

УДК 524.78

**И. А. Зинченко, Л. С. Пилюгин**

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

## **Содержание кислорода и азота в холодных областях H II из цифрового обзора неба Sloan**

*Определено содержание кислорода и азота для выборки 113607 холодных объектов по спектрам цифрового обзора неба Sloan (SDSS). Значения содержаний кислорода  $12 + \lg(O/H)$  получены при помощи трех параметрических N-калибровок, одна из которых построена в данной работе. При помощи двух параметрических N-калибровок вычислены значения содержаний азота  $12 + \lg(N/H)$ . Для подавляющего большинства объектов содержания кислорода, найденные при помощи трех параметрических N-калибровок, согласуются в пределах 0.05 dex. Не исключены систематические расхождения между этими оценками, не превышающие 0.05 dex. Расхождения между значениями содержаний азота, полученными при помощи ON- и NS-калибровок, достигают 0.1 dex. Показано, что подавляющее большинство холодных SDSS-объектов на диаграмме O/H — N/O находится в той же самой области, что и холодные области H II в близких галактиках, содержания кислорода и азота в которых вычислены  $T_e$ -методом. Это является косвенным свидетельством того, что найденные нами содержания кислорода и азота являются достоверными.*

*ВМІСТ КИСНЮ І АЗОТУ В ХОЛОДНИХ ОБЛАСТЯХ H II ІЗ ЦИФРОВОГО ОГЛЯДУ НЕБА Sloan, Зінченко І. А., Пілюгін Л. С. — Визначено вміст кисню та азоту для вибірки 113607 холодних об'єктів по спектрах цифрового огляду неба Sloan (SDSS). Значення вмістів кисню  $12 + \lg(O/H)$  отримано за допомогою трьох параметричних N-калібровок, одна з яких побудована в даній роботі. За допомогою двох параметричних N-калібровок обчислено також значення вмісту азоту  $12 + \lg(N/H)$ . Для переважної більшості об'єктів вмісти кисню, знайдені за допомогою трьох параметричних N-калібровок, узгоджують-*

ся у межах 0.05 dex. Не виключені систематичні розбіжності між цими оцінками, що не перевищують 0.05 dex. Розбіжності між значеннями вмісту азоту, отриманими за допомогою ON- і NS-калібровок, досягають 0.1 dex. Показано, що переважна більшість холодних SDSS-об'єктів на діаграмі O/H — N/O перебуває в тій же самій області, що і холодні області H II у близьких галактиках, вмісти кисню та азоту в яких обчислені  $T_e$ -методом. Це непрямо свідчить про достовірність знайдених нами вмістів кисню та азоту.

*OXYGEN AND NITROGEN ABUNDANCES IN COLD H II REGIONS FROM SLOAN DIGITAL SKY SURVEY, by Zinchenko I. A., Pilyugin L. S. — The oxygen and nitrogen abundances for a sample of 113607 cold objects from the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) spectra are derived. The values of oxygen abundances  $12+\lg(O/H)$  are obtained using three parametric N calibrations one of which is developed in this work. The values of nitrogen abundances  $12+\lg(N/H)$  are found with two N calibrations. The values of oxygen abundances which are derived using three parametric N calibrations are consistent within 0.05 dex for the vast majority of the objects. It is not improbable that there are systematic differences between the values of oxygen abundances which do not exceed 0.05 dex. The differences between the values of nitrogen abundances which are obtained using the ON and NS calibrations reach 0.1 dex. It is shown that the vast majority of cold SDSS objects are in the same area of the diagram O/H — N/O that cold H II regions of nearby galaxies, oxygen and nitrogen abundances for which are derived through the  $T_e$ -method. This is indirect evidence that the values of oxygen and nitrogen abundances which are found with parametric N calibrations are reliable.*

## ВВЕДЕНИЕ

Данные о химическом составе играют важную роль в исследовании галактик и их эволюции. Металличностью галактики позднего типа обычно называют содержание кислорода в межзвездной среде, а точнее в областях H II галактики. Содержания кислорода в областях H II, полученные классическим  $T_e$ -методом, по-видимому, являются наиболее достоверными. Но применить этот метод на практике удается лишь для небольшого количества туманностей, для которых имеются очень хорошие спектры. Обусловлено это следующей причиной. Для определения металличности  $T_e$ -методом необходимо знать электронные температуры  $t_2$  в зоне свечения [O II] и  $t_3$  в зоне свечения [O III]. Для определения электронной температуры  $t_3$  используется отношение интенсивностей небулярных линий [O III]  $495.9 + 500.7$  к авроральной линии [O III]  $436.3$  нм, а для определения  $t_2$  используют отношение интенсивностей небулярной и авроральной линий азота [N II]  $654.8, 658.4$  / [N II]  $575.5$ . Если измерено значение только

одной температуры, то значение другой определяется из соотношения между ними [18]. Небулярные линии в большинстве областей Н II достаточно сильные и легко измеряются. Авроральные линии кислорода [O III] 436.3 нм и азота [N II] 575.5 нм намного слабее небулярных, и их измерение является трудной задачей даже в областях Н II низкой металличности. В большинстве областей Н II с высокой металличностью линия [O III] 436.3 нм вовсе недоступна для измерения. В настоящее время известно всего несколько десятков надежных измерений авроральных линий в спектрах областей Н II с высокой металличностью, причем только в близких галактиках, полученных с помощью крупнейших телескопов. Поэтому важной задачей для исследования химического состава галактик является разработка надежных методов определения металличностей в холодных областях Н II.

Способ определения содержаний химических элементов по интенсивностям сильных небулярных линий, без использования авроральных, называется методом сильных линий. Идеология этого метода заключается в следующем. Выбирается некоторая комбинация сильных линий, чувствительная к содержанию кислорода в туманности. Она будет индикатором металличности туманности. Каждому значению индикатора ставится в соответствие значение содержания кислорода, т. е. индикатор калибруется в шкале металличности. Поэтому соотношения между значениями индикатора металличности и содержаниями кислорода обычно называют калибровками. Таким способом можно построить калибровки не только для определения содержаний кислорода, но и других элементов, например азота.

В качестве индикаторов металличности рассматривались различные комбинации сильных небулярных линий кислорода, азота, серы, аргона и других химических элементов. Для определения содержаний кислорода чаще всего используются  $R_{23}$ - и N-калибровки [1, 5, 10, 12]. Одномерные  $R_{23}$ -калибровки, в которых содержания кислорода в туманности связывают с суммарной интенсивностью небулярных линий кислорода:  $R_{23} = ([O II] 372.7 + [O III] 495.9, 500.7)/H$ , имеют несколько недостатков. Во-первых, наблюдаются систематические расхождения между металличностями, полученными при помощи  $R_{23}$ -калибровок и  $T_e$ -методом. Во-вторых, на диаграмме  $R_{23}$  — O/H одному значению индикатора металличности  $R_{23}$  соответствуют два различных значения металличности, т. е. диаграмма  $R_{23}$  — O/H состоит из двух ветвей и переходной области между этими ветвями. Поэтому при использовании для определения содержаний кислорода индикатора металличности  $R_{23}$  необходимо заранее знать, на какой ветви находится область Н II. Верхняя ветвь соответствует высоким металличностям, нижняя — низким металличностям. В переходной области точность  $R_{23}$ -калибровок очень низкая.

В работах [13, 14, 16] была предложена параметрическая  $R_{23}$ -калибровка. В дополнение к индикатору металличности  $R_{23}$  был использован параметр  $P$  возбуждения туманности. Такой способ определе-

ния содержания кислорода получил название Р-метода. Применение параметра возбуждения позволяет значительно уменьшить расхождения между значениями содержаний кислорода, полученными при помощи калибровки, и  $T_e$ -методом. Но, как и в случае одномерной  $R_{23}$ -калибровки, одному значению индикатора металличности  $R_{23}$  и параметра  $P$  соответствуют два различных значения металличности. Точность определения содержания кислорода в переходной зоне на диаграмме  $R_{23} - O/H$  также остается невысокой.

В наиболее распространенных вариантах одномерных N-калибровок в качестве индикатора металличности применяются отношения интенсивностей линий  $N2 = [NII] \quad 654.8/H$  или  $O3N2 = [O III] \quad 500.7/[N II] \quad 658.4$  [4, 12]. Содержания кислорода, полученные при помощи N-калибровок, имеют значительно меньшие систематические отличия от содержаний кислорода, полученных  $T_e$ -методом. Но точность определения содержаний кислорода невысокая, особенно при низких металличностях.

Недавно были построены параметрические N-калибровки для определения содержаний кислорода и азота [15, 17]. При построении калибровок в качестве калибровочных точек использовались области H II в близких галактиках, в которых содержания кислорода и азота определялись классическим  $T_e$ -методом. Области H 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 H II. Выделить холодные области H II можно при помощи условия  $\lg N_2 > 0.1$ , где  $N_2 = ([N II] \quad 654.8 + \quad 658.4)/H$ . Используя те же калибровочные точки, что и для двух рассмотренных выше параметрических N-калибровок, мы построили еще одну параметрическую калибровку для холодных областей H II. Количество калибровочных точек в области высоких металличностей мало. По этой причине в области высоких металличностей возможны расхождения между значениями содержаний кислорода и азота, полученными при помощи калибровок и  $T_e$ -методом. В данной работе мы рассмотрим надежность определения содержаний кислорода и азота при помощи параметрических N-калибровок в холодных областях H II высокой металличности. Это можно сделать путем вычисления металличностей большого количества объектов при помощи разных калибровок и сравнения полученных значений. Согласие между значениями содержаний кислорода, найденными при помощи разных калибровок, можно рассматривать как косвенное свидетельство достоверности полученных содержаний.

Каталог SDSS (Sloan Digital Sky Survey) [20] содержит более миллиона спектров, значительная часть из которых является спектрами внегалактических областей H II. Это предоставляет нам возможность исследовать надежность полученных при помощи калибровок содер-

жаний кислорода и азота на большой выборке холодных SDSS-объектов, что и является целью нашей работы.

Ниже использованы стандартные обозначения для интенсивностей эмиссионных линий:

$$R_2 = [\text{O II}] \frac{372.7}{372.9} \frac{I_{[\text{OII}] 372.7}}{I_{\text{H}}} ,$$

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

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

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

Электронную температуру  $T_e$  мы будем выражать в единицах  $10^4$  К ( $t_e = 10^{-4} T_e$ ).

### СРАВНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЙ КИСЛОРОДА И АЗОТА, НАЙДЕННЫХ ПРИ ПОМОЩИ РАЗНЫХ КАЛИБРОВОК

**Калибровки металличности.** Для определения содержаний кислорода, азота и электронной температуры мы будем использовать три варианта параметрических N-калибровок. Первые два взяты из работ [15, 17], а последний вариант, построенный лишь для холодных областей Н II, получен в данной работе. При построении всех трех вариантов калибровок в качестве калибровочных точек использовались области Н II в близких галактиках, в которых доступны для измерения слабые авроральные линии кислорода [O III] 436.3 нм и/или азота [N II] 575.5 нм.

В первой рассматриваемой параметрической N-калибровке как индикатор металличности и электронной температуры используется комбинация линий ионов  $\text{O}^+$ ,  $\text{O}^{++}$  и  $\text{N}^+$ . Поэтому мы будем ссылаться на эту калибровку как на ON-калибровку, а металличности, найденные при помощи этой калибровки, будем обозначать индексом ON. Уравнения для определения содержаний кислорода и азота, а также электронной температуры, взяты из работы [17].

$$12 \lg(\text{O} / \text{H})_{ON} = 8.606 - 0.1051 \lg R_3 - 0.4101 \lg R_2 - 0.1501 \lg(N_2 / R_2), \quad (1)$$

$$12 \lg(\text{N} / \text{H})_{ON} = 7.955 - 0.0481 \lg R_3 - 0.1711 \lg N_2 - 1.0151 \lg(N_2 / R_2), \quad (2)$$

$$t_{ON} = 1 / [1.373 - 0.2171 \lg R_3 - 0.3251 \lg R_2 - 0.0061 \lg(N_2 / R_2)]. \quad (3)$$

Во второй калибровке, которую мы назовем NS-калибровкой, для определения содержаний кислорода, азота и электронной температуры используются потоки в линиях  $\text{O}^{++}$ ,  $\text{N}^+$  и  $\text{S}^+$ . Уравнения NS-калибровки взяты из работы [15].

$$12 \lg(O/H)_{NS} = 8.454 - 0.216 \lg R_3 - 0.362 \lg S_2 - 0.101 \lg(N_2/S_2), \quad (4)$$

$$12 \lg(N/H)_{NS} = 7.414 - 0.383 \lg R_3 - 0.119 \lg S_2 - 0.988 \lg(N_2/S_2), \quad (5)$$

$$t_{NS} = 1 / [1.185 - 0.351 \lg R_3 - 0.273 \lg S_2 - 0.059 \lg(N_2/S_2)]. \quad (6)$$

То, что в уравнения NS-калибровки не входит поток в линии  $R_2$ , дает возможность использовать эти соотношения для определения металличностей и температур в близких областях Н II из обзора SDSS, в спектрах которых отсутствует линия  $R_2$ .

Используя тот же набор калибровочных точек и ту же идеологию, мы получили соотношения, связывающие содержания кислорода и электронную температуру с интенсивностями линий ионов кислорода  $O^+$ ,  $O^{++}$  и серы  $S^+$ . Соответственно назовем эти соотношения OS-калибровкой. Следует отметить, что OS-калибровка получена только для холодных областей Н II:

$$12 \lg(O/H)_{OS} = 8.550 - 0.107 \lg R_3 - 0.340 \lg R_2 - 0.109 \lg(S_2/R_2), \quad (7)$$

$$t_{OS} = 1 / [1.353 - 0.227 \lg R_3 - 0.361 \lg R_2 - 0.049 \lg(S_2/R_2)]. \quad (8)$$

Как было отмечено выше, при применении классического  $T_e$ -метода интенсивности слабых авроральных линий необходимы только на этапе вычисления электронной температуры. Используя описанные выше калибровки, содержания кислорода можно оценить двумя путями. Во-первых, найти содержания кислорода непосредственно из уравнения, связывающего металличности и интенсивности сильных линий. Во-вторых, можно оценить электронную температуру из уравнения, связывающего температуру и интенсивности сильных линий, а затем вычислить металличности по уравнениям  $T_e$ -метода, используя найденные электронные температуры.

**Выборка галактик.** Для определения содержаний кислорода и азота при помощи параметрических N-калибровок мы создали выборку галактик с эмиссионными спектрами. При создании выборки использовались данные из каталога MPA/JHU [<http://www.mpa-garching.mpg.de/SDSS/>], а не исходного каталога SDSS [20], так как измерения интенсивностей линий в каталоге MPA/JHU имеют более высокую точность. Каталог MPA/JHU содержит значения интенсивностей линий и красных смещений для большого количества галактик из базы спектральных данных SDSS. Сначала из каталога MPA/JHU были выбраны объекты с эмиссионными спектрами, в которых измерены потоки в линиях Н I, Н II, [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.

Спектры SDSS покрывают интервал длин волн от 380 до 920 нм. Поэтому спектры близких объектов ( $z < 0.023$ ) не содержат небулярной линии кислорода [O II] 372.7 нм, которая используется в ON- и

OS-вариантах калибровок. NS-калибровка не использует данную линию, и может быть применена к объектам на малых  $z$ . Но так как целью данной работы является сравнение металличностей, полученных при помощи нескольких параметрических N-калибровок, мы включили в выборку только объекты, в которых содержания кислорода можно определить при помощи всех трех приведенных выше калибровок. Поэтому в наш список включены только объекты, в спектрах которых небулярная линия кислорода [O II] 372.7 нм смещается в красную сторону из-за красного смещения настолько, что попадает в спектральный интервал SDSS. Таким образом, наш список содержит только далекие галактики с красными смещениями  $z > 0.023$ , т. е. далее 100 Мпс.

Подавляющее большинство внегалактических областей Н II имеют низкую плотность [3, 21]. Калибровки также получены в приближении низкой плотности. Индикатором электронной плотности в областях Н 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 линиями.

Потоки в эмиссионных линиях были исправлены за межзвездное покраснение при помощи аналитической аппроксимации кривой межзвездного покраснения Уитфорда из работы [7]. Коэффициент экстинкции  $C_H$  определялся с использованием отношения интенсивностей линий Н и Н .

В дублете однократно ионизированного азота линия [NII] 658.4 нм более сильная, чем линия [N II] 654.8 нм, поэтому оценки 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  $A_{ij}$  для этих переходов, которое равно 3 [6]. Поэтому для суммарного потока в линиях  $N_2$  мы использовали соотношение  $N_2 = 1.33[\text{N II}] 658.4$  вместо стандартного  $N_2 = [\text{NII}] 654.8 + [\text{NII}] 658.4$ .

Мы исследовали только объекты, ионизация которых обусловлена коротковолновым излучением молодых массивных звезд. Чтобы отделить области Н II, ионизированные звездами, от активных ядер галактик, была использована классическая диаграмма [N II] 658.4/Н — [O III] 500.7/Н [2]. На рис. 1 показана эта диаграмма для нашей выборки SDSS-объектов. Линия, разделяющая области Н II и активные ядра галактик, взята из работы [8].

Для того чтобы отобрать только холодные (согласно терминологии [17]) области Н II, мы использовали условие  $\lg N_2 > -0.1$ . Полученная выборка содержит 113607 объектов.

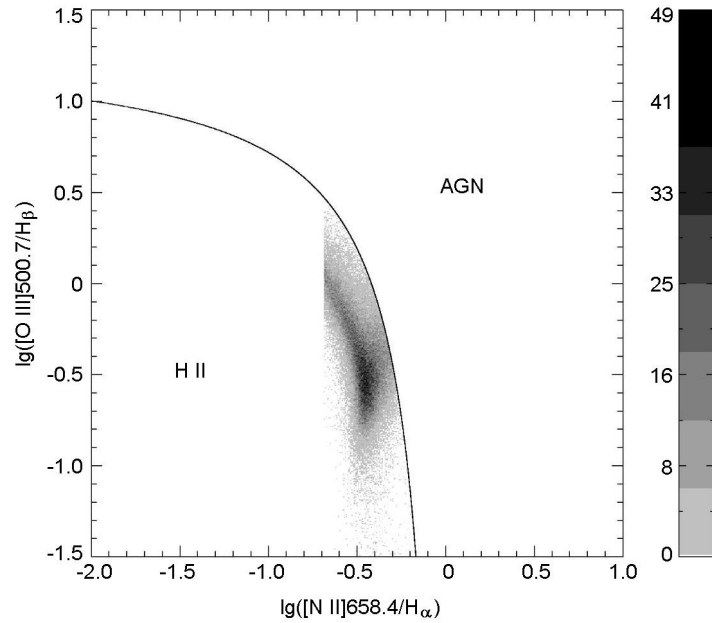


Рис. 1. Классическая диаграмма  $[N II] 658.4/H\alpha$  —  $[O III] 500.7/H\beta$ . Линия, разделяющая области H II и активные ядра галактик, взята из работы [8]. Диаграмма содержит 113607 холодных ( $\lg N_2 > -0.1$ ) SDSS-объектов

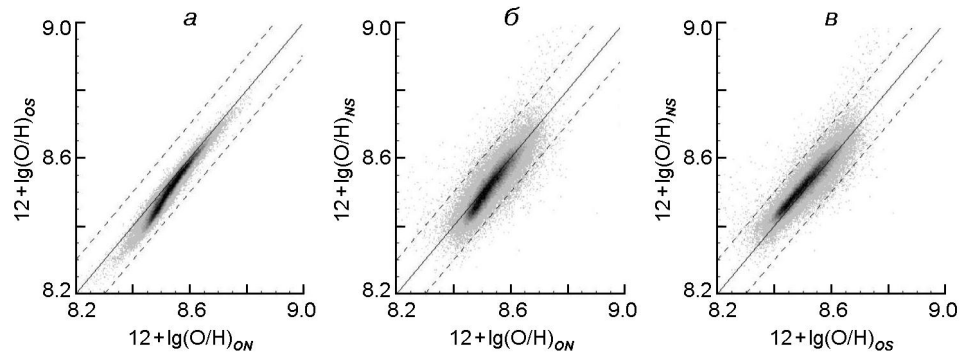


Рис. 2. Сравнение значений содержаний кислорода  $12 + \lg(O/H)$ , найденных с помощью параметрических ON-, OS- и NS-калибровок, для выборки холодных ( $\lg N_2 > -0.1$ ) SDSS-объектов. Сплошная линия соответствует равенству содержаний кислорода, пунктирные линии — отклонению 0.1 dex

**Сравнение содержаний кислорода, найденных при помощи разных калибровок.** Для каждого объекта выборки при помощи трех параметрических N-калибровок были вычислены значения содержаний кислорода  $12 + \lg(O/H)$ . На рис. 2 показано сравнение значений содержаний кислорода, найденных с помощью ON-, OS- и NS-калибровок для холодных SDSS-объектов. Как видно, для подавляющего большинства объектов эти значения согласуются с точностью не хуже



0.05 dex. Возможно, есть небольшое систематическое расхождение между значениями металличностей, полученными при помощи разных калибровок, но оно не превышает 0.05 dex. Причиной возникновения такого систематического расхождения может быть как неточность калибровок, так и то, что калибровки были построены для определения металличности в отдельных областях Н II, а в данной работе мы применяем их для определения содержаний кислорода по интегральным спектрам галактик. Неточность калибровок, как было отмечено выше, может быть обусловлена малым количеством калибровочных точек. Также нужно иметь ввиду то, что калибровочные точки могут иметь ошибки определения содержания кислорода вследствие ошибок измерения слабых авроральных линий кислорода [O III]  $\lambda$  436.3 нм и/или азота [N II]  $\lambda$  575.5 нм.

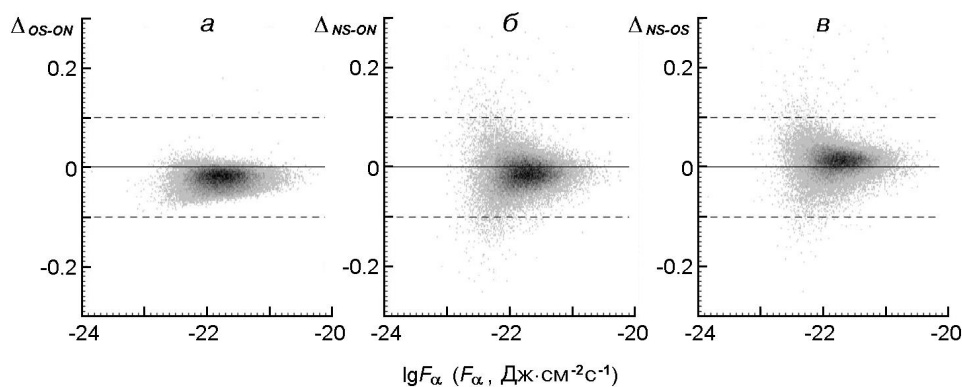


Рис. 3. Разности между значениями содержаний кислорода  $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$ , полученными с помощью разных калибровок, в зависимости от потока в линии Н  $\beta$  для 113607 холодных ( $\lg N_2 > -0.1$ ) SDSS-объектов

На рис. 3 показаны разности значений содержаний кислорода  $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$ , полученных с помощью трех рассматриваемых калибровок в зависимости от потока в линии Н  $\beta$ . Видно, что разброс разностей содержаний кислорода увеличивается с уменьшением потока в линии Н  $\beta$ . Это может свидетельствовать о том, что с уменьшением потока в линии Н  $\beta$  (и других эмиссионных линиях) все менее точно измеряются потоки в этих эмиссионных линиях, в результате чего менее точно вычисляются металличности.

Отсутствие на всех графиках существенных систематических расхождений свидетельствует о том, что полученные для отдельных областей Н II в близких галактиках параметрические N-калибровки дают хорошо согласующиеся между собой значения содержаний кислорода не только для отдельных областей Н II в галактиках, но и для целых галактик с активным звездообразованием из спектрального обзора неба SDSS.

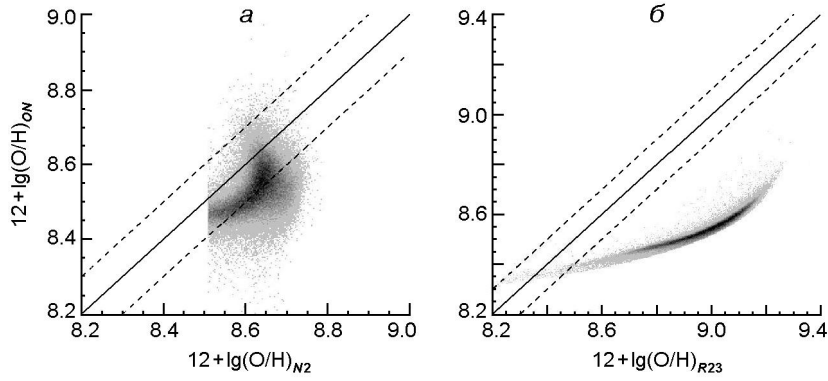


Рис. 4. Сравнение значений содержаний кислорода  $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$ , найденных с помощью ON-калибровки для 113607 холодных ( $\lg N_2 > -0.1$ ) SDSS-объектов: *a* — со значениями содержаний, найденных с помощью варианта N2-калибровки [12]; *б* — со значениями, полученными  $R_{23}$ -калибровкой [19]. Сплошная линия соответствует равенству содержаний кислорода, пунктирные линии — отклонению 0.1 dex

Для сравнения рассмотрим также две часто используемые одномерные N2- и  $R_{23}$ -калибровки для определения содержаний кислорода. Первая из них была предложена Петтини и Пейджелом [12]. Она основана на отношении интенсивностей линий  $N2 = [\text{N II}] - 654.8 / \text{H}$  :

$$12 \lg(\text{O} / \text{H})_{N2} = 8.90 + 0.57 \lg([\text{N II}] - 654.8 / \text{H}). \quad (9)$$

Во второй калибровке, взятой из работы Тремонти [19], индикатором металличности служит сумма потоков в линиях одно- и двукратно ионизированного кислорода  $R_{23} = R_2 + R_3$  :

$$12 \lg \text{O} / \text{H}_{R_{23}} = 9.185 + 0.313x - 0.264x^2 + 0.321x^3, \quad (10)$$

где  $x = \lg R_{23}$ .

На рис. 4 представлены сравнения найденных с помощью ON-калибровки значений содержаний кислорода  $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$  со значениями содержаний кислорода, полученными при помощи варианта N2-калибровки Петтини и Пейджела и  $R_{23}$ -калибровки Тремонти. Различия между содержаниями кислорода, найденными при помощи NS- (и OS-) калибровки, и значениями содержаний, полученными при помощи  $R_{23}$ - и N2-калибровок, имеют такой же характер, как и для ON-калибровки. Сплошная линия соответствует равенству содержаний кислорода, штриховые линии — отклонению 0.1 dex. Видно, что значения содержаний кислорода, полученные с помощью наших калибровок, согласуются со значениями, полученными при помощи N2-калибровки, в пределах 0.1—0.2 dex. В случае  $R_{23}$ -калибровки из работы Тремонти видны систематические расхождения между значениями содержаний кислорода, полученными при помощи  $R_{23}$ -калибровки и при помощи рассматриваемых нами параметрических калибровок. В области высокой металличности расхождения достигают

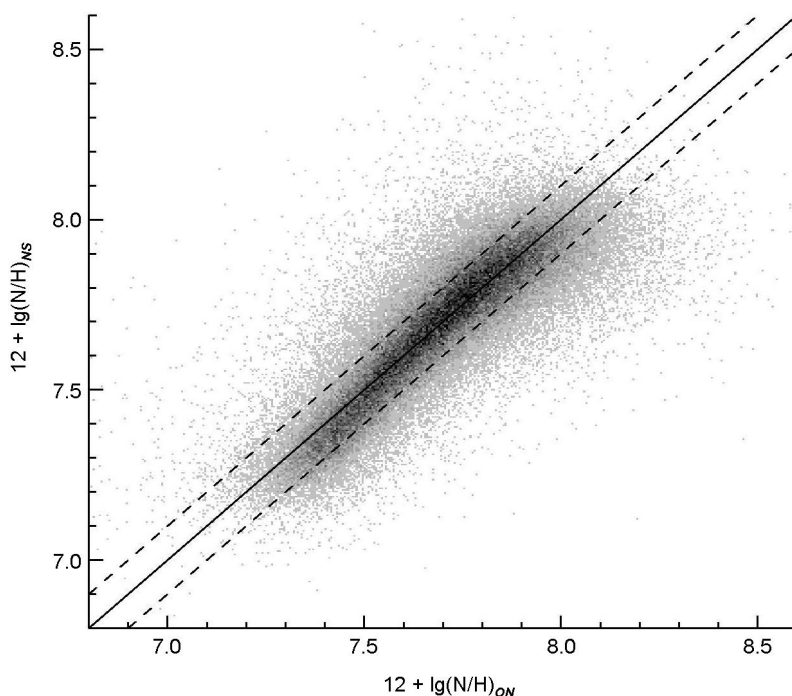


Рис. 5. Сравнение значений содержаний азота  $12 + \lg(\text{N}/\text{H})$ , найденных с помощью ON- и NS-калибровок, для нашей выборки холодных SDSS-объектов. Сплошная линия соответствует равенству содержаний азота, пунктирные — отклонению 0.1 dex

0.4—0.5 dex. Это не удивительно, поскольку сами авторы отмечали, что их  $R_{23}$ -калибровка может давать завышенные примерно в два раза оценки содержания кислорода.

**Сравнение содержаний азота, найденных при помощи разных калибровок. Диаграмма O/H — N/O.** На рис. 5 показано сравнение значений содержаний азота  $12 + \lg(\text{N}/\text{H})$ , найденных с помощью ON и NS-калибровок для нашей выборки холодных SDSS-объектов. Расхождения между значениями содержаний азота больше, чем в случае кислорода, и достигают 0.1 dex. Как видно, эти расхождения имеют случайный характер, в то время как систематических расхождений практически нет.

Другим способом проверки достоверности найденных значений содержаний азота и кислорода, а следовательно, и надежности применяемых для определения содержаний калибровок, является исследование положения выборки объектов на диаграмме O/H — N/O. На рис. 6 мы сравнили диаграммы O/H — N/O, построенные для нашей выборки объектов с использованием вычисленных по ON- и NS-калибровкам металличностей, и диаграммы, построенные для областей Н II в близких галактиках, содержания кислорода и азота в которых вычислены  $T_e$ -методом. Эта же выборка областей Н II в близких галактиках, взятая из работы [17], использовалась при построении парамет-

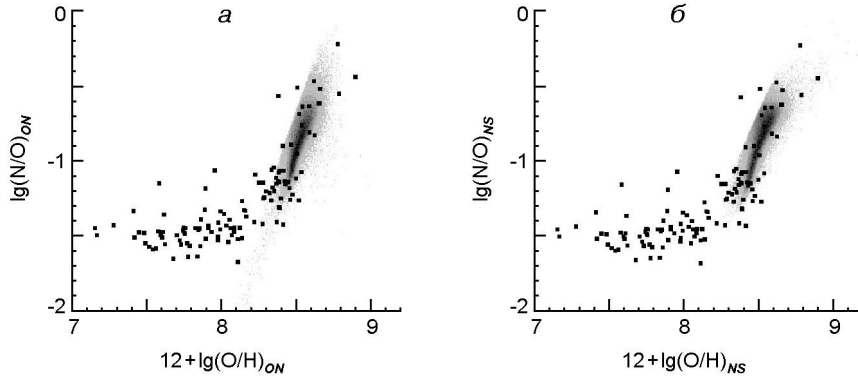


Рис. 6. Диаграмма O/H — N/O для 113607 холодных ( $\lg N_2 > -0.1$ ) SDSS-объектов. Квадратиками показаны области H II в близких галактиках, содержания кислорода и азота для которых вычислены  $T_e$ -методом

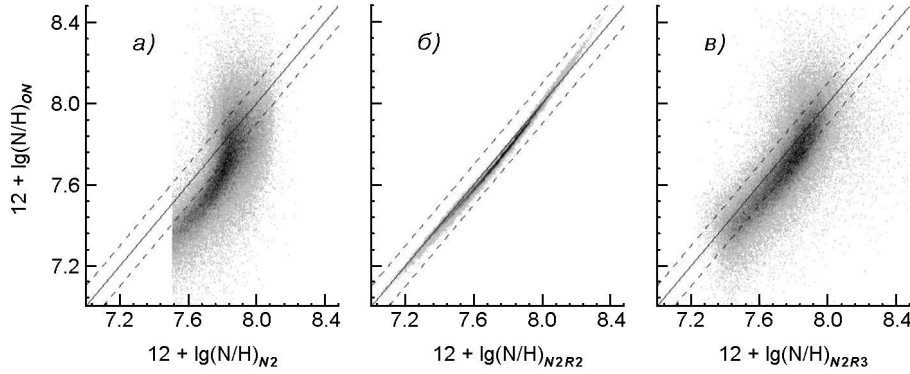


Рис. 7. Сравнение значений содержаний азота  $12 + \lg(N/H)$ , найденных с помощью ON-калибровки, со значениями, полученными с помощью калибровок [18] для нашей выборки холодных SDSS-объектов. Сплошная линия соответствует равенству содержаний азота, пунктирные линии — отклонению 0.1 dex

рических N-калибровок. Следует отметить, что на рисунке показаны как холодные, так и горячие области H II в близких галактиках, в то время как наша выборка объектов, приведенная на том же рисунке в виде двумерной гистограммы, содержит только холодные области H II. Подавляющее большинство SDSS-объектов на рисунке находится в той же самой области, что и холодные области H II в близких галактиках. Это является косвенным свидетельством того, что рассматриваемые нами калибровки дают достоверные содержания кислорода и азота.

Значения содержаний азота, полученные при помощи ON- и NS-калибровок, мы также сравнили со значениями, полученными при помощи трех одномерных N-калибровок из работы [18]:

$$12 \lg(N/H)_{N_2} = 7.649 + 1.454x_1 - 0.257x_1^2 + 0.148x_1^3, \quad (11)$$

$$12 \lg(N/H)_{N2R2} = 7.918 + 0.877x_2 + 0.058x_2^2 + 0.038x_2^3, \quad (12)$$

$$12 \lg(N/H)_{N2R3} = 7.526 + 0.521x_3 + 0.062x_3^2 + 0.014x_3^3, \quad (13)$$

где  $x_1 = \lg N_2$ ,  $x_2 = \lg(N_2/R_2)$ ,  $x_3 = \lg(N_2/R_3)$ .

На рис. 7 показано сравнение найденных с помощью ON-калибровки значений содержаний азота  $12 + \lg(N/H)$  со значениями содержаний, полученными с помощью калибровок из работы [18], для нашей выборки холодных SDSS-объектов. Сплошная линия соответствует равенству содержаний азота, пунктирные линии — отклонению

0.1 dex. Разности между значениями содержаний азота, полученными при помощи ON-калибровки и калибровок (11) и (13), достигают 0.3 dex, в то время как разности между значениями содержаний, полученных при помощи ON-калибровки и (12), составляют меньше 0.05 dex.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определено содержание кислорода и азота для выборки 113607 холодных SDSS-объектов, построенной на основе данных из каталога MPA/JHU. Для каждого объекта выборки при помощи трех параметрических N-калибровок были вычислены значения содержаний кислорода  $12 + \lg(O/H)$ . Две параметрических ON- и NS-калибровки взяты из литературных источников, а OS-калибровка построена нами для этой работы. При помощи ON- и NS-калибровок вычислены также значения содержаний азота  $12 + \lg(N/H)$ .

Для подавляющего большинства объектов содержания кислорода, найденные при помощи трех параметрических калибровок, согласуются в пределах 0.05 dex. Не исключено, что есть систематические расхождения между полученными при помощи рассмотренных калибровок значениями содержаний кислорода, не превышающие 0.05 dex. В то же время есть большие расхождения между значениями содержаний, полученными при помощи  $R_{23}$ -калибровки Тремонта, и параметрических N-калибровок, достигающие 0.4—0.5 dex для объектов с высокой металличностью. Расхождения между содержаниями, полученными при помощи калибровок и предложенной Петтини и Пейджелом N2-калибровки, составляют 0.1—0.2 dex.

Расхождения между значениями содержаний азота, полученными при помощи ON- и NS-калибровок больше, чем в случае кислорода, и достигают 0.1 dex.

Мы сравнили положения объектов нашей выборки, содержания азота и кислорода для которых были вычислены при помощи ON- и NS-калибровок, на диаграмме O/H — N/O, с положениями областей Н II в близких галактиках, содержания кислорода и азота в которых вычислены  $T_e$ -методом. Подавляющее большинство холодных SDSS-объектов на диаграмме O/H — N/O находится в той же самой области,

что и холодные области H II в близких галактиках. Это косвенно свидетельствует в пользу достоверности содержаний кислорода и азота.

Данная работа была частично финансирована в рамках программы «КосмоМикроФизика» Национальной академии наук и Государственного космического агентства Украины.

1. Alloin D., Collin-Souffrin S., Joly M., Vigroux L. Nitrogen and oxygen abundances in galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1979.—**78**, N 2.—P. 200—216.
2. 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.—P. 5—19.
3. 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.—P. 981—997.
4. Denicolo G., Terlevich R., Terlevich E. New light on the search for low-metallicity galaxies — I. The N2 calibrator // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2002.—**330**, N 1.—P. 69—74.
5. Edmunds M. G., Pagel B. E. J. On the composition of H II regions in southern galaxies. III. NGC 2997 and 7793 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1984.—**211**, N 2.—P. 507—519.
6. Froese F. C., Tachiev G. Breit — Pauli energy levels, lifetimes, and transition probabilities for the beryllium-like to neon-like sequences // *Atomic Data and Nuclear Data Tables.*—2004.—**87**, N 1.—P. 1—184.
7. 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.
8. 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.—P. 1055—1077.
9. 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.
10. McCall M. L., Rybski P. M., Shields G. A. The chemistry of galaxies. I. The nature of giant extragalactic H II regions // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1985.—**57**, N 1.—P. 1—62.
11. Pagel B. E. J., Edmunds M. G., Blackwell D. E., et al. On the composition of H II regions in southern galaxies. I — NGC 300 and 1365 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1979.—**189**, N 1.—P. 95—113.
12. Pettini M., Pagel Bernard E. J. [OIII]/[NII] as an abundance indicator at high redshift // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2004.—**348**, N 3.—P. 59—63.
13. 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.
14. Pilyugin L. S. On the oxygen abundance determination in H II regions. High-metallicity regions // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**369**, N 1.—P. 594—604.
15. Pilyugin L. S., Mattsson L., Vilchez J. M., Cedres B. On the electron temperature in high-metallicity H II regions // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2009.—**398**, N 1.—P. 485—496.
16. Pilyugin L. S., Thuan T. X. Oxygen abundance determination in H II regions: the strong line intensities-abundance calibration revisited // *Astrophys. J.*—2005.—**631**, N 1.—P. 231—243.

17. *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 HII regions // *Astrophys. J.*—2010.—**720**, N 2.—P. 1738—1751.
18. *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.
19. *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.
20. *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.
21. *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 12.10.10