

НЕКОТОРЫЕ ЗАВИСИМОСТИ, ПОЛУЧЕННЫЕ ИЗ СПЕКТРОФОТОМЕТРИИ
HII-ОБЛАСТЕЙ В ГАЛАКТИКАХ

А. Н. БУРЕНКОВ

Исследуются зависимости между интенсивностями запрещенных линий или их отношениями и обилиями кислорода и азота в HII-областях галактик разных морфологических типов. По морфологическим признакам галактики разделены на 4 типа: спиральные, клочковатые иррегулярные, голубые компактные и иррегулярные магелланова типа. Используются спектрофотометрические данные о 139 HII-областях в 34 галактиках, полученные на 6-м телескопе, и данные о 360 HII-областях в 126 галактиках из литературных источников.

Получены линейные приближения зависимостей для определения обилия кислорода и азота по интенсивностям линий $[OII]+[OIII]$ и $[NII]$, соответственно.

Отмечается существенное отличие зависимостей (N/H) и (N/O) от (O/H) для галактик разных типов, которое объясняется доминированием разных механизмов звездообразования в них (непрерывное звездообразование, вспышка звездообразования) и разной продолжительностью активности этих механизмов. Обсуждается особый статус клочковатых иррегулярных галактик в плане активности звездообразования и химической эволюции в них.

Relations between forbidden line intensities (or their ratios) and oxygen and nitrogen abundances are investigated in HII regions of galaxies of different morphological types. Galaxies are divided into 4 types according to their morphology: spiral, clumpy irregular, blue compact, and magellanic irregular. Spectrophotometrical data on 139 HII regions in 34 galaxies, obtained with the 6-m telescope, and data on 360 HII regions in 126 galaxies from literature are used.

Line approximations of relations for oxygen and nitrogen abundance determination by $[OII]+[OIII]$ and $[NII]$ line intensities correspondingly are obtained.

An essential difference in relations (N/H) and (N/O) versus (O/H) is noted for different types of galaxies, that is explained by dominating of different mechanisms of star formation in them (continuous star formation, bursts of star formation) and different duration of these mechanism action. A special status of clumpy irregular galaxies is discussed in a sense of the star formation activity and chemical evolution.

1. ВВЕДЕНИЕ

В течение около десяти последних лет автором, в сотрудничестве с А.Р. Петросяном и Э.Е. Хачикьяном, проводилось детальное спектрофотометрическое исследование галактик со сверхассоциациями (СА) на 6-м телескопе Специальной астрофизической обсерватории АН СССР (БТА). В результате этого были получены спектрофотометрические данные для 139 НII-областей в 34 галактиках. Примерно у половины из этих НII-областей были измерены интенсивности эмиссионных линий в видимой области спектра ($\lambda\lambda$ 3700 - 7000 Å) и определены обилия гелия, кислорода, азота и серы. Для остальных были измерены интенсивности линий только в красной области спектра ($\lambda\lambda$ 6400 - 7000 Å).

Среди исследованных галактик основную часть (27) составляют галактики Маркаряна с СА из списков Саакян и Хачикяна (1975); Петросяна и др. (1983, 1984), а остальные 7 - из списка нормальных галактик с СА (Шахбазян, 1970).

В данной работе исследуются зависимости между параметрами, связанными с интенсивностями линий или их отношениями и обилием элементов, для различных морфологических типов галактик. При этом использованы как наши результаты, так и данные по 360 НII-областям в 126 галактиках из литературных источников.

Ранее подробное исследование зависимостей между интенсивностями линий в гигантских НII-областях спиральных галактик было проведено в работах МакКолла (1982) и МакКолла и др. (1985). Это исследование стало прототипом настоящей работы. Здесь соответствующие зависимости изучены в гигантских НII-областях не только спиральных галактик, но и в голубых компактных галактиках, клочковатых иррегулярных галактиках и иррегулярных галактиках магелланова типа.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ТЕРМИНОЛОГИЯ

Тип НII-области. По морфологическим типам исследуемых галактик НII-области разделены на:

- НII Sp - НII-области в спиральных галактиках в основном поздних морфологических типов Sc - Sd (около 320 НII-областей в 42 галактиках);
- НII SIG - НII-области в клочковатых иррегулярных галактиках (далее SIG) (52 НII-области в 7 галактиках);
- НII BCG - НII-области в голубых компактных галактиках (BCG) (около 65 НII в 58 галактиках);
- НII Irr - НII-области в иррегулярных галактиках типа Im (около 65 НII-областей в 41 галактике).

Интенсивности линий и их отношения. Ниже приведено обозначение параметра, связанного с интенсивностями линий или их отношением и указано, как данный параметр определялся.

Используемые отношения линий. Используются следующие обозначения интенсивностей линий, определяемые как:

$[OII]=100 \cdot \{I([OII] \lambda 3726) + I([OII] \lambda 3729)\} / I(H_{\beta})$ для диагностики обилия O^{+} ;

$[OIII]=100 \cdot \{I([OIII] \lambda 4959) + I([OIII] \lambda 5007)\} / I(H_{\beta})$ диагностика обилия O^{++} и индекс возбуждения НII-области;

$[NII]=100 \cdot \{I([NII] \lambda 6548) + I([NII] \lambda 6584)\} / I(H_{\alpha})$ диагностика обилия N^{+} ;

$[SII]=100 \cdot \{I([SII] \lambda 6717) + I([SII] \lambda 6731)\} / I(H_{\alpha})$ диагностика обилия S^{+} ;

[OII]+[OIII] - суммарная интенсивность линий, отражающая относительное содержание (O/H), используется в эмпирических зависимостях для определения T_e .

Необходимо отметить, что при сравнении с результатами других авторов нужно учитывать, что относительные интенсивности линий умножены на 100, и в отношения интенсивностей [NII]/[OII] и [SII]/[OII] входит приблизительно постоянный множитель $I(H_{\alpha})/I(H_{\beta})$, т.к. используемые данные исправлены за покраснение.

В данной работе используются отношения интенсивностей линий: [OIII]/[OII] как параметр, отражающий ионизационную структуру HII-области; [NII]/[OII], [SII]/[OII], [NII]/[SII] как индикаторы отношения обилий N/O, S/O и N/S, соответственно.

Обилия элементов. Относительные содержания элементов на зависимостях представлены в логарифмическом виде: $[X/H]=\lg(X/H)+12$.

3. ДАННЫЕ

В исследуемых зависимостях используются данные, полученные нами на БТА. Ниже приведены ссылки на публикации, где эти данные представлены, и перечислены объекты, для которых данные спектrophотометрии не опубликованы.

Для 16 HII-областей в 5 спиральных галактиках данные спектrophотометрии опубликованы в работах Буренкова и др. (1983, 1984, 1987а и б, 1988а). Для 51 HII в галактиках NGC 1084, 2276, 4254, 4451, 6412, 6643, 7448; Марк 15, 107, 404 и 603 данные не опубликованы.

Для 42 HII-областей в 5 SIG данные опубликованы в работах: Андреасян и др. (1987), Буренков (1988), Буренков и Хачикян (1990), Буренков и др. (1990, 1991). Не опубликованы данные по 9 HII-областям в Марк 86.

Для 3 HII-областей в 2 VCG данные опубликованы в работах: Буренков и др. (1987а и 1988б), и для 7 HII-областей в галактиках Марк 116, 209, 294 и анонимных изолированных HII около Марк 261/262 данные не опубликованы.

Для 5 HII в 2 Irr галактиках данные опубликованы в работах: Буренков и Хачикян (1986), Андреасян и др. (1986), а по 13 HII в 3 галактиках NGC 4656, Марк 94 и 156 - не опубликованы.

Дополнительно собраны аналогичные данные, опубликованные в литературе.

Для 262 HII-областей в 28 спиральных галактиках использованы данные Бенвенути и др. (1973), Пеймберта и Торрес-Пеймберт (1977), Талента и Дюфо (1979), Пейгела и др. (1979, 1980), Дюфо и др. (1980), Квиттера и Аллера (1981), Талента (1982), Шейвера и др. (1983), Эдмундса и Пейгела (1984), МакКолла и др. (1985), Диаза и Този (1986), Диаза и др. (1987), Вилчеза и др. (1988).

Для 10 HII-областей в 4 SIG использованы данные Танигучи и Тамуры (1981), Бузгарда и др. (1982), Дюфло-Огард и Аллоин (1982) и Танигучи (1986).

Для 61 HII-области в 55 VCG использованы данные Канса и Сарджента (1983), Аксона и др. (1988), Изотова и др. (1990). В ряде работ приведены данные как для HII VCG, так и для HII Irr: Аллоин и др. (1978), Френча (1980), Кэмпбелла и др. (1986), Динерштейна и Шилдса (1986), Заморано и Рего (1986), Вигро и др. (1987), Дюфо и др. (1988).

Для 51 HII в 39 Irr галактиках использованы также данные Кенникатта и др. (1980), Пейгела и др. (1980), Дюфо и др. (1982), Хантера и др. (1982), Месиса и др. (1985), Пеймберта и др. (1986), Гонзалез-Риеста и др. (1988), Йохансона (1988).

4. ЗАВИСИМОСТИ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ЛИНИЙ ОТ ИНДЕКСА ВОЗБУЖДЕНИЯ

На рис. 1 представлены зависимости $[OII]$, $[NII]$, $[SII]$ и $[NII]/[SII]$ от индекса возбуждения $[OIII]$. NII Sp демонстрируют довольно тесную зависимость $[OII]$ от $[OIII]$ в широком диапазоне изменения обоих параметров, показывая пологое увеличение $[OII]$ на низком возбуждении и крутой спад на высоком. Это несколько отличается от вида зависимости, полученной МакКоллом и др. (1985), где крутой спад слабо выражен из-за отсутствия в их выборке объектов, подобных NGC 2359 в Галактике (Талент, Дюфо, 1979), имеющих очень низкое значение $[OII]$ на высоком возбуждении.

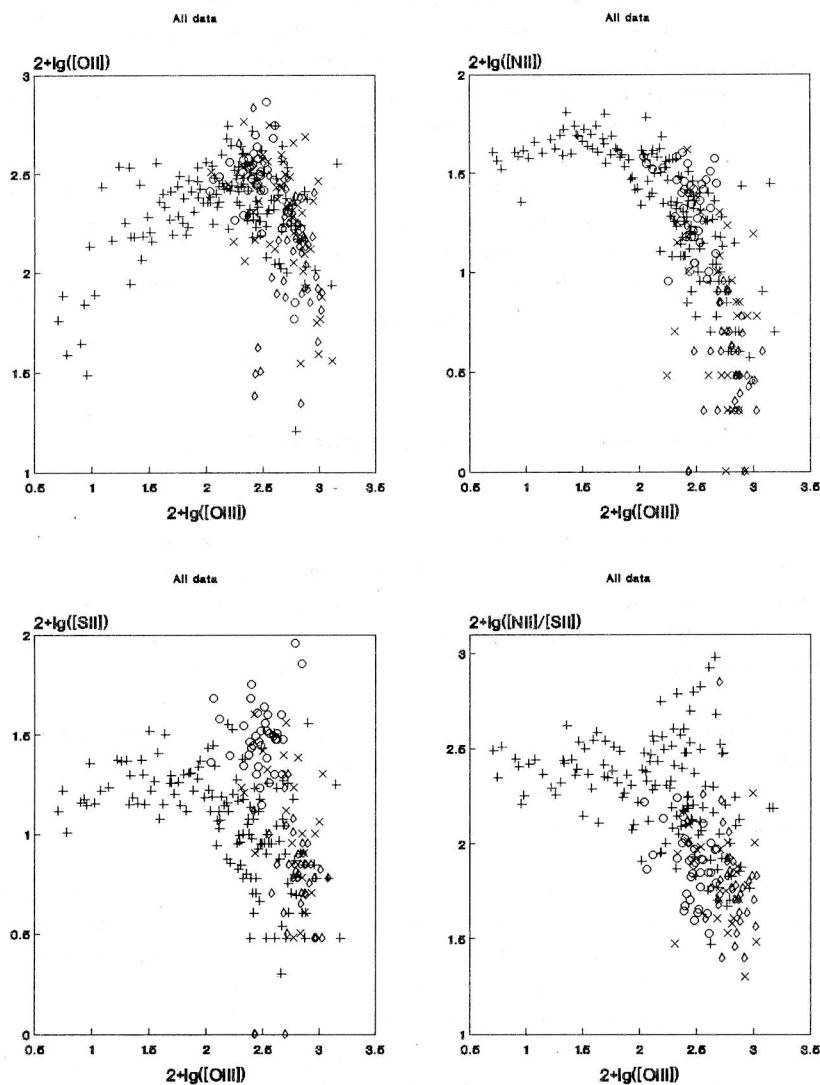


Рис. 1. Зависимости интенсивностей линий $[OII]$, $[NII]$, $[SII]$ и отношения $[NII]/[SII]$ от индекса возбуждения ($[OIII]$). NII -области спиральных галактик обозначены "+", SII - "O", Irr - "x" и BCG - "<>".

Три других типа НII-областей располагаются на диаграмме в более узком диапазоне по [OIII]. НII SIG сконцентрировались в вершине зависимости, НII BCG занимают область резкого спада, а НII Irr - всю область от вершины до края спада.

Зависимости [NII] и [SII] от [OIII] для НII Sp показывают такой же крутой спад на высоком возбуждении, а на низком возбуждении [NII] и [SII] почти не зависят от [OIII]. Рассеяние точек на второй зависимости заметно выше, чем на первой. Другие 3 типа НII-областей на зависимости [NII] от [OIII] хорошо согласуются с зависимостью для НII Sp высокого возбуждения, а на диаграмме [SII] от [OIII] смещены к более высоким значениям [SII]. НII SIG показывают заметно больший избыток в интенсивности [SII]. Последнее не связано, по-видимому, с сильным отличием в обилии S в областях НII SIG по сравнению с другими типами НII-областей, а скорее всего вызвано некоторым вкладом от ударных волн. В пользу этого свидетельствует то, что на следующей зависимости [NII]/[SII] от [OIII] НII SIG так сильно от других типов не отличаются, а отношение [NII]/[SII] является хорошим индикатором отношения обилий N/S (Бенвенути и др., 1973; Комте, 1975) и мало чувствительно к T_e и N_e .

Отношение [NII]/[SII] для НII Sp не показывает заметной зависимости от [OIII], но рассеяние точек сильно возрастает на высоком возбуждении, а остальные три типа НII-областей располагаются на диаграмме довольно компактной группой в области малых значений отношения [NII]/[SII], что, вероятно, отражает более низкое обилие азота в этих НII-областях, чем в среднем в НII Sp, либо больший вклад от ударных волн.

5. ЗАВИСИМОСТИ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ЛИНИЙ И ИХ ОТНОШЕНИЙ ОТ ИНДЕКСА СОДЕРЖАНИЯ МЕТАЛЛОВ

На рис. 2, 3 представлены зависимости интенсивности линий [OII], [OIII], [NII] и [SII] и их отношений к [OII] от суммарной интенсивности [OII]+[OIII], которую иногда называют индексом содержания металлов или индексом металличности (МакКолл, 1982). Действительно, для большей части НII-областей наблюдается почти линейная зависимость $\lg([OII]+[OIII])$ от обилия кислорода [O/H] (Пейгел и др., 1979, 1980; Шейвер и др., 1983), что вполне оправдывает употребление этого термина относительно [OII]+[OIII], к этой зависимости мы еще вернемся позже.

Зависимости [OII], [OIII] и [OIII]/[OII] от индекса содержания металлов демонстрируют связь его с ионизационной структурой НII-области. В областях низкого возбуждения индекс в основном определяется интенсивностью [OII], высокого - доминирует [OIII].

Зависимости [NII], [SII] и [NII]/[SII] от индекса содержания металлов имеют такой же вид, как и от индекса возбуждения, но с меньшим разбросом точек, что отражает более слабую, чем у [OIII], связь [OII]+[OIII] с ионизационной структурой НII-области (Пейгел и др., 1979; МакКолл, 1982).

Тесную и монотонную зависимость от $([OII]+[OIII])$ демонстрирует отношение [NII]/[OII]. Для всех типов НII-областей выстраивается одна общая зависимость, но обращает на себя внимание более крутой ее наклон в области высоких температур (т.е. на больших значениях индекса металличности).

У [SII]/[OII] зависимость от индекса заметно менее тесная, чем у

$[NII]/[OII]$, особенно на высоких значениях $[OII]+[OIII]$. Это, по-видимому, связано с флуктуациями плотности (МакКолл, 1982).

NII CG, Igg и VCG имеют несколько большие $[SII]/[OII]$, чем NII Sp на тех же значениях индекса. Как отмечалось выше, это, возможно, связано с влиянием ударных волн, хотя в большинстве исследуемых NII -областей, скорее всего, доминирует фотоионизационный механизм возбуждения.

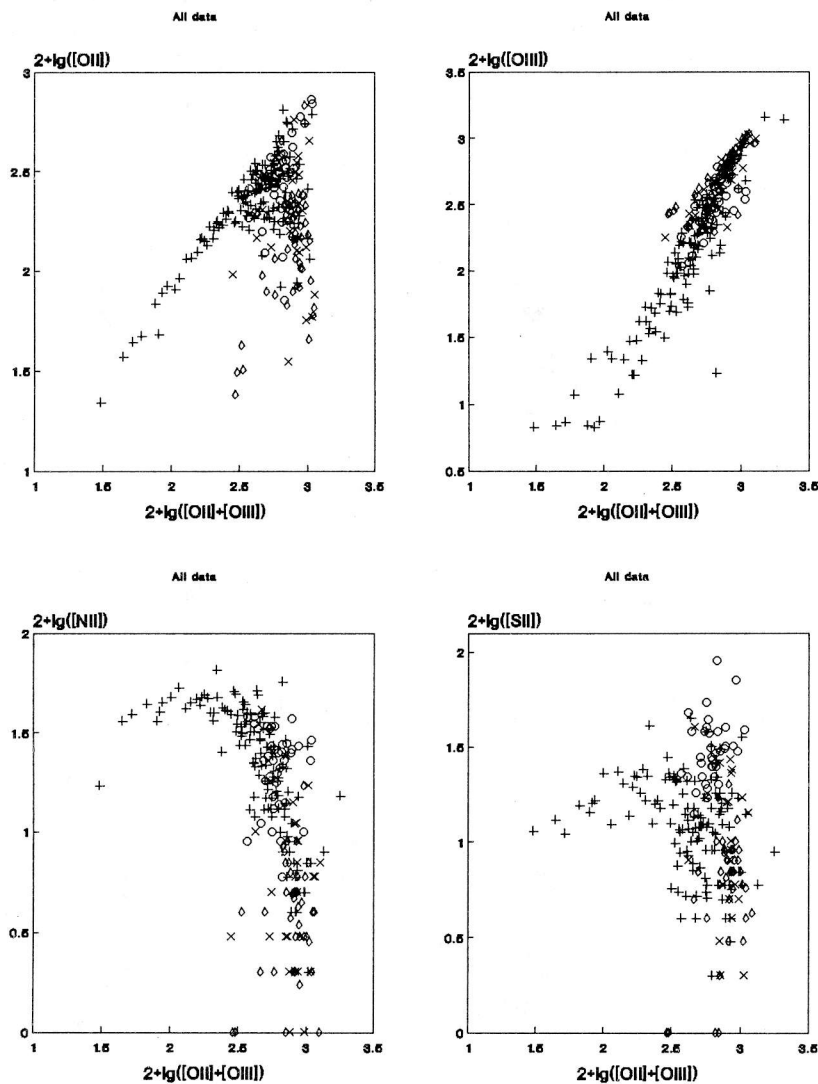


Рис. 2. Зависимости интенсивностей линий $[OII]$, $[OIII]$, $[NII]$ и $[SII]$ от индекса содержания металлов ($[OII]+[OIII]$). Обозначения - как на рис. 1.

В этом отношении интересна зависимость $[SII]$ от $[NII]$, представленная на рис. 4, где отдельно нанесены данные по объектам списка и все имеющиеся данные по этим линиям. Прямоугольниками выделены области значений интенсивностей этих ли-

ний по Фаббиано и др. (1990) для нормальных HII-областей (HII - фотоионизационный механизм возбуждения) и для остатков сверхновых и объектов Хербига-Аро (SNR - механизм возбуждения ударной волной). На рисунке видно, что часть HII Sp, Irr и CIG попадает в область, обозначенную SNR, или расположена между HII и SNR областями. В среднем HII Sp имеют меньшее, а HII CIG - большее значение [SII] для данного [NII], чем другие типы областей. Это подтверждает предположение, что в некоторых HII-областях в [SII] вносит дополнительный вклад нагрев газа ударной волной, связанной, например, со звездным ветром от массивных звезд, рождающихся в СА.

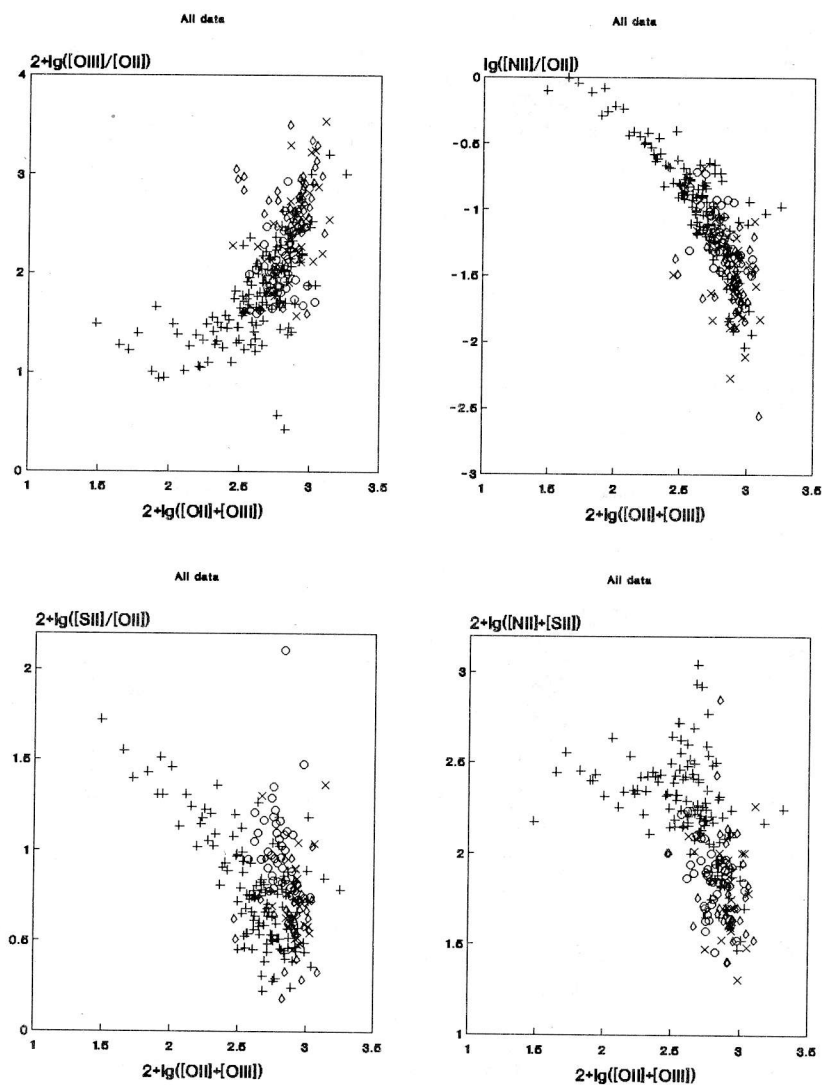


Рис. 3. Зависимости отношений интенсивностей линий [OIII]/[OII], [NII]/[OII], [SII]/[OII] и [NII]/[SII] от индекса содержания металлов ($[OII] + [OIII]$). Обозначения - как на рис. 1.

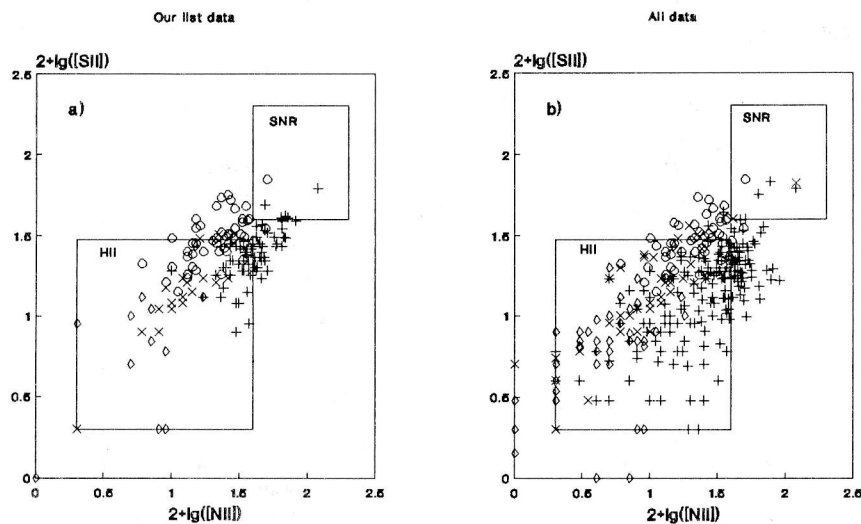


Рис.4. Зависимость интенсивностей линий [SII] от [NII]: а) - по объектам нашего списка, б) - по всем данным. Прямоугольниками показаны области расположения нормальных HII-областей (HII - фотоионизационный механизм возбуждения) и остатков сверхновых и объектов Хербига-Аро (SNR - механизм возбуждения ударной волной) по Фаббиано и др. (1990). Обозначения - как на рис. 1.

6. ЗАВИСИМОСТИ $\lg([OII]+[OIII])$ ОТ $[O/N]$ И $\lg[NII]$ ОТ $[N/H]$

Интересны две зависимости, представленные на рис.5. Первая из них - это зависимость обилия кислорода от индекса содержания металлов. Явно видно, что наблюдается сильная зависимость от типа HII-областей, которая грубо может быть представлена двумя линейными зависимостями: одна - на низких содержаниях кислорода и вторая - на высоких. Подобная диаграмма получена Эдмундсом и Пейгелом (1984), и авторы тоже отмечают неоднозначность связи индекса металличности с обилием кислорода.

Для трех типов HII-областей получены линейные регрессионные уравнения вида: $[O/N] = a \cdot \lg\{([OII] \lambda 3727 + [OIII] \lambda \lambda 4959, 5007) / H\beta\} + b$, значения коэффициентов которых приведены в таблице 1, там же указано количество точек, использованных для получения регрессионного уравнения, и коэффициент корреляции (r). По HII Irr зависимость не приводится, т.к. они попадают в область ее большой нелинейности и для них линейное приближение не имеет смысла. Для сравнения приведены данные по зависимостям для HII-областей умеренного и низкого возбуждения в спиральных галактиках (Шейвер и др., 1983), HII в гигантских Irr галактиках (GIrr) и в голубых компактных карликовых галактиках (BCDG) (Петросян, 1988).

Из данных таблицы 1 видно хорошее совпадение регрессионных уравнений, полученных в этой работе, с таковыми из литературы для близких типов HII-областей. Наибольшее отличие в регрессиях получилось для BCG и BCDG, но для подвыборки маркарянских галактик типа BCG по нашим данным наклон регрессии получился еще больше ($a=2.14$ и $b=5.98$, $r=0.88$, $N=16$). Это указывает на необходимость более глубокого исследования данной зависимости в дальнейшем для уточнения параметров регрессии.

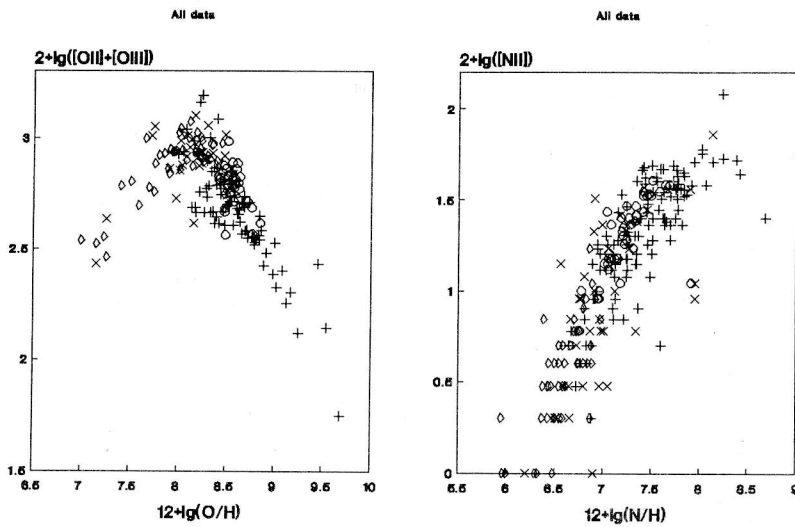


Рис. 5. Зависимости обилия кислорода [O/H] от индекса содержания металлов ([OII]+[OIII]) и обилия азота [N/H] от [NII]. Обозначения - как на рис. 1.

Таблица 1. Регрессионное уравнение $[O/H]=a \cdot \lg\{([OII]+[OIII])/H_{\beta}\}+b$

Тип	N	a	b	r	Ссылка
HII Sp	126	-1.12±0.09	+9.35±0.24	-0.75	
HII MWG		-1.10±0.21	+9.38±0.03	-0.77	а)
HII CIG	51	-0.35±0.12	+8.84±0.34	-0.38	
HII GIrr	69	-0.54±0.14	+8.95±0.12	-0.43	б)
HII BCG	61	+1.84±0.22	+6.29±0.58	0.76	
HII BCDG	94	+1.09±0.24	+7.02±0.22	0.42	б)

Примечание: а) - Шейвер и др., 1983; б) - Петросян, 1988.

Таблица 2. Регрессионное уравнение $[N/H]=a \cdot \lg([NII]\lambda_{6584}/H_{\alpha})+b$

Тип	N	a	b	r	Ссылка
HII Sp	117	0.97±0.07	8.20±0.09	0.80	
- " -		0.58±1.28	7.94±8.41		б)
HII CIG	48	0.83±0.12	7.93±0.17	0.70	
HII GIrr	64	0.62±0.10	7.72±0.12	0.62	б)
HII Irr	25	0.32±0.12	7.23±0.09	0.50	
HII BCG	45	0.63±0.08	7.57±0.05	0.76	
HII BCDG	78	0.89±0.10	8.05±0.17	0.70	б)

Примечание: б) - Петросян, 1988.

Вторая зависимость на рис.5 демонстрирует связь интенсивностей линий [NII] с обилием азота, эта зависимость почти линейная в широком диапазоне изменения обоих параметров. Параметры линейных регрессионных уравнений $[N/H]=a \cdot \lg([NII]\lambda_{6584}/H_{\alpha})+b$ для разных типов HII-областей приведены в таблице 2, там же

приведены данные Петросяна (1988).

Уравнения табл. 1 и 2 можно использовать для быстрой оценки обилий кислорода и азота, которая часто необходима в поисковых программах при отсутствии полных спектрофотометрических данных. Менее детальное деление по типам, чем в работе Петросяна (1988), вполне оправдано, по нашему мнению, близостью к линейной зависимости данных по HII-областям в BCG и SpG.

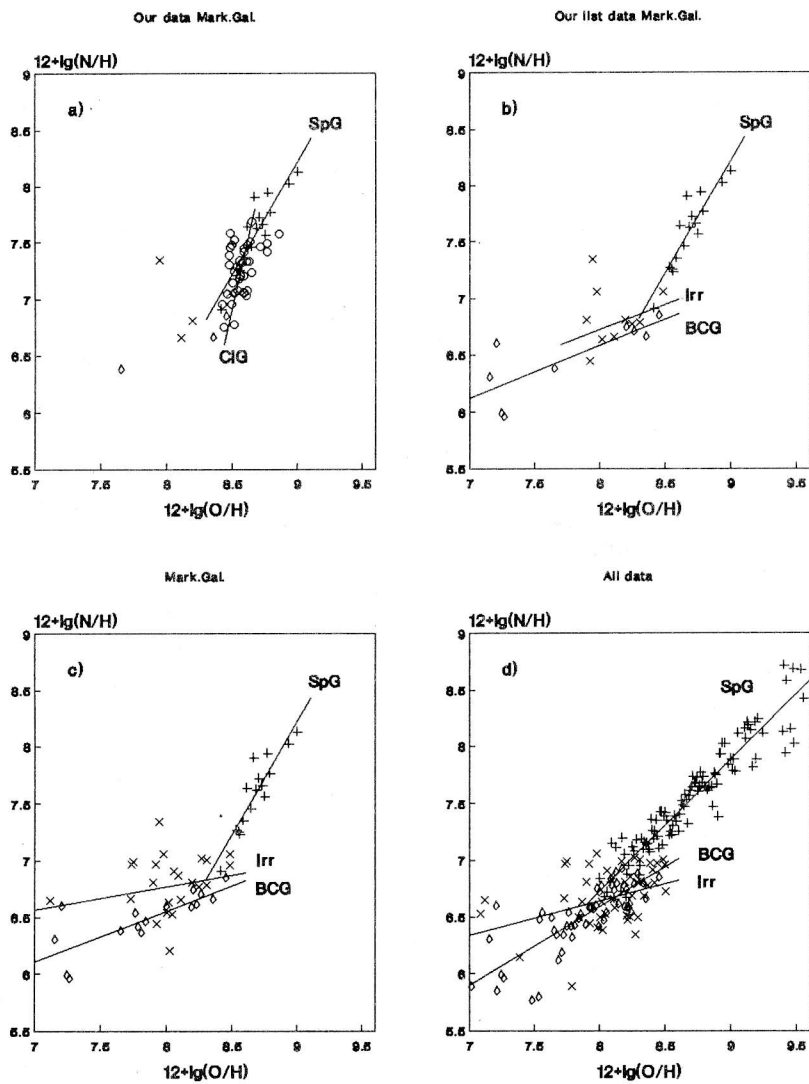


Рис. 6. Зависимость обилия азота [N/H] от обилия кислорода [O/H]: a,b,c,d) - по разным подвыборкам объектов (как указано в тексте). Обозначения - как на рис. 1.

7. ЗАВИСИМОСТИ [N/H] И $\lg(N/O)$ ОТ [O/H]

Одной из важных проблем химической эволюции галактик является вопрос о первичности или вторичности образования азота. Часть авторов получили результаты, свидетельствующие, что значительная часть азота является первичной (Эдмундс, Пейгел, 1978; Блейр и др., 1982; Гомкин, Ламберт, 1984; Кемпбелл и др., 1986). С другой стороны, Серрано и Пеймберт (1983) нашли, что данные по обилию азота для галактических и внегалактических HII-областей вполне описываются вторичным образованием азота.

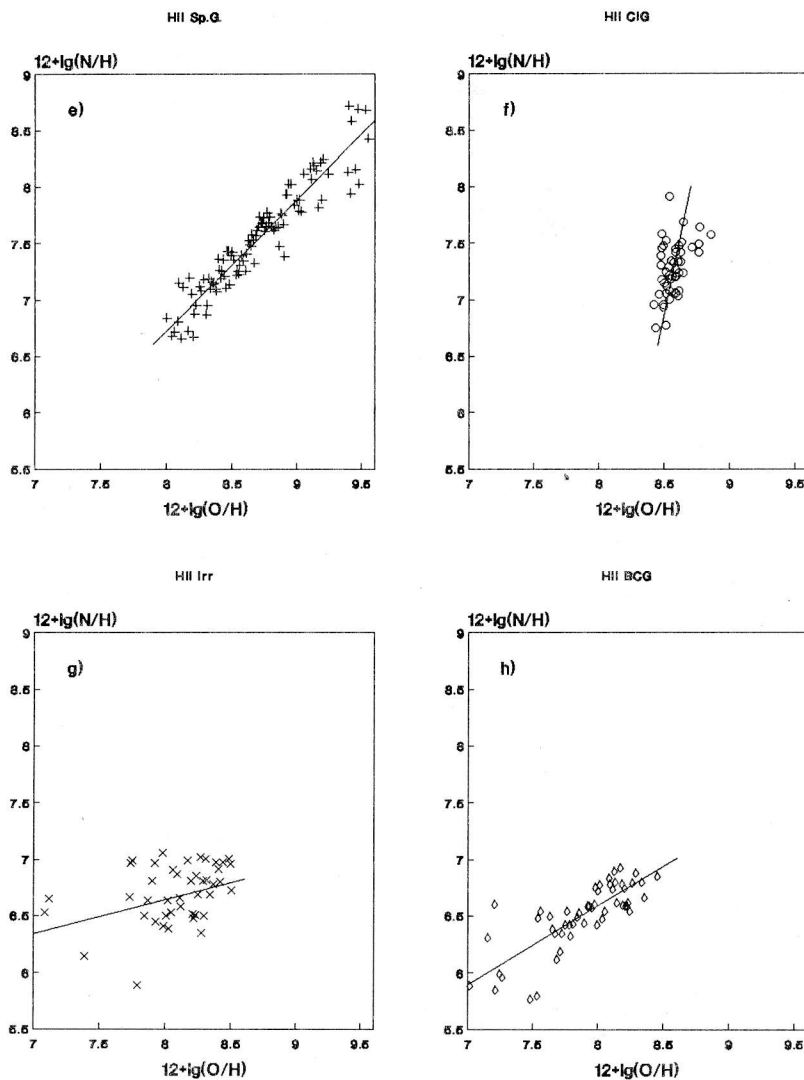


Рис. 6. Продолжение. e, f, g, h) - по всем данным, но отдельно для каждого типа HII-областей.

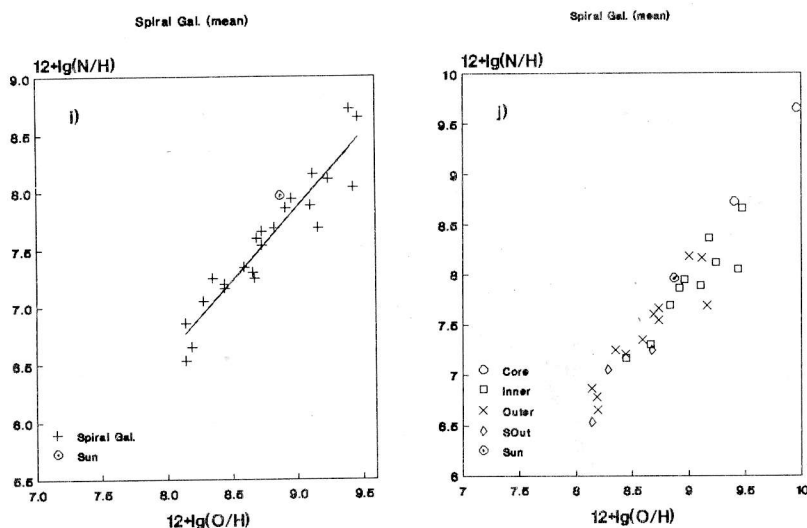


Рис. 6. Окончание. i) - средние обилия для ядерных (Core), внутренних (Inner), внешних (Outer) и супервнешних (Sout, $R/R_{25} > 1$) HII-областей в нескольких Sb - Scd спиральных галактиках, j) - то же, что и на i), но HII-области показаны разными значками и добавлены данные Смит (1975).

В отношении этой проблемы интересны зависимости, представленные на рис.6 и 7. На рис.6 приведена зависимость $[N/H]$ от $[O/H]$ для разного объема выборок объектов: а) - использованы только данные, полученные нами на БТА (HII SIG приведены только на этом рисунке); б) - добавлены данные по объектам списка из литературы; с) - использованы имеющиеся данные по галактикам Маркаряна; д) - приведены все имеющиеся данные; е, f, g, h) - как на д), но для лучшего представления отдельно по морфологическим типам, т.е. HII Sp, SIG, Irr и BCG, соответственно; i) - использованы данные по нескольким спиральным галактикам для HII-областей с известным расстоянием от центра галактики (обилия были усреднены в каждой галактике в диапазонах относительного расстояния от центра R/R_{25} : 0.1-0.5 - внутренние HII, 0.51-1.0 - внешние и >1.0 - самые внешние; j) - то же, что на i), но ядерные, внутренние, внешние и самые внешние HII показаны отдельными значками и добавлены данные Смита (1975).

На этих рисунках сплошной линией нанесена линейная регрессионная зависимость для конкретного типа HII-областей, полученная по используемым данным. Из теории регрессионного анализа (Шиголов, 1969) известно, что в случае прямой линейной функциональной зависимости обе прямые регрессии ($y=ax+b$ и $x=cy+d$) совпадают, т.е. коэффициент корреляции в этом случае равен единице, при уменьшении корреляции прямые регрессии начинают расходиться. Поэтому для ясности в табл. 3 приведены коэффициенты обеих регрессионных прямых с их ошибками, среднеквадратичные отклонения используемых точек от соответствующей регрессионной прямой, коэффициент линейной корреляции, и указано, какая из регрессионных прямых приведена на рис.6 для зависимости $[N/H]$ от $[O/H]$. Регрессионный анализ проводился отдельно для каждого морфологического типа HII-областей, по выборкам различного объема (в примечании к табл. 3 указано, как составлена выборка).

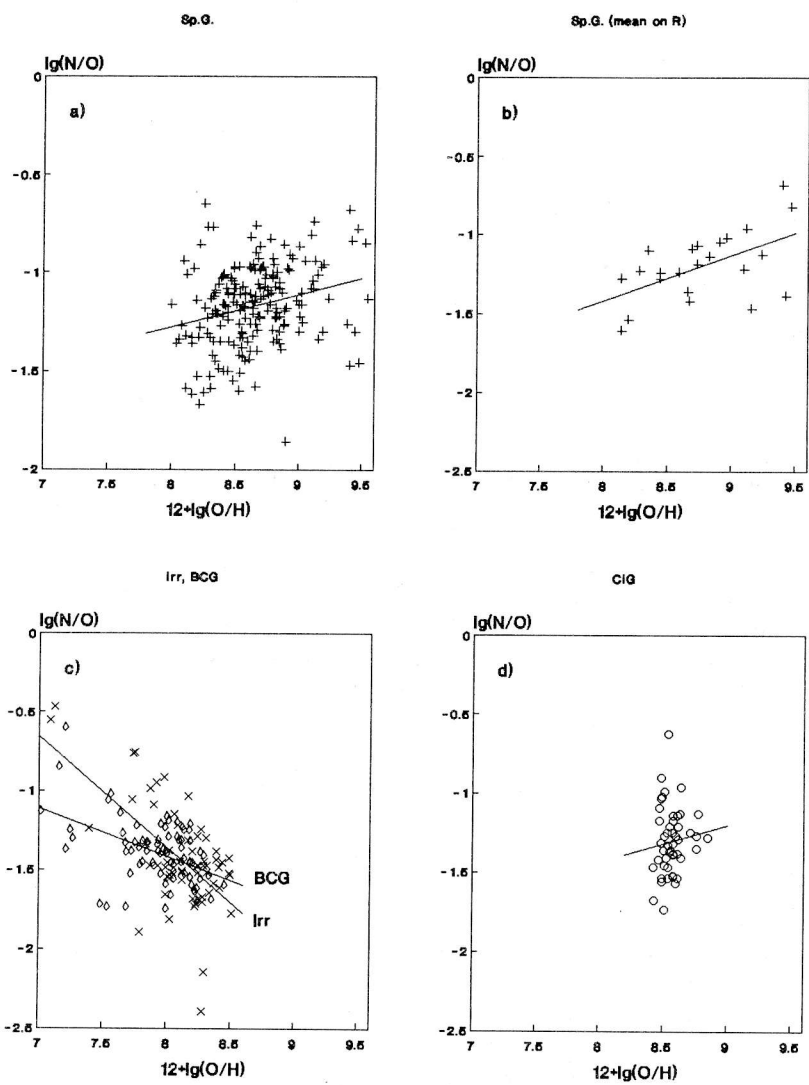


Рис. 7. Зависимость отношения обилий (N/O) от обилия кислорода [O/H]: а) - для HII Sp; б) - для внутренних, внешних и супервнешних HII Sp; в) - HII BCG и Irr, д) - HII CIG. Обозначения - как на рис. 1.

Таблица 3. Регрессионные уравнения $[N/H]=a \cdot [O/H]+b$ (I)
и $[O/H]=c \cdot [N/H]+d$ (II)

Тип	N	a	b	σ_I	c	d	σ_{II}	r	Регрессия
I Sp									
a)	16	2.00±0.25	-9.8 ±2.1	0.06	0.41±0.05	5.57±0.39	0.06	0.91	I)
d)	201	1.16±0.04	-2.59±0.38	0.13	0.67±0.03	3.62±0.19	0.12	0.88	I)
e)	23	1.28±0.10	-3.7 ±0.8	0.12	0.70±0.05	3.5 ±0.4	0.11	0.94	I)
I SIG									
a)	37	1.12±0.36	-2.4 ±3.1	0.14	0.19±0.06	7.17±0.45	0.08	0.46	II)
b)	46	1.20±0.33	-3.1 ±2.8	0.12	0.20±0.05	7.14±0.39	0.08	0.49	II)
d)	48	1.23±0.34	-3.3 ±3.0	0.13	0.18±0.05	7.28±0.36	0.08	0.47	II)
I Irr									
b)	9	0.45±0.33	3.1 ±2.7	0.17	0.46±0.34	5.0 ±2.3	0.17	0.45	I)
c)	22	0.20±0.16	5.2 ±1.3	0.22	0.35±0.29	5.6 ±1.9	0.28	0.26	I)
d)	61	0.30±0.12	4.2 ±0.9	0.25	0.34±0.13	5.9 ±0.9	0.26	0.32	I)
I BCG									
b)	9	0.46±0.14	2.9 ±1.0	0.19	1.35±0.39	-1.0 ±2.5	0.22	0.79	I)
c)	16	0.44±0.09	3.0 ±0.7	0.14	1.39±0.29	-1.2 ±1.9	0.16	0.79	I)
d)	76	0.69±0.07	1.0 ±0.5	0.15	0.85±0.08	2.4 ±0.5	0.15	0.77	I)

Примечания: N - объем выборки;

- a) - использованы только данные настоящей работы;
- b) - к выборке a) добавлены литературные данные по объектам списка;
- c) - использованы все имеющиеся данные по галактикам Маркаряна;
- d) - использованы все собранные данные по III-областям этого морфологического типа;
- e) - использованы данные для III-областей в спиральных галактиках, где обилия в отдельной галактике представлены средними значениями для внутренних, внешних и самых внешних III-областей.

Из рис.6 и данных табл.3 видно, что на зависимость $[N/H]$ от $[O/H]$ заметно влияет морфологический тип галактик. Так, III-области спиральных галактик показывают более крутой наклон зависимости, чем III Irr и BCG. По положению на оси $[O/H]$, III Irr и BCG занимают место наименее химически проэволюционировавших галактик, а III Sp - наиболее проэволюционировавших. III SIG занимают на этой зависимости (рис.6 a) и f)) промежуточное положение по стадии химической эволюции, располагаясь в очень узком диапазоне <0.5 dex по $[O/H]$, показывая при этом большой диапазон изменения $[N/H] \approx 1.5$ dex.

С точки зрения анализа первичности или вторичности образования азота наиболее показательна зависимость $\lg(N/O)$ от $[O/H]$, которая представлена на рис.7 отдельно для каждого морфологического типа. Результаты регрессионного анализа приведены в табл.4. Для спиральных галактик приведены коэффициенты регрессионных прямых и для усредненных по R/R_{25} данных, где коэффициент корреляции несколько выше, чем по всем имеющимся точкам. Наклон регрессионной прямой $\lg(N/O)=a \cdot [O/H]+b$ (I) в обоих случаях по спиральным галактикам (табл.4) существенно меньше, чем ожидаемый для чисто вторичного образования азота, при котором коэффициент "a" в этом уравнении прямой должен быть равен 1.0 (Серрано, Пеймберг, 1983). Учитывая, что регрессионная прямая $[O/H]$ на $\lg(N/O)$ (зависимость II табл.4) имеет больший наклон, можно предполагать заметную долю вторичного образования азота в спиральных галактиках. Это, в какой-то мере, подтверждается регрессионной прямой, полученной только по объектам нашего списка: $\lg(N/O)=(1.00 \pm 0.24) \cdot [O/H] - (9.8 \pm 2.1)$ с

$r=0.74$ ($N=16$). Данные по HII Irr и BCG несколько неожиданно дают даже отрицательный наклон, что мало объяснимо с точки зрения теории химической эволюции. Отрицательный наклон в этой зависимости для HII Irr и HII BCG получил и Петросян (1988), правда, с несколько меньшим коэффициентом корреляции данных.

Таблица 4. Регрессионные уравнения $\lg(N/O)=a \cdot [O/H]+b$ (I) и $[O/H]=c \cdot \lg(N/O)+d$ (II)

Тип	N	a	b	σ_I	c	d	σ_{II}	r	Регрессия
HII Sp	201	0.16 ± 0.04	-2.59 ± 0.38	0.19	0.41 ± 0.11	9.12 ± 0.13	0.29	0.26	I)
е)	23	0.28 ± 0.09	-3.7 ± 0.8	0.18	1.02 ± 0.35	9.99 ± 0.42	0.25	0.54	I)
HII CIG	48	0.23 ± 0.34	-3.3 ± 2.9	0.21	0.04 ± 0.06	8.62 ± 0.08	0.09	0.10	I)
HII Irr	61	-0.70 ± 0.12	4.2 ± 0.9	0.22	-0.54 ± 0.09	7.33 ± 0.13	0.20	-0.62	I)
HII BCG	76	-0.31 ± 0.07	1.0 ± 0.5	0.17	-0.71 ± 0.16	6.94 ± 0.22	0.22	-0.47	I)

Примечание: е) - как в табл. 3.

По результатам исследования 32 голубых компактных галактик Кемпбелл и др. (1986) на основании отсутствия сильной корреляции N/O и $[O/H]$ пришли к выводу о первичности образования азота в этом типе галактик. Они получили среднее значение $\lg(N/O)=-1.44$ для BCG, что близко к значениям -1.43 и -1.39 , полученным в этой работе, для HII Irr и HII BCG, соответственно. Для HII Sp мы получили $\lg(N/O)=-1.17$, что попадает в диапазон значений для HII-областей в спиральных галактиках различных морфологических типов, от -1.08 до -1.34 для типов Sa/bc и Sc/m, соответственно (Петросян, 1988). HII CIG по нашим данным ($\lg(N/O)=-1.31$) занимают промежуточное положение между HII Sp и HII Irr и BCG, показывая изменение отношения N/O иногда больше, чем в 6 раз, по отдельно взятой галактике.

Отличие поведения зависимостей $[N/H]$ и $\lg(N/O)$ от $[O/H]$ для иррегулярных и спиральных галактик, по-видимому, связано с различиями в механизмах звездообразования, которые доминируют в них. В Irr (включая и BCG) галактиках доминирует вспышечная активность звездообразования и самые молодые из них, возможно, успели пережить только единственную вспышку звездообразования (например, Марк 116). Если вспышка произошла недавно ($t \leq 10^7$ лет), а это часто подтверждается наличием в спектрах BCG эмиссионных линий, обусловленных вкладом WR-звезд (Кемпбелл и др., 1986), то массивные звезды уже успели обогатить межзвездное вещество кислородом. Звезды промежуточных масс, с которыми в основном связывают обогащение среды азотом (Серрано, Пеймберт, 1983), еще не успели проэволюционировать, что приводит к очень низким значениям отношения N/O в молодых галактиках. В этом случае HII-область обогащена только первичным азотом из массивных звезд ($M > 8M_{\odot}$) (Маттеучи, 1986).

В спиральных же галактиках, по-видимому, доминирует непрерывное звездообразование, которое связано с прохождением волны плотности по диску галактики. За время, прожитое спиральной галактикой до настоящего момента ($t \approx 10^{10}$ лет), непрерывно образующиеся звезды уже успели обогатить межзвездную среду и кислородом и азотом, что и подтверждается более высоким значением отношения N/O . В этом случае HII-области обогащены, по-видимому, как первичным ($M > 8M_{\odot}$), так и вторичным

азотом из звезд промежуточных и малых масс ($M \leq 8M_{\odot}$) (Маттеучи, 1986). Поэтому наклон зависимости $\lg(N/O)$ от $[O/H]$ меньше предсказываемого теорией для чистого вторичного образования азота.

НII СIG, как отмечалось выше, занимают резко выделенное по $[O/H]$ положение на этих зависимостях (рис.6 а) и f) и рис.7.). По среднему значению $[O/H] = 8.57$ они попадают в область НII Sp, но занимают, в отличие от последних, очень узкий диапазон < 0.5 dex. Отличительной особенностью СIG является то, что в большинстве - это тесно взаимодействующие системы (Касини, Айдманн, 1976; Буренков, 1988). Для некоторых из них есть свидетельства, что во взаимодействии участвуют спиральные галактики поздних типов (Боттинелли и др., 1975; Аллоин, Дюфло, 1979). Принимая это во внимание, можно качественно объяснить поведение СIG на обсуждаемых диаграммах тем, что к механизму непрерывного звездообразования (как в НII Sp) добавляется сильная вспышечная активность звездообразования (Бузгард и др., 1982). Вспышка звездообразования в СIG вызвана приливным воздействием компонентов системы и состоит из набора локальных вспышек в объеме галактики, возникающих в несколько различающиеся моменты времени (возможно, это связано со временем максимального приливного воздействия на локальное газовое облако). Если допустить, что вспышка звездообразования произошла около 10^8 лет назад, то массивные звезды уже успели проэволюционировать и обогатить межзвездную среду кислородом (отсюда приблизительно одинаковое $[O/H]$ по всей галактике), а звезды промежуточных масс только начинают обогащать среду азотом (отсюда большое различие обилия азота по объему галактики, т.к. часть локальных вспышек старше по времени и N/O выше, чем в более молодых конденсациях). Остается неясным, почему все СIG лежат в одном узком диапазоне $[O/H]$? Возможно, это связано с эффектами селекции, т.е. более старые СIG становятся мало отличимыми от обычных пекулярных галактик. Кандидатом в более молодые, возможно, является Марк 277 (Андреасян и др., 1987). SA в Марк 277 показывают некоторое отличие от НII СIG. По $\langle [O/H] \rangle = 8.44 \pm 0.06$ они несколько "моложе" (на ≈ 0.15 dex), а линии [NII] в их спектрах не видны. Это можно объяснить тем, что в случае Марк 277 мы наблюдаем СIG еще на стадии, когда возраст вспышки звездообразования $< 10^7$ лет, и азота в галактике поэтому очень мало.

Такое выделенное положение НII СIG:

- повышенная интенсивность линий [SII] (рис.1, 2, 3, 4),
- узкий диапазон изменения $[O/H]$ и очень широкий по $[N/H]$ и $\lg(N/O)$ (рис.6,7),
- наличие тесного взаимодействия в системе,
- крайне высокая активность звездообразования во всем объеме галактики - позволяет говорить об особом статусе СIG в плане активности звездообразования и химической эволюции по отношению к спиральным и иррегулярным галактикам. Для полного понимания и количественного рассмотрения проблем, связанных с СIG, необходимо спектрофотометрическое исследование тесновзаимодействующих систем по более глубокой выборке объектов.

8. ВЫВОДЫ

Построенные зависимости интенсивностей линий и их отношений от индексов возбуждения и металличности для НII-областей в галактиках различных морфологических типов показывают, что НII Sp имеют значения рассматриваемых параметров в

широком диапазоне возбуждения и металличности. Параметры HII BCG и Irr хорошо согласуются с зависимостью для HII Sp, но в более узком диапазоне значений индексов, т.к. среди них нет HII-областей низкого возбуждения и богатых металлами. HII ClG выделяются на зависимостях компактностью расположения по индексам возбуждения и металличности и большей интенсивностью линий [SII]. Это, возможно, связано с некоторым вкладом в нагрев газа ударных волн, что подтверждается попаданием некоторых исследуемых SA в область расположения объектов SNR на диаграмме [SII] от [NII].

Линейный регрессионный анализ зависимостей $\lg([\text{OII}]+[\text{OIII}])$ от $[\text{O}/\text{H}]$ и $\lg[\text{NII}]$ от $[\text{N}/\text{H}]$ показал, что регрессионные прямые сильно зависят от морфологического типа галактик.

Полученные уравнения можно использовать для оценок обилий кислорода и азота, используя данные об $([\text{OII}]+[\text{OIII}])$, [NII] и учитывая морфологический тип галактики.

Регрессионный анализ зависимостей $[\text{N}/\text{H}]$ от $[\text{O}/\text{H}]$ для выборок разной глубины показывает наличие связи с морфологическим типом, что, по-видимому, обусловлено разными механизмами звездообразования. Делается вывод, что в HII Irr и BCG доминирует вспышечное звездообразование, а в HII Sp - непрерывное. Возраст вспышек звездообразования в большинстве HII Irr и BCG, по-видимому, еще слишком мал ($\leq 10^7$ лет) для того, чтобы успели проэволюционировать звезды промежуточных масс, ответственные за обогащение газа вторичным азотом, поэтому у них наблюдается более низкое значение отношения N/O , чем у HII Sp.

Из анализа зависимости $\lg(\text{N}/\text{O})$ от $[\text{O}/\text{H}]$ делается вывод, что азот в HII Irr и BCG в основном первичного образования массивными звездами ($M > 8M_{\odot}$) (Маттеучи, 1986), а в обогащении HII Sp участвует как первичный, так и вторичный азот. При этом указывается, что зависимость $\lg(\text{N}/\text{O})$ от $[\text{N}/\text{H}]$ для выборки из 16 HII Sp в галактиках списка имеет наклон точно равный 1, что не противоречит предположению о чисто вторичном образовании азота в них.

Делается вывод об особом статусе клочковатых иррегулярных галактик (ClG) в плане активности звездообразования и химической эволюции, который связан: а) - с мощными вспышками звездообразования во всем объеме тесновзаимодействующих галактик, вызванными приливным воздействием; б) - возрастом вспышки около 10^8 лет; в) - некоторой разновременностью начала вспышек в разных SA каждой галактики.

Необходимо отметить, что в большинстве представленных зависимостей HII Irr и BCG занимают близкое положение, что отражает их генетическую связь по хаббловскому морфологическому типу, по процессам звездообразования и стадии химической эволюции. Некоторые отличия между ними (более высокое возбуждение, больший дефицит металлов в HII BCG) скорее всего объясняются несколько меньшим возрастом вспышки звездообразования в SA BCG, т.е. наличием большего количества молодых звезд, чем у HII Irr.

ЛИТЕРАТУРА

- Аксон и др. (Axon D.J., Staveley-Smith L., Fosbury R.A.E., Danziger J., Boksenberg A., Davies R.D.): 1988, Mon. Not. R. Astron. Soc., 231, 1077.
Аллоин и др. (Alloin D., Bergeron J., Pelat D.): 1978, Astron. and Astrophys., 70, 141.

- Аллоин и Дюфло (Alloin D., Duflot R.): 1979, *Astron. and Astrophys.*, **78**, L5.
- Андреасян Н.К., Буренков А.Н., Хачикян Э.Е.: 1986, *Астрофизика*, **25**, 507.
- Андреасян Н.К., Буренков А.Н., Хачикян Э.Е.: 1987, *Астрофизика*, **27**, 103.
- Бенвенути и др. (Benvenuti P., D'Odoriko S., Peimbert M.): 1973, *Astron. and Astrophys.*, **28**, 447.
- Блейр и др. (Blair W. P., Kirshner R. P., Chevalier R. A.): 1982, *Astrophys. J.*, **254**, 50.
- Боттинелли и др. (Bottinelli L., Duflot R., Gouguenheim L., Heidmann J.): 1975, *Astron. and Astrophys.*, **41**, 61.
- Бузгард и др. (Boesgaard A.M., Edwards S., Heidmann J.): 1982, *Astrophys. J.*, **252**, 487.
- Буренков А.Н.: 1988, *Астрофизика*, **28**, 47.
- Буренков А.Н., Петросян А.Р., Хачикян Э.Е.: 1983, *Астрофизика*, **19**, 393.
- Буренков А.Н., Петросян А.Р., Саакян К. А., Хачикян Э. Е.: 1984, *Астрофизика*, **21**, 433.
- Буренков А.Н., Хачикян Э.Е.: 1986, *Астрофизика*, **24**, 349.
- Буренков А.Н., Петросян А.Р., Хачикян Э.Е.: 1987а, *Астрофизика*, **26**, 399.
- Буренков А.Н., Петросян А.Р., Саакян К. А., Хачикян Э. Е.: 1987б, *Астрофизика*, **27**, 409.
- Буренков А.Н., Петросян А.Р., Саркисян А. Б., Хачикян Э. Е.: 1988а, *Астрофизика*, **29**, 223.
- Буренков А.Н., Петросян А.Р., Саакян К. А., Хачикян Э. Е.: 1988б, *Астрофизика*, **29**, 541.
- Буренков А.Н., Назаров Е. А., Хачикян Э. Е.: 1990, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, **32**, 16.
- Буренков А.Н., Хачикян Э.Е.: 1990, *Астрофизика*, **32**, 245.
- Буренков А.Н., Петросян А.Р., Саакян К.А.: 1991, *Астрофизика* (в печати).
- Вигро и др. (Vigroux L., Stasinska G., Comte G.): 1987, *Astron. and Astrophys.*, **172**, 15.
- Вилчез и др. (Vilchez J. M., Pagel B.E.J., Diaz A. I., Terlevich E., Edmunds M.G.): 1988, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **235**, 633.
- Гонзалез-Риестра и др. (Gonzalez-Riestra R., Rego M., Zamorano J.): 1988, *Astron. and Astrophys.*, **202**, 27.
- Диаз и др. (Diaz A. I., Terlevich E., Pagel B.E.J., Vilchez J. M., Edmunds M.G.): 1987, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **226**, 19.
- Диаз и Този (Diaz A.I., Tosi M.): 1986, *Astron. and Astrophys.*, **158**, 60.
- Динерштейн и Шилдс (Dinerstein H. L., Shields G. A.): 1986, *Astrophys. J.*, **311**, 45.
- Дюфло-Огард и Аллоин (Duflot-Augarde R., Alloin D.): 1982, *Astron. and Astrophys.*, **112**, 257.
- Дюфо и др. (Dufour R.J., Talbot R. J., Shields G. A.): 1980, *Astrophys. J.*, **236**, 119.
- Дюфо и др. (Dufour R.J., Shields G. A., Talbot R. J.): 1982, *Astrophys. J.*, **252**, 461.
- Дюфо и др. (Dufour R. J., Garnet D. R., Shields G. A.): 1988, *Astrophys. J.*, **332**, 752.
- Заморано и Рего (Zamorano J., Rego M.): 1986, *Astron. and Astrophys.*, **170**, 31.

- Изотов Ю. И., Липовецкий В. А., Гусева Н. Г., Степанян Д. А.: 1990, Письма в
астрон. ж., 16, № 7, 605.
- Йохансон (Johansson L.): 1988, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*, 73, 335.
- Канс и Сарджент (Kunth D., Sargent W.L.W.): 1983, *Astrophys. J.*, 273, 81.
- Касини и Айдман (Casini C., Heidmann J.): 1976, *Astron. and Astrophys.*, 47,
371.
- Квиттер и Аллер (Kwitter K. B., Aller L. H.): 1981, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*,
195, 939.
- Кенникат и др. (Kennicutt R., Balick B., Heckman T.): 1980, *Publ. Astron.
Soc. Pacif.*, 92, 134.
- Комте (Comte G.): 1975, *Astron. and Astrophys.*, 39, 197.
- Кэмпбелл и др. (Campbell A., Terlevich R., Melnick J.): 1986, *Mon. Not. R.
Astron. Soc.*, 223, 811.
- МакКолл (McCall M.L.): 1982, *The university of Texas publ. in Astron.*, 20, 1.
- МакКолл и др. (McCall M.L., Rybski P. M., Shields G. A.): 1985, *Astrophys. J.
Suppl. Ser.*, 57, 1.
- Маттеучи (Matteucci F.): 1986, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 221, 911.
- Маттеучи и Този (Matteucci F., Tosi M.): 1985, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*,
217, 391.
- Месис и др. (Mathis J.S., Chu Y.-H., Peterson D.E.): 1985, *Astrophys. J.*, 292,
155.
- Пейгел и др. (Pagel B.E.J., Edmunds M.G., Blackwell D.E., Chun M.S., Smith G.):
1979, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 189, 95.
- Пейгел и др. (Pagel B.E.J., Edmunds M.G., Smith G.): 1980, *Mon. Not. R. Astron.
Soc.*, 193, 219.
- Пеймберт и др. (Peimbert M., Pena M., Torres-Peimbert S.): 1986, *Astron. and
Astrophys.*, 158, 266.
- Пеймберт и Торрес-Пеймберт (Peimbert M., Torres-Peimbert S.): 1977, *Mon.
Not. R. Astron. Soc.*, 179, 217.
- Петросян А.Р.: 1988, *Сообщ. Бюракан. обс.*, 61, 15.
- Петросян А.Р., Саакян К.А., Хачикян Э.Е.: 1983, *Астрофизика*, 19, 619.
- Петросян А.Р., Саакян К.А., Хачикян Э.Е.: 1984, *Астрофизика*, 20, 51.
- Саакян К.А., Хачикян Э.Е.: 1975, *Астрофизика*, 11, 207.
- Серрано и Пеймберт (Serrano A., Peimbert M.): 1983, *Rev. Mex. Astron.
Astrof.*, 8, 117.
- Смит (Smith H.E.): 1975, *Astrophys. J.*, 199, 591.
- Талент (Talent D.L.): 1982, *Astrophys. J.*, 252, 594.
- Талент и Дюфо (Talent D.L., Dufor R.J.): 1979, *Astrophys. J.*, 233, 888.
- Танигучи (Taniguchi Y.): 1986, *Publ. Astron. Soc. Jap.*, 38, 571.
- Танигучи и Тамура (Taniguchi Y., Tamura S.): 1981, *Publ. Astron. Soc. Jap.*, 33,
653.
- Томкин и Ламберт (Tomkin J., Lambert D.L.): 1984, *Astrophys. J.*, 279, 220.
- Фаббиано и др. (Fabbiano G., Heckman T., Keel W.C.): 1990, *Astrophys. J.*, 355,
442.
- Френч (French H.B.): 1980, *Astrophys. J.*, 240, 41.
- Хантер и др. (Hunter D. A., Gallagher J. S., Rautenkranz D.): 1982, *Astrophys. J.
Suppl. Ser.*, 49, 53.
- Шахбазян Р.К.: 1970, *Астрофизика*, 6, 367.

Шейвер и др. (Shaver P. A., McGee R. X., Newton L.M., Danks A.C., Pottash S.R.):
1983, Mon. Not. R. Astron. Soc., 204, 53.

Шиголев Б.М.: 1969, Математическая обработка наблюдений. М.: Наука.

Эдмундс и Пейгел (Edmunds M.G., Pagel В.Е.Ж.): 1978, Mon. Not. R. Astron. Soc.,
185, 77.

Эдмундс и Пейгел (Edmunds M.G., Pagel В.Е.Ж.): 1984, Mon. Not. R. Astron. Soc.,
211, 507.

Поступила в редакцию
6 февраля 1991 г.