей H II в близких галактиках, квадратики — значения для областей H II, вычисленные T_e -методом

2. Для теплых и горячих SDSS-объектов ON- и NS-калибровки могут давать значения содержаний кислорода и азота, которые отличаются друг от друга и могут систематически расходиться со значениями, вычисленными при помощи T_e -метода. В частности, ON- и NS-калибровки дают ненадежные значения содержаний кислорода и азота для SDSS-объектов, которые лежат вблизи границы между теплыми и горячими областями H II.

Новые варианты параметрических N-калибровок: NS11- и ON11-калибровки. Итак, нужно построить новые варианты параметрических N-калибровок, которые должны обеспечивать более надежное определение содержаний кислорода и азота для областей H II промежуточных и низких металличностей. Далее мы будем ссылаться на новые варианты калибровок как на NS11- и ON11-калибровки.

При построении новых вариантов параметрических N-калибровок в качестве калибровочных точек мы использовали те же области H II в близких галактиках, которые использовались при построении NS- и ON-калибровок. Содержания кислорода и азота в калибровочных областях H II были определены классическим T_e -методом при помощи

уравнений из работы [28]. Содержания кислорода и азота, определенные при помощи T_e -метода, также могут содержать ошибки. Анализ диаграммы O/H — N/O позволяет исключить области H II с большими ошибками определения содержания кислорода и азота и/или объекты с пекулярным отношением N/O. В работе [27] была получена аппроксимация зависимости O/H — N/O, которая представлена в виде двух участков. При содержаниях кислорода $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) < 8.14$ отношение N/O принимается постоянным, а при $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) > 8.14$ величина $\lg(\text{N}/\text{O})$ линейно увеличивается с увеличением содержания кислорода $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$. При построении ON11- и NS11-калибровок использовались только области H II, отношение содержания азота к содержанию кислорода в которых отличается от аппроксимации не более чем на 0.3 dex. Таким образом, для построения калибровок было использовано 108 из 112 калибровочных точек.

Как и в ON- и NS-калибровках, в новых калибровках также применяется разделение областей H II на три класса: холодные, теплые и горячие. Но критерии разделения изменены. На рис. 3 показан новый вариант разделения, который используется в ON11- и NS11-калибровках. Для холодных объектов выполняется условие $\lg N_2 > -0.35$. Туманности, удовлетворяющие условиям $\lg N_2 < -0.35$ и $\lg(R_3/N_2) < 1.4$, будем называть теплыми, а удовлетворяющие условиям $\lg N_2 < -0.35$ и $\lg(R_3/N_2) > 1.4$ — горячими. Пунктирные линии разделяют холодные, теплые и горячие области H II. Условие $\lg N_2 = -0.35$, при помощи которого выделяются холодные области H II, отличается от аналогичного условия, применяемого в NS- и ON-калибровках, только измененным значением интенсивности линии N_2 . Уменьшение параметра $\lg N_2$ с -0.1 до -0.35 приводит к увеличению диапазона металличностей областей H II, которые классифицируются как холодные. Поэтому можно ожидать увеличения надежности определения значений коэффициентов в калибровочном соотношении между металличностью и индикаторами металличности для холодных областей H II.

Предложенное для разделения теплых и горячих областей H II условие $\lg(R_3/N_2) = 1.4$ имеет несколько преимуществ перед условием

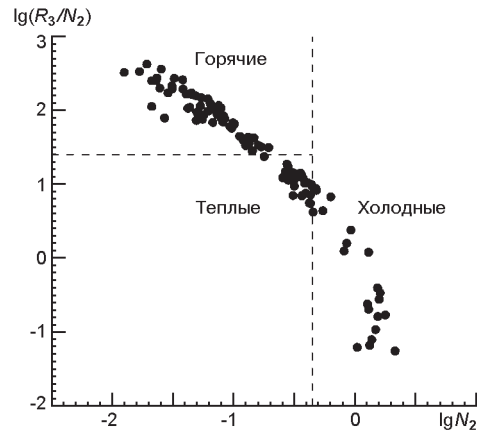


Рис. 3. Разделение областей H II, которые использовались при построении ON11- и NS11-калибровок, на холодные, теплые и горячие. Штриховые линии разделяют холодные ($\lg N_2 > -0.35$), теплые ($\lg N_2 < -0.35$ и $\lg(R_3/N_2) < 1.4$) и горячие ($\lg N_2 < -0.35$ и $\lg(R_3/N_2) > 1.4$) области H II

$\lg(N_2/S_2) = -0.25$, которое применяется для разделения теплых и горячих областей Н II в NS- и ON-калибровках. Во-первых, можно ожидать, что условие $\lg(R_3/N_2) = 1.4$ обеспечивает более надежное разделение по металличности (и температуре). Это можно ожидать из следующих соображений. Рассмотрим двухзонную модель области Н II. Атомы кислорода во внутренней зоне туманности находятся в дважды ионизированном состоянии O^{++} , а во внешней зоне — в виде иона O^+ . Чем выше температура туманности, тем больше размер области свечения [O III] по отношению к размеру зоны свечения [O II]. Как известно, с увеличением содержания тяжелых элементов температура туманности уменьшается. Поэтому размер зоны свечения [O III] по отношению к размеру зоны свечения [O II] уменьшается с увеличением содержания кислорода. Отношение размеров зон свечения [O III] и [O II] можно характеризовать параметром R_3/R_2 . Но линия R_2 находится в коротковолновой части спектра и не всегда есть в SDSS-спектрах. Кроме того, точные измерения этой линии затруднены из-за того, что в коротковолновой части оптического спектра межзвездное поглощение света проявляется наиболее сильно. Поэтому вместо интенсивности линии R_2 мы будем использовать интенсивность линии N_2 . Есть основания полагать, что зоны свечения O^+ и N^+ близки, так как потенциалы первой и второй ионизации для атомов кислорода и азота близки. Во-вторых, если в спектре туманности по каким-либо причинам отсутствует линия S_2 , то можно было бы использовать ON-калибровку для определения металличности, так как в соотношениях ON-калибровки не используется линия S_2 . Но со старым критерием невозможно определить, принадлежит ли туманность к горячим или к теплым областям Н II. С другой стороны, в соотношениях NS-калибровки не используется линия R_2 . Отказ от применения линий S_2 и R_2 для классификации туманностей позволяет использовать минимальный набор линий при классификации и вычислении содержаний химических элементов по обеим калибровкам: R_2, R_3 и N_2 для ON-калибровки и R_3, N_2 и S_2 для NS-калибровки. Итак, при разделении областей Н II на холодные, теплые и горячие мы будем использовать критерии, приведенные в таблице.

Следует отметить, что четко выраженной границы между холодными, теплыми и горячими областями Н II нет. Области Н II, лежащие возле границы между теплыми и горячими (холодными и теплыми) областями Н II имеют близкие металличности. Следовательно, калиб-

Разделение областей Н II на холодные, теплые и горячие, которое используется в ON11- и NS11-калибровках

Класс областей Н II	Критерии классификации
Холодные	$\lg N_2 > -0.35$
Теплые	$\lg N_2 < -0.35, \lg(R_3/N_2) < 1.4$
Горячие	$\lg N_2 < -0.35, \lg(R_3/N_2) > 1.4$

ровочные соотношения должны удовлетворять условию сшивки на обеих разделительных границах, т. е. на разделительной границе соотношения для двух классов областей Н II должны давать одинаковые значения металличностей. Чтобы добиться выполнения этого требования, мы поступили следующим образом. При поиске коэффициентов калибровочных соотношений для определения металличностей холодных областей Н II в качестве калибровочных точек мы использовали не только холодные области Н II, но и часть теплых областей Н II, которые лежат вблизи разделительной линии. Другими словами, мы использовали не только объекты, удовлетворяющие условию $\lg N_2 > -0.35$, но и объекты, для которых $\lg N_2 > -0.45$. Аналогичным образом были расширены диапазоны значений $\lg N_2$ и $\lg(R_3/N_2)$ для теплых и горячих калибровочных точек. Таким образом, при нахождении коэффициентов в уравнениях калибровок было обеспечено перекрытие диапазонов областей Н II, принадлежащих разным классам.

При использовании линий ионов кислорода R_2 и R_3 в качестве индикаторов металличности необходимо учитывать тот факт, что одному значению такого индикатора металличности могут соответствовать два существенно различающихся значения содержания кислорода или азота. Это известная проблема «двойных значений» калибровок, использующих в качестве индикатора металличности сумму интенсивностей линий ионов кислорода $R_{23} = R_2 + R_3$. В случае предложенного для новых калибровок разделения областей Н II на три класса в пределах каждого класса каждому значению $\lg R_{23}$, $\lg R_3$ и $\lg R_2$ соответствуют близкие значения содержания кислорода.

Для поиска значений коэффициентов в уравнениях новых калибровок был использован алгоритм Левенберга — Марквардта [20, 21]. Для определения содержания кислорода в холодных, теплых и горячих областях Н II при помощи ON11-калибровки получены следующие соотношения:

$$\begin{aligned}
 & 12 \lg(\text{O} / \text{H})_{\text{ON11}} \\
 & 8.615 \quad 0.021 \lg(R_3) \quad 0.009 \lg(R_2) \quad 0.296 \lg(N_2 / R_2) \quad (1)
 \end{aligned}$$

при $\lg N_2 > -0.35$,

$$\begin{aligned}
 & 12 \lg(\text{O} / \text{H})_{\text{ON11}} \\
 & 8.833 \quad 0.038 \lg(R_3) \quad 0.413 \lg(R_2) \quad 0.779 \lg(N_2 / R_2) \quad (2)
 \end{aligned}$$

при $\lg N_2 < -0.35$ и $\lg(R_3/N_2) < 1.4$,

$$\begin{aligned}
 & 12 \lg(\text{O} / \text{H})_{\text{ON11}} \\
 & 8.097 \quad 0.911 \lg(R_3) \quad 0.641 \lg(R_2) \quad 0.800 \lg(N_2 / R_2) \quad (3)
 \end{aligned}$$

при $\lg N_2 < -0.35$ и $\lg(R_3/N_2) > 1.4$.

Для определения содержания азота при помощи ON11-калибровки получены соотношения

$${}_{12} \lg(N/H)_{ON11} = 7.967 + 0.1181 \lg(R_3) + 0.1291 \lg(N_2) + 1.0431 \lg(N_2/R_2) \quad (4)$$

при $\lg N_2 > -0.35$,

$${}_{12} \lg(N/H)_{ON11} = 8.083 + 0.1601 \lg(R_3) + 0.4181 \lg(N_2) + 1.0851 \lg(N_2/R_2) \quad (5)$$

при $\lg N_2 < -0.35$ и $\lg(R_3/N_2) < 1.4$,

$${}_{12} \lg(N/H)_{ON11} = 7.566 + 0.8601 \lg(R_3) + 0.4801 \lg(N_2) + 1.0321 \lg(N_2/R_2) \quad (6)$$

при $\lg N_2 < -0.35$ и $\lg(R_3/N_2) > 1.4$.

Для определения содержания кислорода и азота в холодных, теплых и горячих областях Н II при помощи NS11-калибровки получены следующие соотношения:

$${}_{12} \lg(O/H)_{NS11} = 8.436 + 0.1481 \lg R_3 + 0.0011 \lg S_2 + 0.3121 \lg(N_2/S_2) \quad (7)$$

при $\lg N_2 > -0.35$,

$${}_{12} \lg(O/H)_{NS11} = 8.655 + 0.1841 \lg R_3 + 0.5181 \lg N_2 + 0.4681 \lg(N_2/S_2) \quad (8)$$

при $\lg N_2 < -0.35$ и $\lg(R_3/N_2) < 1.4$,

$${}_{12} \lg(O/H)_{NS11} = 7.892 + 0.9581 \lg R_3 + 0.5671 \lg N_2 + 0.3111 \lg(N_2/S_2) \quad (9)$$

при $\lg N_2 < -0.35$ и $\lg(R_3/N_2) > 1.4$,

$${}_{12} \lg(N/H)_{NS11} = 7.431 + 0.3181 \lg R_3 + 0.3321 \lg S_2 + 1.1811 \lg(N_2/S_2) \quad (10)$$

при $\lg N_2 > -0.35$,

$${}_{12} \lg(N/H)_{NS11} = 7.530 + 0.0111 \lg R_3 + 0.9751 \lg N_2 + 0.8481 \lg(N_2/S_2) \quad (11)$$

при $\lg N_2 < -0.35$ и $\lg(R_3/N_2) < 1.4$,

$${}_{12} \lg(N/H)_{NS11} = 6.475 + 1.0331 \lg R_3 + 0.5111 \lg N_2 + 0.7791 \lg(N_2/S_2) \quad (12)$$

при $\lg N_2 < -0.35$ и $\lg(R_3/N_2) > 1.4$.

Исследование достоверности содержаний кислорода и азота, найденных при помощи NS11- и ON11-калибровок. Чтобы оценить достоверность содержаний кислорода и азота, вычисленных при помощи NS11- и ON11-калибровок, мы сравнили полученные при использовании новых калибровок значения металличностей между со-

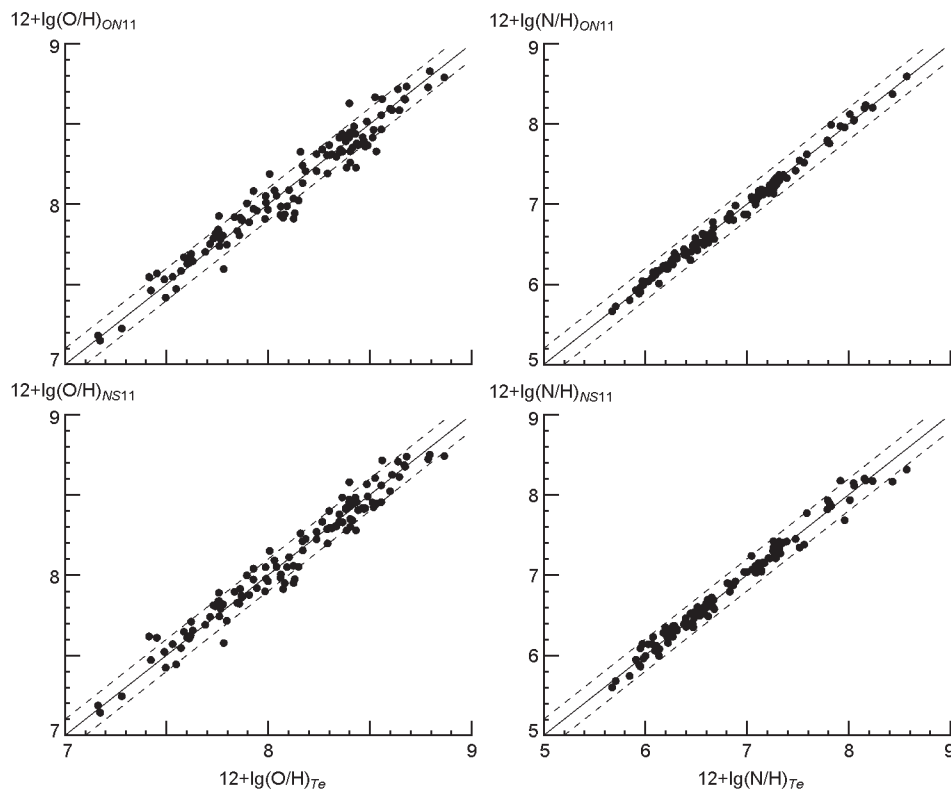


Рис. 4. Сравнение найденных с помощью новых ON11- и NS11-калибровок значений содержаний кислорода $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$ и азота $12 + \lg(\text{N}/\text{H})$ с определенными прямым T_e -методом значениями для использовавшихся при построении калибровок областей H II (см. рис. 1)

бой для разных выборок, а также с металличностями, полученными при помощи T_e -метода для калибровочных областей H II. На рис. 4 сравниваются найденные с помощью ON11- и NS11-калибровок значения содержаний кислорода $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$ и азота $12 + \lg(\text{N}/\text{H})$ и определенные прямым T_e -методом содержания для калибровочных областей H II. Сплошная линия соответствует равенству металличностей, штриховые — отклонению 0.1 dex для кислорода и 0.2 dex для азота. Для большинства областей H II расхождения между определенными при помощи калибровок и T_e -методом значениями содержаний кислорода и азота не превышают 0.1 dex. Средняя квадратичная разность

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\lg(\text{O}/\text{H})_i^{\text{CAL}} - \lg(\text{O}/\text{H})_i^{\text{Te}})^2} \quad (13)$$

между содержаниями, вычисленными при помощи ON-калибровки $(\lg(\text{O}/\text{H})_i^{\text{CAL}})$ и T_e -методом $(\lg(\text{O}/\text{H})_i^{\text{Te}})$, равна $\frac{\text{ON}}{\text{O}/\text{H}} = 0.086$ для кислорода и $\frac{\text{ON}}{\text{N}/\text{H}} = 0.056$ для азота. В случае NS-калибровки средние квадратичные разности для кислорода и азота равны $\frac{\text{NS}}{\text{O}/\text{H}} = 0.077$ и $\frac{\text{NS}}{\text{N}/\text{H}} = 0.091$.

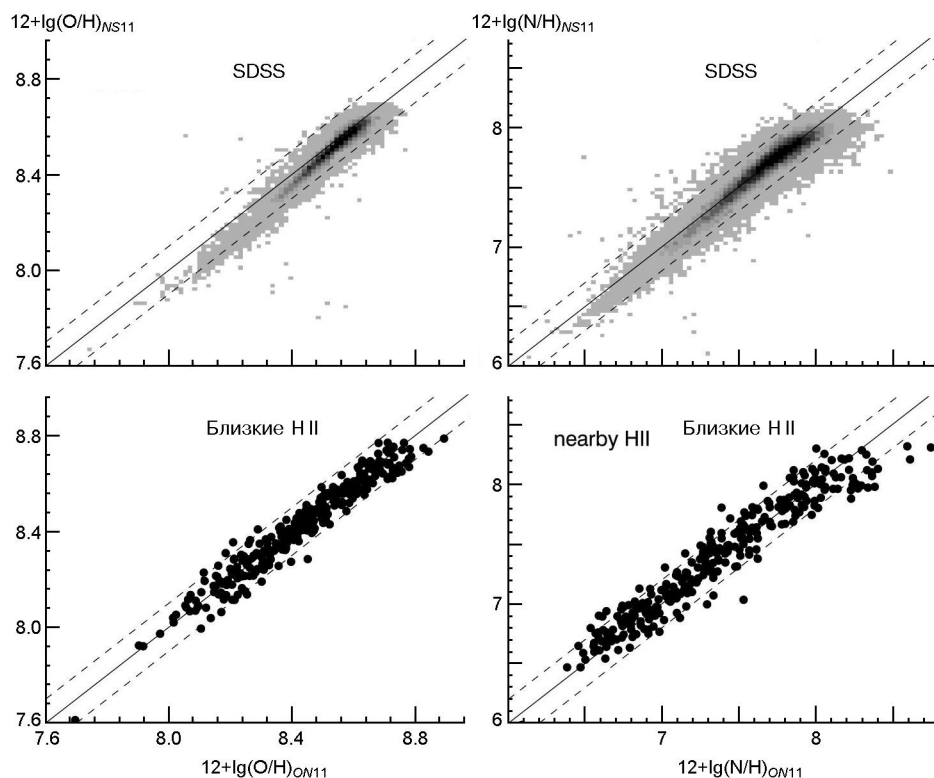


Рис. 5. Сравнение значений содержаний кислорода $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$ и азота $12 + \lg(\text{N}/\text{H})$, найденных с помощью новых ON11- и NS11-калибровок для нашей выборки SDSS-объектов (верхние панели) и выборки областей Н II в близких галактиках (нижние панели). Сплошная линия соответствует равенству металличностей, штриховые линии — отклонению 0.1 dex в случае кислорода и 0.2 dex в случае азота

На рис. 5 показано сравнение значений содержаний кислорода и азота, найденных с помощью ON11- и NS11-калибровок для нашей выборки SDSS-объектов (верхние панели) и выборки областей Н II в близких галактиках (нижние панели). Сплошная линия соответствует равенству металличностей, штриховые линии — отклонению 0.1 dex для кислорода и 0.2 dex для азота. Найденные при помощи ON11- и NS11-калибровок содержания кислорода для подавляющего большинства SDSS-галактик и областей Н II в близких галактиках согласуются с точностью не хуже 0.1 dex. Для SDSS-галактик наблюдается небольшое, не превышающее 0.1 dex, систематическое расхождение между полученными при помощи разных калибровок значениями металличностей, которое увеличивается с уменьшением содержания кислорода. Для областей Н II в близких галактиках нет заметного систематического расхождения между значениями содержаний кислорода, вычисленными при помощи разных калибровок.

Наличие систематического расхождения между значениями содержаний кислорода, вычисленными при помощи разных калибровок,

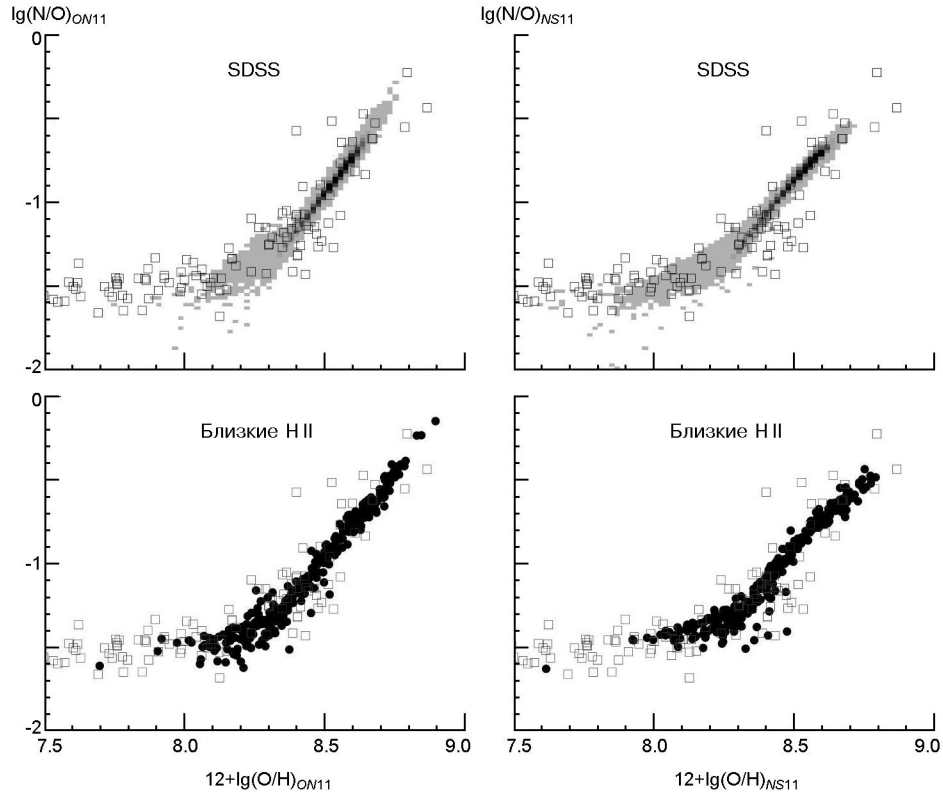


Рис. 6. Диаграмма O/H — N/O для нашей выборки SDSS-объектов (верхние панели) и выборки областей H II в близких галактиках (нижние панели). Содержания кислорода и азота вычислены при помощи новых ON11- и NS11-калибровок. Области H II в близких галактиках обозначены черными кружками. Черные квадратики — области H II, содержания кислорода и азота в которых вычислены T_e -методом

в случае SDSS-галактик может быть обусловлено тем, что вклад в интенсивность спектральных линий вносят одновременно несколько областей H II с разными физическими параметрами, так как SDSS-спектры являются интегральными спектрами галактик. Существенным преимуществом ON11- и NS11-калибровок перед ON- и NS-калибровками является то, что в диапазоне содержаний кислорода $8.2 < 12 + \lg(O/H) < 8.4$ переход от горячих к теплым областям H II происходит постепенно, без резкого изменения металличности. В этом диапазоне содержаний кислорода не наблюдается дефицита объектов. Содержания азота для SDSS-галактик и для областей H II в близких галактиках согласуются с несколько меньшей точностью 0.2 dex. Но систематические расхождения не превышают 0.1 dex. Переход от горячих к теплым областям H II происходит постепенно, без резкого изменения металличности.

На рис. 6 представлены диаграммы O/H — N/O для нашей выборки SDSS-объектов и областей H II в близких галактиках, построенные с использованием вычисленных по ON11- и NS11-калибровкам метал-

личностей. Серым цветом показаны SDSS-галактики, точками — области H II в близких галактиках. Квадратиками показаны калибровочные области H II (содержания кислорода и азота в которых вычислены прямым T_e -методом). Подавляющее большинство SDSS-объектов и областей H II в близких галактиках на диаграмме O/H — N/O находится в той же самой области, что и калибровочные области H II.

Эти факты являются косвенными свидетельствами в пользу того, что ON11- и NS11-калибровки дают достоверные содержания кислорода и азота как для отдельных областей H II, так и для интегральных спектров SDSS-галактик.

ЗАВИСИМОСТЬ «МАССА — МЕТАЛЛИЧНОСТЬ»

Массы галактик. К настоящему времени несколько групп исследователей определили и опубликовали значения масс SDSS-галактик. Массы галактик приведены в каталоге MPA/JHU [<http://www.mpa-garching.mpg.de/SDSS/>, 36]. В каталоге проекта VESPA (VERsatile SPectral Analysis) [<http://www-wfau.roe.ac.uk/vespa/>] приведены данные о массах 800000 галактик, полученные при использовании одного и того же алгоритма и двух моделей звездных популяций [34, 35]. Следуя общепринятой терминологии, мы будем называть эти модели BC03 и M05. Таким образом, для значительной части SDSS-галактик есть три определения значений массы. Это позволяет оценить, насколько хорошо значения массы, полученные при помощи различных алгоритмов и различных моделей звездных популяций, соответствуют друг другу.

На рис. 7 показано сравнение логарифмов масс $\lg M/M_\odot$ из каталога MPA и каталога VESPA (модели BC03 и M05) для SDSS-галактик. Сплошная линия соответствует равенству $\lg M/M_\odot$, штриховые — отклонению 0.5 dex. Расхождения между тремя значениями $\lg M/M_\odot$ для галактики могут превышать 0.5 dex. Между значениями логариф-

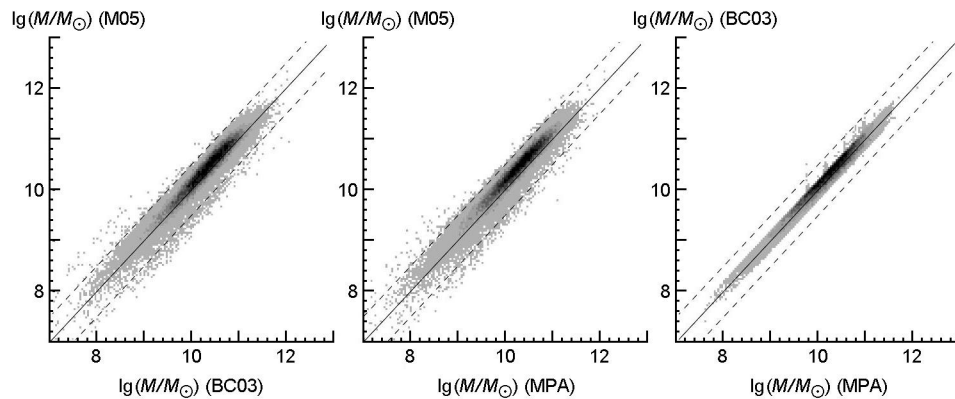


Рис. 7. Сравнение масс из каталога MPA и каталога VESPA (BC03 и M05) для SDSS-галактик. Сплошная линия соответствует равенству масс, штриховые линии — отклонению 0.5 dex

мов масс из каталогов MPA и VESPA наблюдаются также систематические расхождения порядка 0.1—0.2 dex. Мы будем использовать массы из каталога MPA, поскольку он содержит данные о массах большего количества галактик, чем каталог VESPA. При этом мы включили в нашу выборку только галактики, для которых расхождения между значениями масс из каталога MPA и каталога VESPA (модель звездных популяций BC03) не превышают 0.2 dex.

К сожалению, на больших красных смещениях данные о массах имеются для малого числа галактик. Поэтому для галактик на красных смещениях $z > 0.3$, для которых массы в каталоге MPA не приведены, мы вычислили массы способом, предложенным в работе [26].

Выборка галактик. Для исследования диаграммы «масса — металличность» мы создали выборку галактик с эмиссионными спектрами. При создании выборки мы использовали данные из каталога MPA/JHU, а не исходного каталога SDSS, так как измерения интенсивностей линий в каталоге MPA/JHU имеют более высокую точность. Каталог MPA/JHU содержит измерения интенсивностей линий, ошибок измерения интенсивностей линий и красные смещения для большого количества галактик из базы данных SDSS. Сначала из каталога MPA/JHU были выбраны объекты с эмиссионными спектрами, в которых потоки в каждой из линий H α , H β , [O III] 495.9 нм, [O III] 500.7 нм, [N II] 658.4 нм, [S II] 671.7 нм и [S II] 673.1 нм не менее чем в три раза превышают ошибки измерения интенсивностей каждой из линий. Подавляющее большинство внегалактических областей H II имеют низкую плотность [8, 39]. Калибровки также получены в приближении низкой плотности. Индикатором электронной плотности в областях H II является отношение интенсивностей линий [S II] 671.7/[S II] 673.1. Если вычисленное отношение превышает 1.5 (предел отношения [S II] 671.7/[S II] 673.1 при низкой плотности), то это указывает на ненадежность измерений интенсивностей линий. Используя условие $1.25 < F_{[\text{SII}] 671.7}/F_{[\text{SII}] 673.1} < 1.5$, мы исключили объекты с высокой электронной плотностью и значительную часть объектов с ненадежно измеренными интенсивностями линий. Однако в спектрах галактик на красных смещениях $z \sim 0.37$ нет линий [S II] 671.7 и [S II] 673.1 нм. Поэтому мы вынуждены принять, что туманности в этих галактиках также удовлетворяют условию низкой плотности.

Потоки в эмиссионных линиях были исправлены за межзвездное покраснение при помощи аналитической аппроксимации кривой межзвездного покраснения Уитфорда из работы [13]. Коэффициент экстинкции C_H определялся с использованием отношения интенсивностей линий H α и H β . При определении коэффициента экстинкции мы не учитывали наличие абсорбционных компонентов в линиях водорода. Такой упрощенный способ оценки коэффициента экстинкции был использован по следующей причине. Мы использовали измеренные интенсивности линий порядка 50000 объектов из каталога MPA. При

массовых (автоматизированных) измерениях ошибки измерения интенсивностей линий вносят основной вклад в ошибки определения содержаний химических элементов. Оправданность принятого подхода к оценке экстинкции может быть проверена путем сравнения содержания кислорода, найденных при помощи ON11- и NS11-калибровок, поскольку линия [O II] 372.9 нм не используется в соотношениях NS11-калибровки, но используется в ON11-калибровке. Межзвездное поглощение сказывается сильнее всего именно на интенсивности этой коротковолновой линии. Если бы наши оценки экстинкции были неверными, то появились бы значительные систематические расхождения между содержаниями кислорода, определенными при помощи ON11- и NS11-калибровок. Как было показано выше (см. рис. 5), найденные при помощи ON11- и NS11-калибровок содержания кислорода для подавляющего большинства SDSS-галактик согласуются с точностью не хуже 0.1 dex. Это указывает на отсутствие существенного влияния на определяемые при помощи ON11- и NS11-калибровок металличности значения коэффициента экстинкции, найденного с учетом линий поглощения водорода и без него.

В дублете однократно ионизированного азота линия [N II] 658.4 более сильная, чем линия [N II] 654.8 нм, и измерения ее интенсивности более надежны. Так как обе линии образуются при переходах с одного уровня, то отношение их интенсивностей зависит только от отношения коэффициентов спонтанных переходов Эйнштейна для этих переходов, которое равно 3 [12]. Поэтому для суммарного потока в линиях N_2 мы использовали соотношение $N_2 = 1.33[N II] 658.4$ вместо стандартного $N_2 = [N II] 654.8 + [N II] 658.4$.

Мы исследовали только объекты, ионизация которых обусловлена коротковолновым излучением молодых массивных звезд. Чтобы отделить области H II, ионизированные звездами, от туманностей с нетепловым источником ионизации (активных ядер галактик), использовалась классическая классификационная диаграмма [N II] 658.4/H — [O III] 500.7/H [6]. Линия, разделяющая области H II и активные ядра галактик, взята из работы [14].

Как отмечалось выше, мы исключили из выборки галактики, для которых расхождения значений масс из каталога MPA и каталога VESPA (модель звездных популяций BC03) превышают 0.2 dex.

Спектры SDSS были получены и измерены в автоматическом режиме. Поэтому часть спектров может иметь низкое качество или значительные неточности измерения интенсивностей спектральных линий [4]. В работе [26] исследована выборка 2386 эмиссионных галактик на красных смещениях от $z = 0.026$ до $z = 0.4$. В их спектрах были измерены линии H α , H β , [O II] 372.9 нм, [O III] 500.7 нм, [N II] 658.4 нм, [S II] 671.7 нм и [S II] 673.1 нм (последние две только в том случае, когда ни одна из них не выходит за границы спектрального диапазона SDSS). Эти галактики включены в нашу выборку. Наша выборка содержит 57470 объектов.

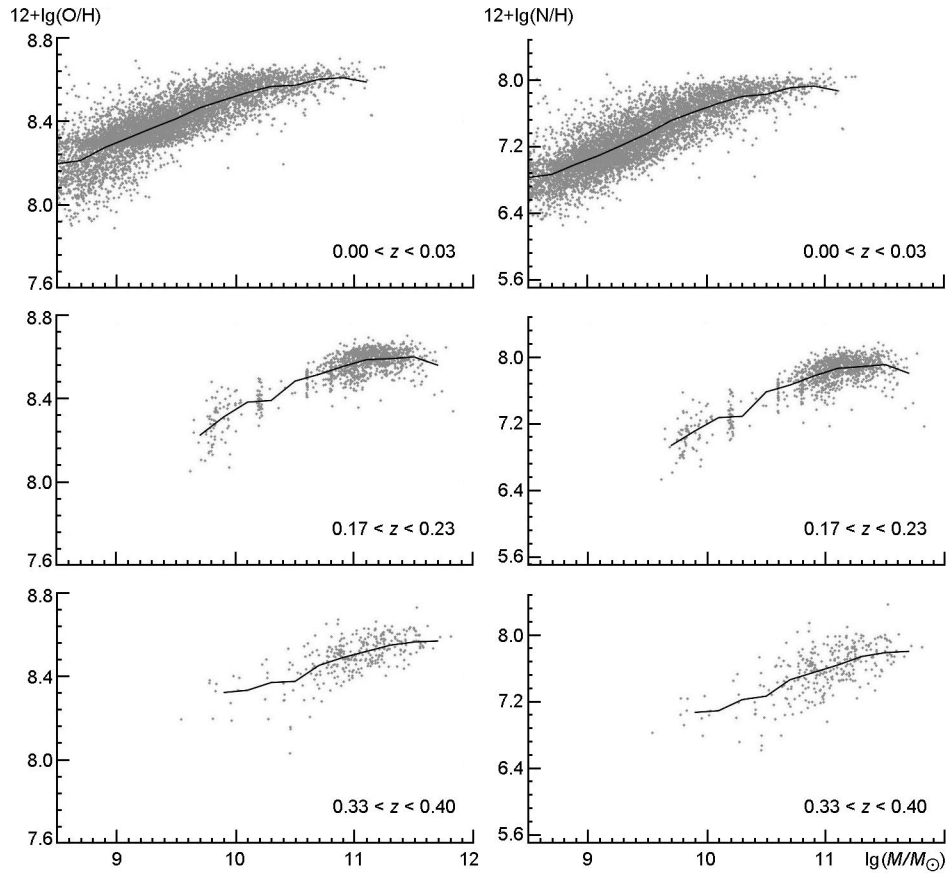


Рис. 8. Диаграмма «масса — металличность» (слева — кислород, справа — азот) для трех диапазонов красных смещений от $z = 0$ до $z = 0.4$. Линиями показаны усредненные зависимости

Исследование эволюции содержаний кислорода и азота. Диаграмма «масса — металличность». Как было отмечено выше, NS11-калибровка позволяет определять содержания кислорода и азота в спектрах SDSS-галактик с красными смещениями $z < 0.37$, а ON11-калибровка — с красными смещениями в диапазоне $0.023 < z < 0.4$. Поэтому для галактик с $z < 0.36$ мы будем использовать металличности, определенные при помощи NS11-калибровки, а для галактик с $z > 0.36$ — определенные при помощи ON11-калибровки.

На рис. 8 представлены диаграммы «масса — металличность» для трех диапазонов красных смещений: $0 < z < 0.03$, $0.17 < z < 0.23$ и $0.33 < z < 0.40$. Слева показаны содержания кислорода в зависимости от массы галактики, справа — содержания азота. Сплошной линией показана зависимость усредненного значения металличности от массы галактик для данного диапазона красных смещений. Для вычисления среднего значения металличности диапазон масс $\lg(M/M_{\odot})$ от 8.5 до 12.0 был разбит на интервалы $\lg(M/M_{\odot}) = 0.1$. В некоторых интервалах масс галактик мало или их вовсе нет. Поэтому средние арифметические значения содержаний кислорода и азота для заданного интер-

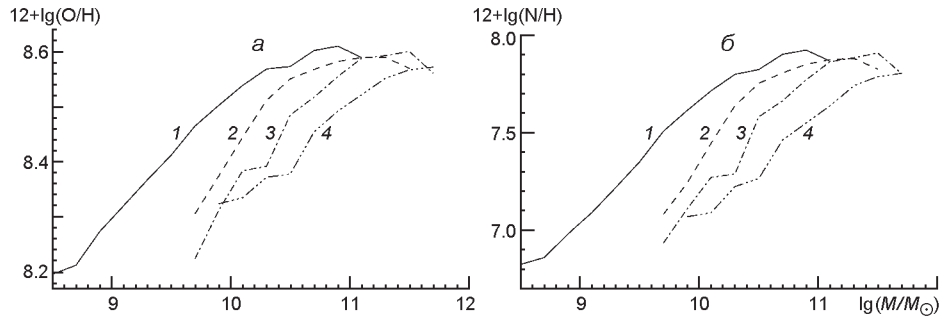


Рис. 9. Зависимость «масса — металличность» (*a* — кислород, *б* — азот) для четырех диапазонов красных смещений: кривая 1 — для $0 < z < 0.03$, 2 — для $0.09 < z < 0.11$, 3 — для $0.17 < z < 0.23$, 4 — для $0.33 < z < 0.40$

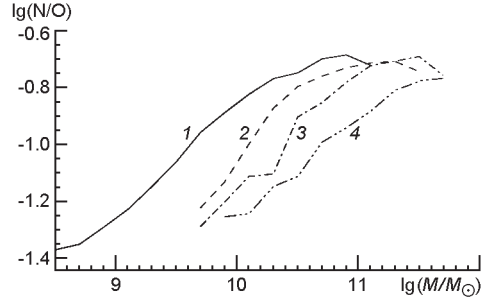
вала масс вычислялись только в том случае, когда количество галактик в заданном интервале превышало 5. Видно, что с увеличением массы галактики содержание кислорода и азота увеличивается до достижения определенной массы M^* . Для галактик с массами выше M^* содержание кислорода (азота) практически не изменяется. Значения масс M^* для кислорода и азота могут быть различными; эти значения увеличиваются с увеличением красного смещения.

Для большей наглядности зависимости «масса — металличность» для разных красных смещений приведены вместе на рис. 9. Добавлен еще один диапазон красных смещений $0.09 < z < 0.11$. Среднее значение содержания химических элементов в массивных галактиках, вычисленное при помощи ON11- и NS11-калибровок, составляет $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.6$ для кислорода и $12 + \lg(\text{N}/\text{H}) = 7.9$ для азота. Полученные при помощи этих калибровок значения содержаний кислорода и азота в массивных галактиках согласуются с данными [10, 33].

Как видно, межзвездная среда галактик с массой $\lg(M/M_\odot) = 11.3$ за последние 4 млрд лет, что соответствует красному смещению $z = 0.4$, практически не обогатилась ни кислородом, ни азотом. Это указывает на то, что активная стадия химической эволюции массивных галактик закончилась более 4 млрд лет назад. В то же время галактики с меньшими массами продолжают свою химическую эволюцию. Темп эволюции выше в галактиках малой массы. Содержания кислорода и азота в галактиках с массой $\lg(M/M_\odot) = 11.0$ за последние 4 млрд лет изменились не более чем на 0.1 dex и 0.2 dex соответственно. Содержание кислорода в галактиках с $\lg(M/M_\odot) = 10.5$ за этот же период увеличилось примерно на 0.2 dex, а содержание азота — на 0.5 dex.

На рис. 10 представлена зависимость «масса галактики — отношение N/O» для четырех диапазонов красных смещений. Отношение N/O усреднялось в интервале $\lg(M/M_\odot) = 0.1$. Видно, что для галактик с массой $\lg(M/M_\odot) = 11.3$ отношение N/O за последние 4 млрд лет практически не изменилось и составляет $\lg(\text{N}/\text{O}) = -0.7 \pm 0.1$. Наличие плато на диаграмме «масса галактики — отношение N/O» в области больших масс подтверждает то, что наиболее массивные галактики

Рис. 10. Зависимость «масса галактики — отношение N/O» для четырех диапазонов красных смещений: кривая 1 — для $0 < z < 0.03$, 2 — для $0.09 < z < 0.11$, 3 — для $0.17 < z < 0.23$, 4 — для $0.33 < z < 0.40$



практически завершили обогащение межзвездной среды как кислородом, так и азотом более 4 млрд лет назад. Для галактик меньшей массы отношение N/O зависит не только от массы, но и от красного смещения галактики. Это происходит из-за того, что обогащение межзвездной среды галактик азотом происходит с задержкой во времени по сравнению с обогащением кислородом. С уменьшением массы галактики изменение отношения N/O за последние 4 млрд лет увеличивается. Для галактик с массами $\lg(M/M_{\odot}) \approx 11.0$ изменение составляет $\lg(N/O) \approx 0.2$, а для меньших галактик ($\lg(M/M_{\odot}) \approx 10.5$) оно равно $\lg(N/O) \approx 0.4$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены новые варианты ON- и NS-калибровок (ON11 и NS11) для определения содержания кислорода и азота в областях H II. Предложены также новые критерии разделения туманностей на три класса: холодные, теплые и горячие. Полученные при помощи ON11- и NS11-калибровок значения содержания кислорода по интегральным SDSS-спектрам согласуются друг с другом с точностью не хуже 0.1 dex для подавляющего большинства объектов. Содержания азота согласуются с точностью 0.2 dex. ON11- и NS11-калибровки обеспечивают более высокую точность определений содержаний кислорода и азота по интегральным эмиссионным спектрам по сравнению с ON- и NS-калибровками.

Определено содержание кислорода и азота для выборки 57470 SDSS-галактик. Измеренные потоки в сильных линиях в SDSS-спектрах этих галактик взяты из каталога MPA/JHU. Построена диаграмма «масса — металличность» для нескольких диапазонов красных смещений от $z = 0$ до $z = 0.4$. Найдено, что межзвездная среда галактик с массой $\lg(M/M_{\odot}) \approx 11.3$ за последние 4 млрд лет (диапазон красных смещений $0 < z < 0.4$) практически не обогатилась ни кислородом, ни азотом. Другими словами, активная стадия звездообразования в массивных галактиках завершилась более 4 млрд лет назад. С уменьшением массы галактики эволюционные изменения содержания азота и кислорода за указанный период быстро увеличиваются. Содержания кислорода и азота в галактиках с массой $\lg(M/M_{\odot}) \approx 11.0$ за последние

4 млрд лет изменились не более чем на 0.1 dex и 0.2 dex соответственно, а для галактик с $\lg(M/M_{\odot}) > 10.5$ — возросли на 0.2 dex и 0.5 dex.

Данная работа была частично финансирована в рамках программы «КосмоМикроФизика» Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины. Авторы благодарны рецензенту за ценные замечания.

1. Амбарцумян В. А. Теоретическая астрофизика. — Л.-М.: ГОН-ТИ, 1935.—255 с.
2. Зинченко И. А., Пилюгин Л. С. Содержание кислорода и азота в холодных областях H II из цифрового обзора неба Sloan // Кинематика и физика небес. тел.—2011.—**27**, № 6.—Р. 3—17.
3. Пилюгин Л. С., Зинченко И. А., Туан Т. Х. Содержание кислорода в гигантских H II галактиках // Кинематика и физика небес. тел.—2010.—**26**, № 5.—Р. 3—25.
4. Abazajian K. N., Adelman-McCarthy J. K., Agueros M. A., et al. The seventh data release of the Sloan Digital Sky Survey // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2009.—**182**, N 2.—Р. 543—558.
5. Asari N. V., Cid Fernandes R., Stasinska G., et al. The history of star-forming galaxies in the Sloan Digital Sky Survey // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—**381**, N 1.—Р. 263—279.
6. Baldwin J. A., Phillips M. M., Terlevich R. Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects // *Astron. Soc. Pacif.*—1981.—**551**, N 93.—Р. 5—19.
7. Bresolin F., Kennicutt R. C. Optical spectroscopy of metal-rich H II regions and circumnuclear hot spots in M83 and NGC 3351 // *Astrophys. J.*—2002.—**572**, N 2.—Р. 838—860.
8. Bresolin F., Schaerer D., Gonzalez Delgado R. M., Stasinska G. A VLT study of metal-rich extragalactic H II regions. I. Observations and empirical abundances // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**441**, N 3.—Р. 981—997.
9. Bresolin F., Gieren W., Kudritzki R. P., et al. Extragalactic chemical abundances: Do H II regions and young stars tell the same story? The case of the spiral galaxy NGC 300 // *Astrophys. J.*—2009.—**700**, N 1.—Р. 809—330.
10. Erb D. K., Shapley A. E., Pettini M., et al. The mass — metallicity relation at $Z > 2$ // *Astrophys. J.*—2006.—**644**, N 2.—Р. 813—828.
11. Garnett D. R., Shields G. A. The composition gradient across M81 // *Astrophys. J.*—1987.—**317**, N 1.—Р. 82—101.
12. Froese F. C., Tachiev G. Breit-Pauli energy levels, lifetimes, and transition probabilities for the beryllium-like to neon-like sequences // *Atom. Data and Nucl. Data Tables.*—2004.—**87**, N 1.—Р. 1—184.
13. 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.—Р. 647—667.
14. Kauffmann G., Heckman T. M., Tremonti C., et al. The host galaxies of active galactic nuclei // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2003.—**346**, N 4.—Р. 1055—1077.
15. Kauffmann G., Heckman T. M., White S. D. M., et al. Stellar masses and star formation histories for 10 sup 5 galaxies from the Sloan Digital Sky Survey // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2003.—**341**, N 1.—Р. 33—53.
16. Kennicutt R. C., Bresolin F., French H., Martin P. An empirical test and calibration of H II region diagnostic // *Astrophys. J.*—2000.—**537**, N 2.—Р. 589—612.

17. *Kewley L. J., Ellison S. L.* Metallicity calibrations and the mass-metallicity relation for star-forming galaxies // *Astrophys. J.*—2008.—**681**, N 2.—P. 1183—1204.
18. *Lamareille F., Mouhcine M., Contini T., et al.* The luminosity — metallicity relation in the local universe from the 2dF Galaxy Redshift Survey // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2004.—**350**, N 2.—P. 396—406.
19. *Lequeux J., Peimbert M., Rayo J. F., et al.* Chemical composition and evolution of irregular and blue compact galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1979.—**80**, N 2.—P. 155—166.
20. *Markwardt C. B.* Non-linear least squares fitting in IDL with MPFIT // *Astron. Data Anal. Software and Systems XVIII.*—2008.—**411**.—P. 251—254.
21. *More J.* The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory // *Numer. Anal.*—1978.—**630**.—P. 105—116.
22. *Melbourne J., Salzer J. J.* Metal abundances of KISS galaxies. I. Coarse metal abundances and the metallicity — luminosity relation // *Astron. J.*—2002.—**123**, N 5.—P. 2302—2311.
23. *Pilyugin L. S.* On the oxygen abundance determination in H II regions. The problem of the lines intensities—oxygen abundance calibration // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**362**, N 1.—P. 325—332.
24. *Pilyugin L. S.* Oxygen abundances in dwarf irregular galaxies and the metallicity—luminosity relationship // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**374**, N 2.—P. 412—420.
25. *Pilyugin L. S., Mattsson L.* Abundance determination in H II regions from spectra without the [O II] λ 3727+ 3729 line // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2011.—**412**, N 2.—P. 1145—1150.
26. *Pilyugin L. S., Thuan T. X.* Galaxy downsizing and the redshift evolution of oxygen and nitrogen abundances: origin of the scatter in the N/H-O/H diagram // *Astrophys. J.*—2011.—**726**, N 2.—P. 726—749.
27. *Pilyugin L. S., Vilchez J. M., Mattsson L., Thuan T. X.* Abundance determination from global emission-line SDSS spectra: exploring objects with high N/O ratios // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2012.
28. *Pilyugin L. S., Vilchez J. M., Thuan T. X.* New improved calibration relations for the determination of electron temperatures and oxygen and nitrogen abundances in H II regions // *Astrophys. J.*—2010.—**720**, N 2.—P. 1738—1751.
29. *Richer M. G., McCall M. L.* Oxygen abundances in diffuse ellipticals and the metallicity — luminosity relations for dwarf galaxies // *Astrophys. J.*—1995.—**445**, N 2.—P. 642—659.
30. *Skillman E. D., Kennicutt R. C., Hodge P. W.* Oxygen abundances in nearby dwarf irregular galaxies // *Astrophys. J.*—1989.—**347**, N 2.—P. 875—882.
31. *Smith H. E.* Spectrophotometric observations of ionized hydrogen regions in nearby spiral and irregular galaxies // *Astrophys. J.*—1975.—**199**, N 3.—P. 591—610.
32. *Stasinska G.* [Ar III]/[O III] and [S III]/[O III]: well-behaved oxygen abundance indicators for H II regions and star forming galaxies // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**454**, N 3.—P. 127L—130L.
33. *Thuan T. X., Pilyugin L. S., Zinchenko I. A.* The redshift evolution of oxygen and nitrogen abundances in emission-lines SDSS galaxies // *Astrophys. J.*—2010.—**712**, N 2.—P. 1029—1048.
34. *Tojeiro R., Heavens A. F., Jimenez R., Panter B.* Recovering galaxy star formation and metallicity histories from spectra using VESPA // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—**381**, N 3.—P. 1252—1266.
35. *Tojeiro R., Wilkins S., Heavens A. F., et al.* A public catalog of stellar masses, star formation and metallicity histories, and dust content from the Sloan Digital Sky Survey

- using VESPA // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2009.—**185**, N 1.—P. 1—19.
36. *Tremonti C. A., Heckman T. M., Kauffmann G., et al.* The origin of the mass-metallicity relation: insight from 53000 star-forming galaxies in the Sloan Digital Sky Survey // *Astrophys. J.*—2004.—**613**, N 2.—P. 898—913.
37. *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.
38. *York D. G., Adelman J., Anderson J. E., et al.* The Sloan Digital Sky Survey: technical summary // *Astron. J.*—2000.—**120**, N 3.—P. 1579—1587.
39. *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 05.01.12