

УДК 524.78+524.523

**Б. Я. Мелех<sup>1</sup>, Л. С. Пилюгин<sup>2</sup>, Р. И. Корытко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Кафедра астрофизики Львовского национального университета имени Ивана Франко  
ул. Кирилла и Мефодия 8, Львов, 79005

<sup>2</sup>Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680  
bmelekh@gmail.com

### **Соответствие между интенсивностями сильных эмиссионных линий в спектре области Н II и ее химическим составом**

*Метод определения содержания тяжелых элементов в областях Н II (метод сильных линий) основывается на предположении, что некоторые комбинации интенсивностей сильных эмиссионных линий в спектрах областей Н II могут служить индикаторами металличности и электронной температуры в туманности. Рассматривались три набора сильных линий: набор А (линии R<sub>3</sub>, R<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> и S<sub>2</sub>), набор В (линии R<sub>3</sub>, R<sub>2</sub> и N<sub>2</sub>), набор С (линии R<sub>3</sub>, N<sub>2</sub> и S<sub>2</sub>). Интенсивности сильных линий нормированы на интенсивность линии Н . Мы исследовали эти наборы на наличие однозначного соответствия между интенсивностями сильных эмиссионных линий в спектре области Н II и ее химическим составом. Рассчитана детальная сетка моделей областей Н II. Показано однозначное соответствие между химическим составом туманности и интенсивностями наборов линий А и С. Для набора линий В однозначное соответствие теряется для 5 % моделей областей Н II; модели областей Н II с существенно различающимися содержаниями кислорода и азота могут иметь близкие интенсивности набора линий В. Поэтому варианты метода сильных линий (калибровки) с использованием наборов линий А и С более надежны, чем варианты, основанные на наборе линий В.*

*ВІДПОВІДНІСТЬ МІЖ ІНТЕНСИВНОСТЯМИ СИЛЬНИХ ЕМІСІЙНИХ ЛІНІЙ У СПЕКТРІ ЗОНИ Н II ТА ЇЇ ХІМІЧНИМ СКЛАДОМ, Мелех Б. Я., Пілюгін Л. С., Корытко Р. І. — Метод визначення вмісту важких елементів у зонах Н II (метод сильних ліній) базується на припущенні, що деякі з вибірок інтенсивностей сильних емісійних ліній у спектрах зон Н II можуть служити індикаторами металічності і*

електронної температури в туманності. Розглядалися три вибірки сильних ліній: вибірка А (лінії  $R_3$ ,  $R_2$ ,  $N_2$  і  $S_2$ ), вибірка В (лінії  $R_3$ ,  $R_2$  і  $N_2$ ), вибірка С (лінії  $R_3$ ,  $N_2$  та  $S_2$ ). Інтенсивності сильних ліній про- нормовані на інтенсивність лінії H. Ми дослідили ці набори на на- явність однозначної відповідності між інтенсивностями сильних емісійних ліній у спектрі зони H II та її хімічним складом. Для цього розраховано детальну сітку моделей зон H II. Показано однозначну відповідність між хімічним складом туманності та інтенсивно- стями ліній вибірок А і С. У випадку вибірки ліній В однозначна відпо- відність зникає для 5 % зон H II; моделі зон H II з суттєво відмінними значеннями кисню та азоту можуть мати близькі інтенсивності ліній вибірки В. Тому варіанти методу сильних ліній (калібровки) з використанням вибірок А і С надійніші, ніж калібровки, що базуються на вибірці В.

*THE CORRESPONDENCE BETWEEN STRONG EMISSION LINE INTENSITIES IN THE SPECTRUM OF AN H II REGION AND ITS CHEMICAL COMPOSITION, by Melekh B. Ya., Pilyugin L. S., Korytko R. I. — The method for the determination of heavy element contents in H II regions (the strong line method) is based on the assumption that some inten- sity combinations of strong emission lines in spectra of an H II region can serve as indicators of its metallicity and electron temperature in a nebula. Three strong line sets are considered, namely, the set A ( $R_3$ ,  $R_2$ ,  $N_2$ , and  $S_2$ ), set B ( $R_3$ ,  $R_2$ , and  $N_2$ ) and set C ( $R_3$ ,  $N_2$ , and  $S_2$ ). The strong line inten- sities are normalized to the H line intensity. The sets are tested for the availability of a unique correspondence between the intensities of the strong emission lines in the spectrum of an H II region and its chemical composition. A comprehensive set of H II region models is constructed for this purpose. Some unique correspondence is detected between the chemi- cal composition of a nebula and the intensities of the strong emission lines from the set A and C. For the strong line set B, the unique correspondence disappears for 5 % of H II region models; some H II region models with sig- nificantly different chemical compositions can have similar intensities of the strong line set B. Because of this, the variants of the strong line method (calibrations) with the use of the strong line sets A and C are more reliable than that based on the strong line set B.*

## ВВЕДЕНИЕ

Наиболее надежным методом определения электронной температуры и содержания кислорода в области H II является классический  $T_e$ -метод. В рамках  $T_e$ -метода электронная температура в туманности определяется из сравнения интенсивностей авроральной и небулярной линий иона. Чаще всего для этой цели используются авроральная [O III] 436.3 нм и небулярная [O III] ( 495.9 + 500.7 нм) линии дважды ионизованного кислорода или авроральная [N II] 575.5 нм и небу-

лярная [N II] ( $654.8 + 658.4$  нм) линии ионизованного азота. К сожалению, авроральные линии слишком слабы и не обнаруживаются в спектрах большинства внегалактических областей H II, что препятствует применению классического  $T_e$ -метода для определения их химического состава.

Три десятилетия назад Пейджел с соавторами [16] и Аллоин с соавторами [2] предположили, что некоторые комбинации интенсивностей сильных эмиссионных линий в спектрах областей H II могут служить достаточно хорошими индикаторами металличности и электронной температуры в туманности. Можно найти соотношение, связывающее значение выбранного индикатора металличности (или электронной температуры) с содержанием кислорода (или электронной температуры) в туманности, т. е. значения индикатора металличности могут быть прокалиброваны в шкале металличности или электронной температуры. Такой подход к определению содержания тяжелых элементов в областях H II получил название «метод сильных линий», так как в качестве индикатора металличности используется комбинация интенсивностей сильных эмиссионных линий в спектре области H II. Метод сильных линий получил признание и широкое применение. Были предложены различные варианты метода [5, 11, 18—22, 24—27], в которых в качестве индикатора металличности использовались комбинации интенсивностей сильных линий разных ионов. Детальный анализ разных вариантов метода сильных линий (калибровок) дан в работе [1].

Подавляющее большинство комбинаций интенсивностей сильных линий, которые используются в качестве индикаторов металличности или электронной температуры в туманности, имеют существенный недостаток: связь между выбранным индикатором и металличностью не является однозначной на всем интервале металличностей областей H II. Классическим примером является знаменитая  $R_{23}$ -калибровка, предложенная в работе [16]. В широком интервале значений индикатора металличности  $R_{23}$  одному значению  $R_{23}$  соответствуют два значения содержания кислорода O/H. Зависимость  $O/H = f(R_{23})$  распадается на две ветви, которые принято называть нижней и верхней ветвями диаграммы  $R_{23} - O/H$ . Необходимо отыскивать отдельное соотношение  $O/H = f(R_{23})$  для каждой ветви. Более того, необходимо *a priori* знать, на какой ветви расположена область H II, чтобы определить содержание кислорода в ней при помощи  $R_{23}$ -калибровки.

В работе [22] найдено, что ONS-калибровка, в которой в качестве индикатора металличности и электронной температуры в туманности используется комбинация интенсивностей четырех сильных линий ( $R_3 = ([O III] 495.9 + 500.7)/H$ ,  $R_2 = ([O II] 372.7 + 372.9)/H$ ,  $N_2 = ([N II] 654.8 + 658.4)/H$  и  $S_2 = ([S II] 671.7 + 673.1)/H$ ), позволяет определить надежные значения содержаний кислорода и азота в туманностях во всем интервале металличностей. Строго говоря, ONS-калибровка базируется на комбинации интенсивностей пяти

линий, так как интенсивности четырех сильных линий нормируются на интенсивность линии H . Следует также отметить, что в работе [22] соотношения  $O/H = f(R_3, R_2, N_2, S_2)$  и  $N/H = f(R_3, R_2, N_2, S_2)$  получены отдельно для трех интервалов металличности (для трех классов областей H II). Однако это обусловлено не тем, что связь между выбранным индикатором и металличностью не является однозначной на всем интервале металличностей областей H II, а тем, что разбиение областей H II на три класса позволяет найти достаточно простые соотношения  $O/H = f(R_3, R_2, N_2, S_2)$  и  $N/H = f(R_3, R_2, N_2, S_2)$ .

В работе [22] получено, что ON-калибровка, в которой в качестве индикатора металличности и электронной температуры в туманности используется комбинация интенсивностей трех сильных линий  $R_3$ ,  $R_2$  и  $N_2$ , также позволяет определить надежные значения содержаний кислорода и азота в туманностях во всем интервале металличностей. В работе [20] показано, что и NS-калибровка, в которой в качестве индикатора металличности и электронной температуры в туманности используется комбинация интенсивностей трех других сильных линий  $R_3$ ,  $N_2$  и  $S_2$ , дает возможность определить надежные значения содержаний кислорода и азота в туманностях во всем интервале металличностей.

Здесь мы исследуем вопрос, является ли соответствие между интенсивностями четырех (трех) указанных сильных эмиссионных линий в спектре области H II и ее химическим составом однозначным. Для этого исследования используется обширная сетка фотоионизационных моделей свечения (ФМС) областей H II, рассчитанная нами. Вообще говоря, при построении указанных калибровок в качестве калибровочных точек использовались области H II в ближайших галактиках с надежно измеренными температурами, и следовательно, с достаточно надежно определенными содержаниями кислорода и азота. В принципе этот набор калибровочных точек можно было бы использовать и для выяснения наличия однозначного соответствия между интенсивностями указанных сильных эмиссионных линий в спектре области H II и ее химическим составом. Однако области H II с надежно измеренными содержаниями кислорода и азота малочисленны и неравномерно покрывают интервал изменения O/H (и N/H) в областях H II.

Использование сетки ФМС-областей H II для такого исследования дает то преимущество, что она покрывает равномерно (с малым шагом) весь интервал изменения O/H (и N/H) в областях H II. Однако ее слабое место состоит в несовершенстве современных моделей, которые могут не совсем адекватно описывать реальные области H II [23]. Некоторые атомные данные, используемые при расчетах моделей, могут быть неточными. Но главной проблемой при построении модели реальной области H II является либо большая неоднородность входных параметров (например, распределения плотности газа), либо полное отсутствие необходимых данных (например, спектр ионизирую-

щего источника за лаймановским пределом). Из наблюдений мы получаем спектр области Н II и ее размеры — те же параметры, которые получаются в результате расчета фотоионизационной модели. Так как некоторые входные параметры модели невозможно найти из наблюдений, то особенно актуальной является обратная задача фотоионизационного моделирования областей Н II — поиск оптимальных ФМС, которые адекватно воспроизводят наблюдаемые характеристики (спектр, размер) туманностей. Эта задача для областей Н II с низким содержанием тяжелых элементов и планетарных туманностей детально обсуждается в работах [9, 12—15]. Там же обсуждается и проблема свободных параметров моделей. Установление набора сильных линий, для которого есть однозначное соответствие с химическим составом туманности, позволяет сократить количество свободных параметров в задаче поиска оптимальных моделей областей Н II. Таким образом, отыскание набора сильных линий, для которого есть однозначное соответствие с химическим составом туманности, представляет интерес не только для построения калибровок, но и для поиска оптимальных моделей областей Н II (и других исследований газовых туманностей).

#### СЕТКА ФОТОИОНИЗАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ СВЕЧЕНИЯ ОБЛАСТЕЙ Н II

Для исследования связи между содержанием тяжелых элементов в туманности и интенсивностями сильных линий в ее спектре мы рассчитали обширную сетку плоскопараллельных ФМС. Каждая модель характеризуется следующим набором параметров.

**1. Содержание тяжёлых элементов.** В качестве базового был принят химический состав, рекомендованный на Медонской и Лексингтонской конференциях [6, 7, 17] для расчёта фотоионизационной модели стандартной области Н II:

$$\text{H} : \text{He} : \text{C} : \text{O} : \text{Ne} : \text{Mg} : \text{Si} : \text{S} : \text{Cl} : \text{Ar} : \text{Fe} = 1 : 0.1 : 2.19 \cdot 10^{-4} : \\ : 3.31 \cdot 10^{-4} : 5.01 \cdot 10^{-5} : 10^{-8} : 10^{-8} : 8.91 \cdot 10^{-6} : 10^{-7} : 10^{-8} : 10^{-8}.$$

Для каждой модели содержание химических элементов (кроме водорода, гелия и азота) задавалось путем шкалирования базового химического состава (путем умножения на общий фиксированный коэффициент). Содержание гелия не изменялось. Известно, что в областях Н II нет однозначного соответствия между содержанием кислорода и содержанием азота. Следовательно, необходимо построить модели с различными значениями содержания азота при каждом фиксированном значении содержания кислорода. В туманности с заданным содержанием кислорода содержание азота варьировалось в пределах, которые установлены на основе данных о содержании кислорода и азота в реальных областях Н II в спиральных и неправильных галактиках, в

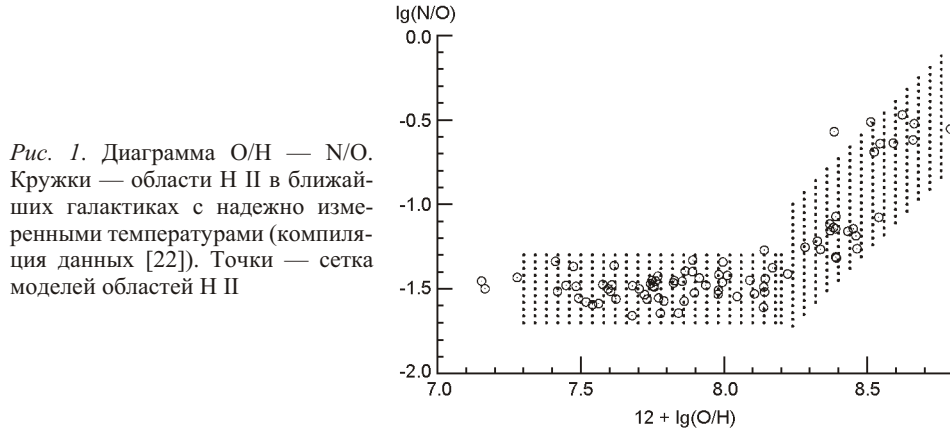


Рис. 1. Диаграмма O/H — N/O. Круги — области H II в ближайших галактиках с надежно измеренными температурами (компиляция данных [22]). Точки — сетка моделей областей H II

спектрах которых измерены авроральные линии, и следовательно, содержания кислорода и азота определены достаточно надежно при помощи классического  $T_e$ -метода. Положения этих областей H II (компиляция данных из [22]) на диаграмме O/H — N/O показаны на рис. 1 кружками. Видно, что диапазон изменения N/O зависит от содержания кислорода O/H. Анализируя данные работы [22], мы приняли, что в диапазоне  $7.3 \leq 12 + \lg(O/H) < 8.2$  при каждом фиксированном значении содержания кислорода значение  $\lg(N/O)$  изменяется в диапазоне от  $-1.7$  до  $-1.3$ . Для диапазона  $8.2 \leq 12 + \lg(O/H) \leq 8.8$  из тех же данных нами была выведена аппроксимационная зависимость

$$\lg(N/O)_{fit} = 1.683(12 + \lg(O/H) - 8.2) - 1.5233,$$

при этом для каждого фиксированного значения содержания кислорода значение  $\lg(N/O)$  изменяется в диапазоне  $\lg(N/O)_{fit} \pm 0.35$ . На рис. 1 точками показаны значения  $\lg(N/O)$  и  $12 + \lg(O/H)$ , для которых рассчитаны модели сетки. Видно, что сетка моделей достаточно плотно покрывает зависимость N/O — O/H.

**2. Ионизационный параметр.** Этот безразмерный параметр определяется следующим образом [4, 7]:

$$U = \frac{Q(H)}{4 r_0^2 n(H)c} = \frac{(H)}{n(H)c}, \quad (1)$$

где  $r_0$  — расстояние между центром ионизирующего источника (звезды) и освещенной этим источником поверхностью области H II,  $n(H)$  — суммарная концентрация водорода (в ионизованном, нейтральном и молекулярном состояниях),  $c$  — скорость света,  $Q(H)$  — количество коротковолновых фотонов (способных ионизовать водород из основного состояния), излучаемых ионизирующим источником за единицу времени,  $(H)$  — количество этих фотонов, проходящих через единицу площади освещенной звездой поверхности области H II за единицу времени. Этот параметр широко используется при построении плоскопараллельных моделей туманностей с постоянной концентра-

цией газа. Ионизационный параметр можно использовать для обобщённого описания моделей.

Электронная концентрация  $n(\text{H})$  в подавляющем большинстве внегалактических областей Н II не превышает  $100 \text{ см}^{-3}$  [3, 8, 28]. При этих плотностях физические характеристики областей Н II слабо зависят от электронной концентрации, и этой зависимостью можно пренебречь. Другими словами, для описания таких областей Н II применимо приближение низкой плотности. Поэтому для всех ФМС нашей сетки суммарная концентрация водорода, который является основным источником свободных электронов в туманности, была принята равной  $n(\text{H}) = 100 \text{ см}^{-3}$  и постоянной по всей области Н II. В этом случае, как видно из уравнения (1), ионизационный параметр определяет суммарный поток  $(\text{H})$  ионизирующих водород фотонов через единицу площади внутренней поверхности области Н II. Конечно, этот интегральный параметр не учитывает формы распределения энергии в спектре излучения ионизирующего источника. В наших моделях ионизационный параметр принимал три значения, характерные для большинства областей Н II:  $U = 0.01, 0.1$  и  $1.0$ .

3. Распределение энергии в спектре излучения ионизирующего источника. Источником ионизирующих туманность квантов являются О-звёзды. Распределение энергии в спектре излучения звезды зависит от ее температуры. Мы рассчитали фотоионизационные модели областей Н II для трех моделей звёздных атмосфер О-звёзд TLUSTY [10] с эффективными температурами 30000, 40000 и 50000 К. Для всех звёзд ускорение свободного падения на поверхности принималось равным  $\lg g = 4.75$  ( $g, \text{ см}/\text{с}^2$ ). При расчете каждой модели области Н II использовалась модель фотосферы звезды, металличность которой близка к металличности зоны Н II. Между звездой и освещённой поверхностью области Н II может быть различное расстояние, и следовательно, поток излучения от звезды через единицу площади освещённой поверхности туманности будет различным. Поэтому при расчёте ФМС-сетки поток ионизирующего излучения в каждом из единичных интервалов частот определялся путём сравнения значения интегрального потока  $(\text{H})$  ионизирующих фотонов, определённого через ионизационный параметр, и потока излучения, найденного путём интегрирования распределения энергии в спектре излучения соответствующей модели атмосферы О-звёзды.

Для расчёта сетки ФМС областей Н II мы использовали программу Cloudy 08.00 Г. Ферланда [7], которая отличается надёжностью, и в которой используется набор современных атомных данных. Всего было рассчитано 5112 ФМС областей Н II. Положения моделей областей Н II на диаграмме О/Н — N/O показаны на рис. 1 точками. Для каждой пары значений О/Н и N/O рассчитаны девять моделей для разных значений эффективной температуры ионизирующей звезды и ионизационного параметра. Все модели областей Н II нашей сетки являются ионизационно ограниченными, т. е. расчёт каждой модели туманнос-

ти оканчивается на ионизационном фронте, при падении электронной температуры  $T_e$  ниже 4000 К.

Интенсивности эмиссионных линий, полученные из моделей областей Н II с различными значениями содержаний кислорода О/Н и азота N/Н, при разных значениях эффективной температуры ионизирующих звезд и ионизационного параметра используются ниже для исследования соответствия между интенсивностями сильных линий в спектре области Н II и ее химическим составом.

### СООТВЕТСТВИЕ МЕЖДУ ИНТЕНСИВНОСТЯМИ СИЛЬНЫХ ЛИНИЙ В СПЕКТРЕ ОБЛАСТИ Н II И ЕЕ ХИМИЧЕСКИМ СОСТАВОМ

**Набор четырех линий (набор А).** В ONS-калибровке в качестве индикатора металличности и электронной температуры в туманности используется комбинация интенсивностей четырех сильных линий ( $R_3 = ([\text{O III}] \ 495.9 + 500.7)/\text{H}$ ,  $R_2 = ([\text{O II}] \ 372.7 + 372.9)/\text{H}$ ,  $N_2 = ([\text{N II}] \ 654.8 + 658.4)/\text{H}$  и  $S_2 = ([\text{S II}] \ 671.7 + 673.1)/\text{H}$ ). В работе [22] были получены соотношения, связывающие значения электронной температуры  $t_{\text{ONS}}$ , содержания кислорода  $12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{\text{ONS}}$  и азота  $12 + \lg(\text{N}/\text{H})_{\text{ONS}}$  с интенсивностями этих линий:

$$t_{\text{ONS}} = [1.111 \ 0.505P \ 0.446\lg R_3 \ 0.081\lg(N_2 / R_2) \ 0.0081\lg(S_2 / R_2)]^1$$

(для  $\lg N_2 \ 0.1$ ),

$$t_{\text{ONS}} = [1.325 \ 0.007P \ 0.229\lg R_3 \ 0.362\lg(N_2 / R_2) \ 0.173\lg(S_2 / R_2)]^1$$

(для  $\lg N_2 \ 0.1$ ,  $\lg(N_2 / S_2) \ 0.25$ ),

$$t_{\text{ONS}} = [1.318 \ 0.649P \ 0.283\lg R_3 \ 0.115\lg(N_2 / R_2) \ 0.151\lg(S_2 / R_2)]^1$$

(для  $\lg N_2 \ 0.1$ ,  $\lg(N_2 / S_2) \ 0.25$ ),

где  $t_{\text{ONS}}$  обозначает электронную температуру  $t_e$ . Параметр возбуждения туманности  $P$  определяется соотношением  $P = R_3 / (R_3 + R_2)$ .

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{\text{ONS}} = 8.277 \ 0.657P \ 0.399\lg R_3 \ 0.061\lg(N_2 / R_2) \\ 0.005\lg(S_2 / R_2) \quad (\text{для } \lg N_2 \ 0.1),$$

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{\text{ONS}} = 8.816 \ 0.733P \ 0.454\lg R_3 \ 0.710\lg(N_2 / R_2) \\ 0.337\lg(S_2 / R_2) \quad (\text{для } \lg N_2 \ 0.1, \lg(N_2 / S_2) \ 0.25),$$

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{\text{ONS}} = 8.774 \ 1.855P \ 1.517\lg R_3 \ 0.304\lg(N_2 / R_2) \\ 0.328\lg(S_2 / R_2) \quad (\text{для } \lg N_2 \ 0.1, \lg(N_2 / S_2) \ 0.25).$$

$$12 + \lg(\text{N}/\text{H})_{\text{ONS}} = 7.811 \ 0.290P \ 0.081\lg R_3 \ 0.877\lg(N_2 / R_2) \\ 0.002\lg(S_2 / R_2) \quad (\text{для } \lg N_2 \ 0.1),$$



$$12 + \lg(N/H)_{ONS} = 8.241 - 0.781P - 0.612\lg R_3 - 1.455\lg(N_2 / R_2) - 0.209\lg(S_2 / R_2) \quad (\text{для } \lg N_2 = 0.1, \lg(N_2 / S_2) = 0.25),$$

$$12 + \lg(N/H)_{ONS} = 8.080 - 1.476P - 1.349\lg R_3 - 1.259\lg(N_2 / R_2) - 0.004\lg(S_2 / R_2) \quad (\text{для } \lg N_2 = 0.1, \lg(N_2 / S_2) = 0.25).$$

Детальное описание вывода этих соотношений можно найти в работах [1, 22].

Различие между спектрами двух моделей ( $j$  и  $k$ ) областей Н II мы будем характеризовать разницей интенсивностей сильных эмиссионных линий  $R_3, R_2, N_2$  и  $S_2$ . Разница интенсивностей сильных эмиссионных линий в спектрах двух моделей областей Н II может быть определена двумя способами. В первом способе для каждой сильной эмиссионной линии вычислялась разность

$$F_X = (\lg F_X)_j - (\lg F_X)_k.$$

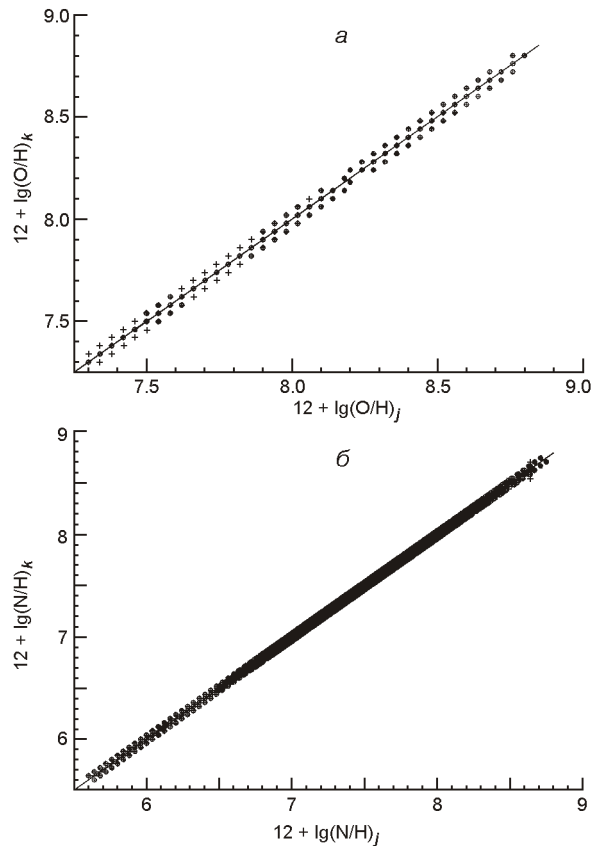
Среднее (абсолютное) значение

$$F_{j,k}(A) = \sqrt{\frac{1}{4} (F_{R_3}^2 + F_{R_2}^2 + F_{N_2}^2 + F_{S_2}^2)}$$

рассматривалось как разность интенсивностей сильных линий в спектрах двух моделей областей Н II. Во втором способе различие между спектрами двух моделей областей Н II мы будем характеризовать максимальным (абсолютным) значением разности интенсивностей выбранных сильных эмиссионных линий  $F_{j,k}^*(A) = \max(|F_{R_3}|, |F_{R_2}|, |F_{N_2}|, |F_{S_2}|)$ .

Требование, чтобы величина  $F_{j,k}(A)$  (или  $F_{j,k}^*(A)$ ) имела минимальное значение, позволяет для любой ( $j$ -й) модели области Н II выбрать из сетки моделей  $k$ -ю модель, интенсивности сильных эмиссионных линий в спектре которой наиболее близки к интенсивностям сильных линий в спектре  $j$ -й модели. Для краткости мы будем называть такие модели спектрально схожими. Мы нашли для каждой модели из нашей сетки спектрально схожую модель, сравнивая интенсивности четырех сильных эмиссионных линий:  $R_3, R_2, N_2$  и  $S_2$ . На рис. 2, *а* дано сравнение содержаний кислорода в спектрально схожих моделях. Кружками показаны спектрально схожие модели, для которых величина  $F_{j,k}(A)$  имеет минимальное значение. Среднее (абсолютное) значение разницы содержаний кислорода в спектрально схожих моделях, найденных по минимальной разнице  $F_{j,k}(A)$ , составляет 0.020 dex, что не превышает шага сетки моделей по О/Н. Крестиками показаны спектрально схожие модели, для которых величина  $F_{j,k}^*(A)$  имеет минимальное значение. В этом случае среднее (абсолютное) значение разницы содержаний кислорода в спектрально схожих моделях составляет 0.030 dex, что также не превышает шаг сетки моделей по О/Н. На рис. 2, *б* дано аналогичное сравнение содержаний

Рис. 2. Коррелятивные зависимости содержаний кислорода (а) и азота (б) в спектрально схожих моделях областей Н II. Кружки и крестики — модели, в рамках которых минимальное значение для четырех линий имеют соответственно величины  $F_{j,k}(A)$  и  $F_{j,k}^*(A)$ . Прямая — линия равных значений



азота. Среднее (абсолютное) значение разницы содержаний азота в спектрально схожих моделях, найденных по минимальной разнице  $F_{j,k}(A)$ , составляет 0.035 dex, и в спектрально схожих моделях, найденных по минимальной разнице  $F_{j,k}^*(A)$ , оно составляет 0.031 dex. Следует отметить, что использование минимального значения величины  $F_{j,k}(A)$  и минимального значения величины  $F_{j,k}^*(A)$  в качестве критерия поиска спектрально схожей модели практически не влияет на результат.

Рис. 2 показывает, что две модели, найденные по условию, чтобы величина  $F_{j,k}(A)$  (или  $F_{j,k}^*(A)$ ) имела минимальное значение, дают близкие оценки содержания кислорода и азота. Это свидетельствует об однозначном соответствии между интенсивностями набора четырех сильных эмиссионных линий в спектре области Н II  $R_3$ ,  $R_2$ ,  $N_2$  и  $S_2$  и содержаниями кислорода и азота в ней.

Является ли минимум  $F_{j,k}(A)$  для спектрально схожих туманностей достаточно хорошо выраженным? Для выяснения этого вопроса нужно сравнить различие между интенсивностями сильных линий в спектре выбранной модели и спектрах всех других моделей областей Н II из нашей сетки, т. е. для фиксированного значения  $j$  найти величины  $F_{j,k}(A)$  для всех значений  $k$  от 1 до  $n$ , где  $n$  — число моделей в

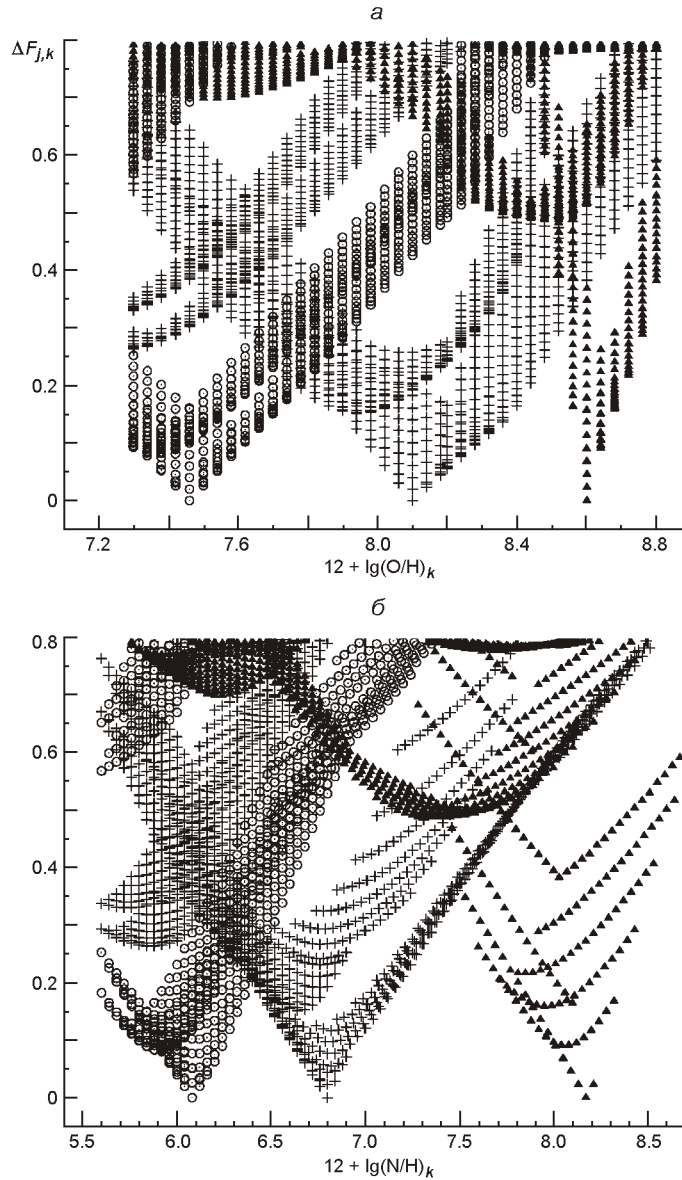


Рис. 3. Разница потоков  $F_{j,k}$  (A) в четырех сильных эмиссионных линиях в спектре выбранной ( $j$ -й) модели и в спектре  $k$ -й модели областей Н II в зависимости от содержаний кислорода (a) и азота (б) в  $k$ -й модели. Кружки, крестики и треугольники — для трех разных значений  $j$

нашей сетке. На рис. 3, a показаны величины  $F_{j,k}$  в зависимости от содержания кислорода в  $k$ -й модели  $12 + \lg(\text{O}/\text{H})_k$  (показаны только модели, для которых  $F_{j,k} = 0.8$ ). Кружками, крестиками и треугольниками показаны значения  $F_{j,k}$  для трех выбранных моделей областей Н II (для трех фиксированных значений  $j$ ). Очевидно, что  $F_{j,k} = 0$  при  $j = k$ . Поэтому значение  $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$ , при котором  $F_{j,k} = 0$ , соответствует содержанию кислорода в выбранной ( $j$ -й) модели. На рис. 3, б показаны величины  $F_{j,k}$  в зависимости от содержания

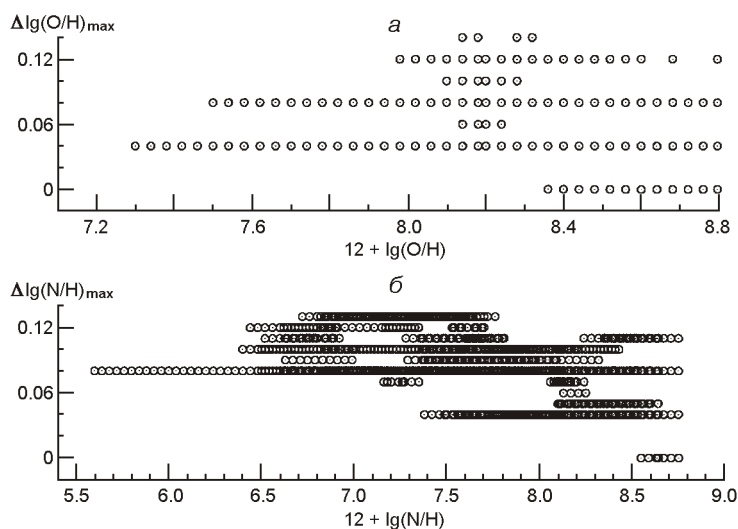


Рис. 4. Максимальная разница содержаний кислорода (а) и азота (б) в двух моделях, для которых величина  $F_{j,k}(A) = 0.041$  (разница потоков составляет 10 %)

азота в  $k$ -й модели  $12 + \lg(\text{O}/\text{H})_k$ . Видно, что минимум  $F_{j,k}$  для спектрально схожих туманностей является достаточно хорошо выраженным.

Условие, чтобы минимум  $F_{j,k}(A)$  был достаточно хорошо выражен, является важным не только с теоретической точки зрения (для выяснения факта однозначного соответствия между интенсивностями четырех сильных эмиссионных линий в спектре туманности и ее химическим составом). Это условие важно также с практической точки зрения, так как от этого зависит точность определения содержаний при помощи «метода сильных линий». Интенсивности эмиссионных линий измеряются с некоторой ошибкой. Предположим, что средняя ошибка измерения сильных линий составляет 10 %, т. е.  $F_{j,k}(A) = 0.041$ . Для фиксированной  $j$ -й модели мы нашли в нашей сетке моделей все  $k$ -е модели, которые удовлетворяют условию  $F_{j,k}(A) < 0.041$ . Затем среди этих моделей мы выбрали модель, для которой разница содержаний кислорода  $\lg(\text{O}/\text{H})_{j,k}$  максимальна. Используя этот алгоритм, значения  $\lg(\text{O}/\text{H})_{\max}$  при  $F_{j,k}(A) < 0.041$  были найдены для всех моделей нашей сетки. Найденные значения  $\lg(\text{O}/\text{H})_{\max}$  показаны в зависимости от содержания кислорода в исследуемой модели кружками на рис. 4, а. На рис. 4, б показано то же для азота. Из рис. 4 следует, что различие содержаний кислорода и азота в двух туманностях, в спектрах которых разность интенсивностей сильных линий набора А составляет 10 %, не превышает 0.15—0.20 dex.

**Наборы трех линий (набор В).** Сначала рассмотрим случай трех линий  $R_3$ ,  $R_2$  и  $N_2$ . В работе [22] были получены соотношения, связывающее значение значения электронной температуры  $t_{\text{ON}}$ , содержания

кислорода  $12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{ON}$  и азота  $12 + \lg(\text{N}/\text{H})_{ON}$  с интенсивностями этих линий:

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

(для  $\lg N_2 \quad 0.1$ ),

$$t_{ON} = [1.437 \quad 0.2541\lg R_3 \quad 0.0131\lg R_2 \quad 0.3021\lg(N_2 / R_2)]^{-1}$$

(для  $\lg N_2 \quad 0.1, \lg(N_2 / S_2) \quad 0.25$ ),

$$t_{ON} = [0.999 \quad 0.1101\lg R_3 \quad 0.1691\lg R_2 \quad 0.2781\lg(N_2 / R_2)]^{-1}$$

(для  $\lg N_2 \quad 0.1, \lg(N_2 / S_2) \quad 0.25$ );

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

(для  $\lg N_2 \quad 0.1$ ),

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{ON} = 8.642 \quad 0.0771\lg R_3 \quad 0.4111\lg R_2 \quad 0.6011\lg(N_2 / R_2)$$

(для  $\lg N_2 \quad 0.1, \lg(N_2 / S_2) \quad 0.25$ ),

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{ON} = 8.013 \quad 0.9051\lg R_3 \quad 0.6021\lg R_2 \quad 0.7511\lg(N_2 / R_2)$$

(для  $\lg N_2 \quad 0.1, \lg(N_2 / S_2) \quad 0.25$ );

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

(для  $\lg N_2 \quad 0.1$ ),

$$12 + \lg(\text{N}/\text{H})_{ON} = 7.928 \quad 0.2911\lg R_3 \quad 0.4541\lg N_2 \quad 0.9531\lg(N_2 / R_2)$$

(для  $\lg N_2 \quad 0.1, \lg(N_2 / S_2) \quad 0.25$ ),

$$12 + \lg(\text{N}/\text{H})_{ON} = 7.505 \quad 0.8391\lg R_3 \quad 0.4921\lg N_2 \quad 0.9701\lg(N_2 / R_2)$$

(для  $\lg N_2 \quad 0.1, \lg(N_2 / S_2) \quad 0.25$ ).

Детальное описание вывода этих соотношений можно найти в работах [1, 22].

Разница интенсивностей  $F_{j,k}(B)$  этих линий в спектрах двух ( $j$ -й и  $k$ -й) моделей областей Н II определяется выражениями

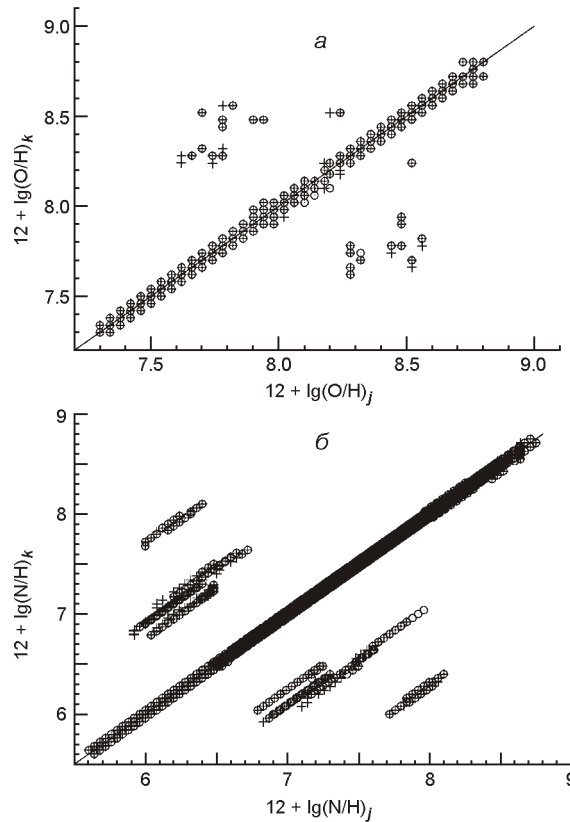
$$F_{j,k}(B) = \sqrt{\frac{1}{3} (F_{R_3}^2 + F_{R_2}^2 + F_{N_2}^2)},$$

и

$$F_{j,k}^*(B) = \max(|F_{R_3}|, |F_{R_2}|, |F_{N_2}|).$$

Снова мы нашли для каждой модели из нашей сетки спектрально схожую модель, требуя, чтобы величина  $F_{j,k}(B)$  имела минимальное значение. На рис. 5, а дано сравнение содержаний кислорода в спектрально схожих моделях. Кружками показаны спектрально схожие модели, для которых величина  $F_{j,k}(B)$  имеет минимальное значение. Видно, что для большей части спектрально схожих моделей областей Н II, найденных из условия минимального значения величины

Рис. 5. Коррелятивные зависимости содержаний кислорода (а) и азота (б) в спектрально схожих моделях областей Н II. Кружки и крестики — модели, в рамках которых минимальное значение для трех линий ( $R_3$ ,  $R_2$ ,  $N_2$ ) имеют соответственно величины  $F_{j,k}(B)$  и  $F_{j,k}^*(B)$ . Прямая — линия равных значений



$F_{j,k}(B)$  для трех линий  $R_2$ ,  $R_3$  и  $N_2$ , значения содержания кислорода достаточно близки. Однако для некоторой части спектрально схожих моделей областей Н II (для 185 из 5112) различие содержаний кислорода превышает 0.1 dex. Крестиками показаны спектрально схожие модели, для которых величина  $F_{j,k}^*(B)$  имеет минимальное значение. Для большей части спектрально схожих моделей областей Н II, найденных из условия минимального значения величины  $F_{j,k}(B)$  для трех линий  $R_2$ ,  $R_3$  и  $N_2$ , значения содержания кислорода достаточно близки, и для небольшой части спектрально схожих моделей областей Н II (для 258 из 5112) различие содержаний кислорода превышает 0.1 dex. На рис. 5, б дано аналогичное сравнение содержаний азота. Как и для кислорода, для большей части спектрально схожих моделей областей Н II значения содержания азота достаточно близки.

Следует отметить, что неоднозначность появляется в моделях областей Н II, в которых источником ионизирующего излучения является звезда с температурой  $T_{\text{эф}} = 40000$  К.

Налагая требование  $F_{j,k}(B) = 0.041$ , для каждой модели из нашей сетки мы выбрали модель, дающую максимальную разницу содержания кислорода  $\lg(O/H)_{j,k}$ . Найденные значения  $\lg(O/H)_{\text{max}}$  показаны в зависимости от содержания кислорода в исследуемой модели кружками на рис. 6, а. На рис. 6, б показано то же для азота. Видно, что

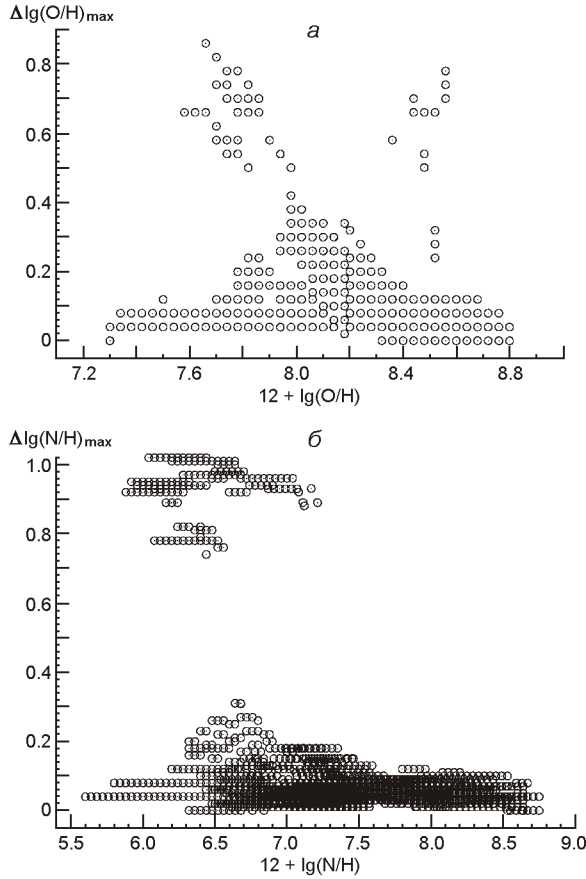


Рис. 6. Максимальная разница содержаний кислорода (а) и азота (б) в двух моделях областей Н II, для которых величина  $F_{j,k}(B)$  0.041 для трех линий ( $R_3$ ,  $R_2$ ,  $N_2$ ) в их спектрах (разница потоков составляет 10 %)

в некоторых случаях различие содержаний кислорода и азота в двух туманностях, в спектрах которых разность интенсивностей сильных линий набора В составляет 10 %, может достигать порядка.

**Наборы трех линий (набор С).** Для случая трех линий  $R_3$ ,  $N_2$  и  $S_2$  соотношения, связывающее значение значения электронной температуры  $t_{NS}$ , содержания кислорода  $12 + \lg(O/H)_{NS}$  и азота  $12 + \lg(N/H)_{NS}$  с интенсивностями, были получены в работе [20]:

$$t_{NS}^1 = 1.185 - 0.351 \lg R_3 - 0.273 \lg S_2 - 0.059 \lg(N_2 / S_2) \quad (\text{для } \lg N_2 = 0.1),$$

$$t_{NS}^1 = 1.226 - 0.219 \lg R_3 - 0.133 \lg N_2 - 0.225 \lg(N_2 / S_2) \quad (\text{для } \lg N_2 = 0.1, \lg(N_2 / S_2) = 0.25),$$

$$t_{NS}^1 = 0.953 - 0.117 \lg R_3 - 0.230 \lg N_2 - 0.033 \lg(N_2 / S_2) \quad (\text{для } \lg N_2 = 0.1, \lg(N_2 / S_2) = 0.25);$$

$$12 + \lg(O/H)_{NS} = 8.454 - 0.216 \lg R_3 - 0.362 \lg S_2 - 0.101 \lg(N_2 / S_2) \quad (\text{для } \lg N_2 = 0.1),$$

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{NS} = 8.456 - 0.0821\lg R_3 - 0.3911\lg N_2 - 0.2901\lg(N_2 / S_2)$$

(для  $\lg N_2 = 0.1, \lg(N_2 / S_2) = 0.25$ ),

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{NS} = 7.881 - 0.9291\lg R_3 - 0.6501\lg N_2 - 0.0251\lg(N_2 / S_2)$$

(для  $\lg N_2 = 0.1, \lg(N_2 / S_2) = 0.25$ );

$$12 + \lg(\text{N}/\text{H})_{NS} = 7.414 - 0.3831\lg R_3 - 0.1191\lg S_2 - 0.9881\lg(N_2 / S_2)$$

(для  $\lg N_2 = 0.1$ ),

$$12 + \lg(\text{N}/\text{H})_{NS} = 7.250 - 0.0781\lg R_3 - 0.5291\lg N_2 - 0.9061\lg(N_2 / S_2)$$

(для  $\lg N_2 = 0.1, \lg(N_2 / S_2) = 0.25$ ),

$$12 + \lg(\text{N}/\text{H})_{NS} = 6.599 - 0.8881\lg R_3 - 0.6631\lg N_2 - 0.3711\lg(N_2 / S_2)$$

(для  $\lg N_2 = 0.1, \lg(N_2 / S_2) = 0.25$ ).

Детальное описание вывода этих соотношений можно найти в работе [20].

Как и выше, разница интенсивностей  $F_{j,k}(C)$  этих линий в спектрах двух ( $j$ -й и  $k$ -й) моделей областей Н II дается выражением

$$F_{j,k}(C) = \sqrt{\frac{1}{3} (F_{R_3}^2 + F_{N_2}^2 + F_{S_2}^2)},$$

и

$$F_{j,k}^*(C) = \max(|F_{R_3}|, |F_{N_2}|, |F_{S_2}|).$$

Снова мы нашли для каждой модели из нашей сетки спектрально схожую модель, требуя, чтобы величина  $F_{j,k}(C)$  имела минимальное значение. На рис. 7, а дано сравнение содержаний кислорода в спектрально схожих моделях. Кружками показаны спектрально схожие модели, для которых величина  $F_{j,k}(C)$  имеет минимальное значение. Среднее (абсолютное) значение разницы содержаний кислорода в спектрально схожих моделях, найденных по минимальной разнице  $F_{j,k}$ , составляет 0.030 dex. Крестиками показаны спектрально схожие модели, для которых величина  $F_{j,k}^*(C)$  имеет минимальное значение.

В этом случае среднее (абсолютное) значение разницы содержаний кислорода в спектрально схожих моделях составляет 0.035 dex. На рис. 7, б дано аналогичное сравнение содержаний азота. Среднее (абсолютное) значение разницы содержаний азота в спектрально схожих моделях, найденных по минимальной разнице  $F_{j,k}(C)$ , составляет 0.028 dex, и в спектрально схожих моделях, найденных по минимальной разнице  $F_{j,k}^*(C)$ , составляет также 0.028 dex.

Для каждой модели из нашей сетки мы нашли модель, для которой разница интенсивностей сильных линий  $F_{j,k}(C)$  не превышает 10 %, и различие содержаний кислорода  $\lg(\text{O}/\text{H})_{j,k}$  максимально. Найденные значения  $\lg(\text{O}/\text{H})_{\max}$  показаны в зависимости от содержания кислорода в исследуемой модели кружками на рис. 8, а. На рис. 8, б



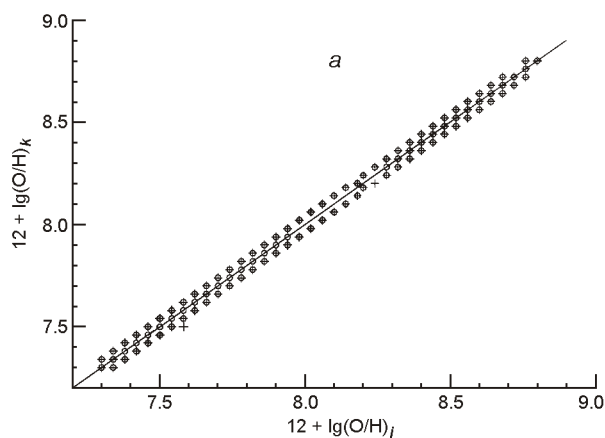


Рис. 7. Коррелятивные зависимости содержаний кислорода (а) и азота (б) в спектрально схожих моделях областей Н II. Кружки и крестики — модели, в рамках которых минимальное значение для трех линий ( $R_3, N_2, S_2$ ) имеют величины  $F_{j,k}(C)$  и  $F_{j,k}^*(C)$  соответственно. Прямая — линия равных значений

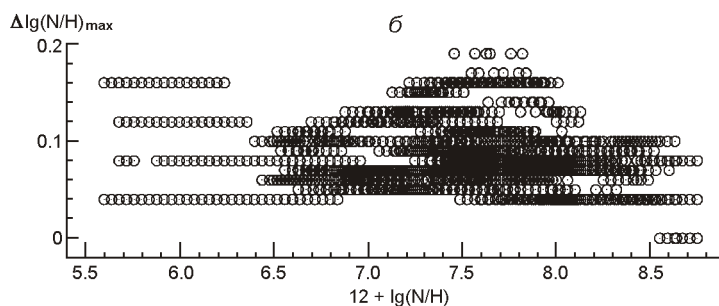
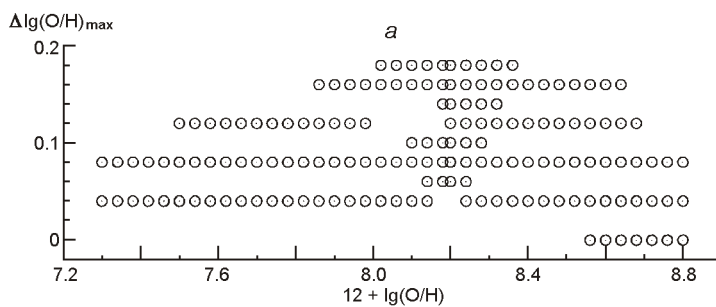
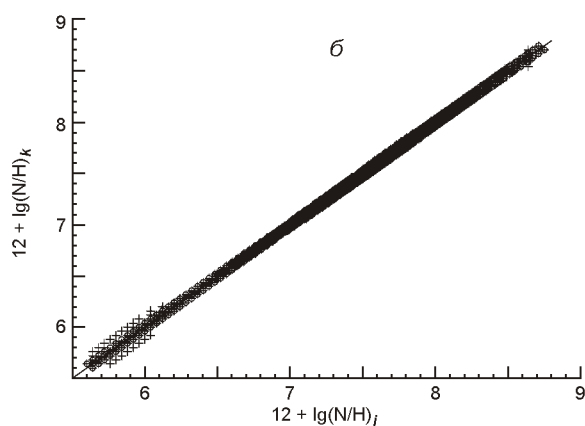


Рис. 8. Максимальная разница содержаний кислорода (а) и азота (б) в двух моделях областей Н II, для которых величина  $F_{j,k}(C) = 0.041$  для трех линий ( $R_3, S_2, N_2$ ) в их спектрах (разница потоков составляет 10 %)

показано то же для азота. Видно, что различие содержаний кислорода и азота в двух туманностях, в спектрах которых разность интенсивностей сильных линий набора С составляет 10 %, не превышает 0.17—0.20 dex.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод определения содержания тяжелых элементов в областях Н II, который получил название «метод сильных линий», основывается на предположении, что некоторые комбинации интенсивностей сильных эмиссионных линий в спектрах областей Н II могут служить достаточно хорошими индикаторами металличности и электронной температуры в туманности. Подавляющее большинство комбинаций интенсивностей сильных линий, которые используются в качестве индикаторов металличности и/или электронной температуры в туманности, имеют существенный недостаток: связь между выбранным индикатором и металличностью не является однозначной на всем интервале металличностей областей Н II. Мы исследовали соответствие между интенсивностями сильных эмиссионных линий в спектре области Н II и ее химическим составом. Для этого рассчитана обширная сетка фотоионизационных моделей областей Н II, 5112 моделей областей Н II с содержаниями кислорода  $7.3 \leq \lg(\text{O}/\text{H}) \leq 8.8$ . Распределение энергии в спектре ионизирующего излучения бралось из модели фотосферы звезды, металличность которой близка к металличности области Н II. Следует отметить, что использование сетки моделей областей Н II, рассчитанной с распределением энергии в спектре ионизирующего излучения, которое дают модели фотосфер звезд фиксированной (солнечной) металличности, практически не изменяет наши выводы.

Рассмотрено три набора сильных линий: набор А включает линии  $R_3 = ([\text{O III}] \ 495.9 + 500.7)/\text{H}$ ,  $R_2 = ([\text{O II}] \ 372.7 + 372.9)/\text{H}$ ,  $N_2 = ([\text{N II}] \ 654.8 + 658.4)/\text{H}$  и  $S_2 = ([\text{S II}] \ 671.7 + 673.1)/\text{H}$ ; набор В включает линии  $R_3$ ,  $R_2$  и  $N_2$ ; набор С включает линии  $R_3$ ,  $N_2$  и  $S_2$ . Найдено однозначное соответствие между химическим составом туманности и интенсивностями наборов линий А или С. Две модели областей Н II с близкими интенсивностями наборов линий А (или С) имеют близкие содержания кислорода и азота. Различие содержаний кислорода и азота в двух моделях областей Н II, в спектрах которых разность интенсивностей сильных линий набора А (или С) составляет 10 %, не превышает 0.15—0.20 dex.

Для набора линий В однозначное соответствие наблюдается для большинства моделей и теряется 5 % моделей областей Н II. В некоторых случаях различие содержаний кислорода и азота в двух моделях областей Н II, в спектрах которых разность интенсивностей сильных линий набора В составляет 10 %, может достигать порядка величины. Неоднозначность возникает в моделях областей Н II, в которых источ-

ником ионизирующего излучения является звезда с температурой  $T_{\text{эф}} = 40000$  К.

Результаты, полученные на основе сетки моделей областей Н II, рассчитанной в данной работе, свидетельствуют в пользу того, что варианты метода сильных линий (калибровки) для определения металличности областей Н II, основанные на интенсивностях наборов линий А и С, более надежны, чем калибровки, основанные на интенсивностях набора линий В. В будущих наших работах мы планируем более детально изучить влияние формы спектра ионизирующего излучения, получаемой в разных моделях звездных атмосфер, на появление неоднозначного соответствия между интенсивностями сильных эмиссионных линий в спектре области Н II и ее химическим составом.

Работа была частично финансирована в рамках программы «КосмоМикроФизика» Национальной академии наук и Государственного космического агентства Украины (Л. С. П.) и в рамках госбюджетной фундаментальной научно-исследовательской темы ФА-87Ф Министерства образования и науки, молодежи и спорта Украины, номер Госрегистрации 0111U001087 (Б. Я. М., Р. И. К.)

1. *Плюгин Л. С.* Ионизованный газ в галактиках: физическое состояние и химический состав. — Киев, 2012.—303 с.
2. *Alloin D., Collin-Souffrin S., Joly M., Vigroux L.* Nitrogen and oxygen abundances in galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1979.—**78**.—P. 200—216.
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**.—P. 981—997.
4. *Davidson K.* On photoionization analyses of emission spectra of quasars // *Astrophys. J.*—1977.—**218**.—P. 20—32.
5. *Dopita M. A., Fischera J., Sutherland R. S., et al.* Modelling the pan-spectral energy distribution of starburst galaxies. III. Emission line diagnostics of ensembles of evolving H II regions // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2006.—**167**.—P. 177—200.
6. *Ferland G., Binette L., Contini M., et al.* The Lexington benchmarks for numerical simulations of nebulae // *The analysis of emission lines* / Eds R. Williams, M. Livio. — Cambridge: Univ. Press, 1995.—P. 83—96. — (Space Telescope Science institute Symposium Series).
7. *Ferland G. J.* Hazy: a brief introduction to cloudy version 08. — Lexington: Univ. Kentucky, Phys. Depart. Intern. Rep., 2008. — 807 p. — (<http://www.nublado.org>).
8. *Gutierrez L., Beckman J. E.* The galaxy-wide distributions of mean electron density in the H II regions of M 51 and NGC 4449 // *Astrophys. J.*—2010.—**710**.—P. L44—L48.
9. *Holovaty V. V., Melekh B. Ya., Havrylova N. V.* The chemical composition of galactic planetary nebulae: Optimization photoionization modeling // *Astron. Reports.*—2008.—**52**.—P. 327—334.
10. *Lanz T., Hubeny I.* A grid of non-LTE line-blanketed model atmospheres of O-type stars // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2003.—**146**.—P. 417—441.
11. *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**.—P. 1—62.

12. *Melekh B. Ya.* Optimized photoionization modelling of H II region in blue compact dwarf galaxy SBS 0940+544 // *J. Phys. Studies.*—2006.—**10**.—P. 148—159.
13. *Melekh B. Ya.* Optimized photoionization modelling of H II region in blue compact dwarf galaxy SBS 0335-052 // *J. Phys. Studies.*—2007.—**11**.—P. 353—365.
14. *Melekh B. Ya., Holovatyy V. V., Izotov Yu. I.* Determination of the physical parameters, Lyman continua, and chemical compositions of HII regions in blue compact dwarf galaxies // *Astron. Reports.*—2008.—**52**.—P. 184—200.
15. *Melekh B. Ya.* Two-stages optimized photoionization modelling of H II region in blue compact galaxy SBS 0335-052// *J. Phys. Studies.*—2009.—**13**.—P. 3901-1—3901-16.
16. *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**.—P. 95—113.
17. *Pequignot D.* Workshop on model nebulae / Ed. by D. Pequignot. — Paris, Publication de l'Observatoire de Meudon, 1986.
18. *Pilyugin L. S.* On the oxygen abundance determination in H II regions. The problem of the line intensities — oxygen abundance calibration // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**362**.—P. 325—332.
19. *Pilyugin L. S.* On the oxygen abundance determination in H II regions. High-metallicity regions // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**369**.—P. 594—604.
20. *Pilyugin L. S., Mattsson L.* Abundance determination in H II regions from spectra without [O II] 3727+ 3729 line // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2011.— **412**.—P. 1145—1150. astro-ph 1011. 1431
21. *Pilyugin L. S., Thuan T. X.* Oxygen abundance determination in H II regions: the strong line intensities — abundance calibration revisited // *Astrophys. J.*—2005.—**631**.—P. 231—243.
22. *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**.—P. 1738—1751.
23. *Stasinska G.* Abundance determinations in H II regions and planetary nebulae // *Cosmochemistry: XIII Canary Islands Winter School of Astrophysics / Eds C. Esteban, R. J. G. López, A. Herrero, F. Sánchez.* — Cambridge: Univ. Press, 2004.—P. 115—170.
24. *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**.—P. L127—L130.
25. *Thuan T. X., Pilyugin L. S., Zinchenko I. A.* The redshift evolution of oxygen and nitrogen abundances in emission-line SDSS galaxies // *Astrophys. J.*—2010.— **712**.—P. 1029—1048.
26. *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**.—P. 898—913.
27. *Vilchez J. M., Esteban C.* The chemical composition of H II regions in the outer Galaxy // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1996.—**280**.—P. 720—734.
28. *Zaritsky D., Kennicutt R. C., Huchra J. P.* H II regions and the abundance properties of spiral galaxies // *Astrophys. J.*—1994.—**420**.—P. 87—109.

Поступила в редакцию 03.10.11