

УДК @@@

ЭВОЛЮЦИЯ СОДЕРЖАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ В ПЛАНЕТАРНЫХ ТУМАННОСТЯХ

© 2006 г. Ю. В. Миланова^{1*}, А. Ф. Холтыгин²

¹Санкт-Петербургский государственный университет

²Астрономический институт Санкт-Петербургского государственного университета

Поступила в редакцию 06.09.2005 г.

Исследованы эволюционные изменения содержаний химических элементов в ансамбле планетарных туманностей Галактики в зависимости от масс центральных звезд (M_{CS}) туманностей и масс их звезд-предшественников (M_{ini}). Получены зависимости содержаний C, N, Ne, Cl, Ar и S от M_{CS} и M_{ini} для большой выборки туманностей. Определены теоретические содержания элементов в туманностях в предположении полного перемешивания вещества звезды-предшественника, выброшенное на разных стадиях ее эволюции. Обнаружено, что теоретические зависимости содержания C и N соответствуют наблюдаемым. В то же время наблюдаемое среднее содержание O примерно в два раза меньше теоретического значения. Содержания Ne, Cl, Ar и S монотонно возрастают с ростом массы звезды-предшественника, что отражает увеличение средних содержаний тяжелых элементов в ходе химической эволюции Галактики. Получено соотношение, связывающее содержания рассматриваемых элементов в планетарных туманностях с массами их центральных звезд. Данное соотношение использовано для построения функции масс ядер планетарных туманностей.

Ключевые слова: Галактика — химическая эволюция, планетарные туманности — массы центральных звезд, содержания элементов.

ВВЕДЕНИЕ

Понимание эволюции нашей Галактики является ключом к исследованию эволюции других звездных систем. Для исследования эволюции во всем объеме Галактики целесообразно выбрать планетарные туманности (ПТ). Туманности, как весьма яркие объекты, видны на значительных расстояниях от Солнца, поэтому известные к настоящему времени галактические ПТ занимают достаточно

большую долю объема Галактики (Перек, Когоутек, 1967).

Образование ПТ является одной из стадий эволюции большинства звезд Галактики, так как предшественниками туманностей являются звезды промежуточных масс с массами на главной последовательности в интервале от $M \leq 1M_{\odot}$ до $M \simeq 8M_{\odot}$. У ПТ наблюдаются значительные различия не только в содержаниях химических элементов, но и в их пространственном распределении, кинематических свойствах, а также, что особенно интересно для наблюдательного исследования эво-

* Электронный адрес: Yulia.Milanova@pobox.spbu.ru

люции звезд Галактики, в массах их центральных звезд и звезд-предшественников туманностей.

В силу удобства использования ПТ, как объекта для изучения химической и динамической эволюции Галактики, таким исследованиям посвящено большое количество работ. Однако, в большинстве случаев такие исследования ограничиваются сравнением содержаний различных элементов для различных выборок ПТ (см., например, Перинотто и др., 2004; Гроеневеген, Мариго, 2003; Маттеучи, 2003, и ссылки в указанных работах).

В то же время с точки зрения проверки теории химической эволюции Галактики вообще и эволюции звезд промежуточных масс, в частности, наибольший интерес представляет исследование зависимости содержаний элементов в туманностях от массы их центральных звезд или звезд-предшественников туманностей. Такого рода исследования существенно сложнее в силу плохо известных масс звезд-предшественников для конкретных туманностей. Можно отметить только работу Стасинской и др. (1997), в которой исследована зависимость содержаний СНО-элементов от масс центральных звезд ПТ.

Тем не менее, в силу того, что массы ядер оценены для большого количества ПТ, а между массой ядра туманности и массой ее звезды-предшественника существует хорошо известная и четко выраженная зависимость (например, Биней, Меририлд (1998), Маттеучи, 2003), исследование зависимости вариаций содержаний элементов в туманности с массой ее звезды-предшественника вполне реально. Такому исследованию и посвящена настоящая работа.

Анализируемый ансамбль ПТ описан во втором параграфе работы. Приведены источники сведений о массах ядер и химическом составе туманностей. Рассмотрена зависимость содержаний элементов от масс их центральных звезд, находятся и анализируются зависимости содержаний С, N, O, Ne, Ar, Cl и S от масс звезд-предшественников туманностей. Далее описано построение функции масс ансамбля планетарных туманностей Галактики. Некоторые выводы из проведенного исследования представлены в заключении настоящей работы.

СИСТЕМА ГАЛАКТИЧЕСКИХ ПЛАНЕТАРНЫХ ТУМАННОСТЕЙ

Результаты настоящей работы основаны на анализе свойств выборки галактических планетарных туманностей с известным химическим составом. Список, содержащий параметры более чем 300 туманностей с полученными из различных источников содержаниями He, C, N, O, Ne, Ar, Cl и S и массами их центральных звезд, находится на сайте

Астрономического института СПбГУ (Миланова, Холтыгин, 2005).

Данные о содержаниях элементов в туманностях были взяты из работ, ссылки на которые можно найти на указанном сайте. Кроме того, были использованы данные работ Коста и др. (1996), Масиел, Коппен (1994), Масиел, Куиреза (1999), Перинотто и др. (2004), Станжеллини и др. (1994, 1995), Эскудеро и др. (2004).

При наличии различных определений содержания для какой-либо конкретной туманности использовались данные, полученные из анализа наблюдений, полученных с использованием ПЗС-приемников. Только в случае отсутствия таковых наблюдений использовались результаты анализа фотоэлектрических наблюдений. Для ряда туманностей: NGC 3242, NGC 6720, NGC 7009, NGC 7662 и NGC 7027 имеется большое число определений содержаний рассматриваемых элементов, сделанных разными авторами. Для этих туманностей использовались среднее по различным определениям содержания элементов в том случае, если разность в определении содержания находится в пределах 0.1–0.2 dex. Остальные определения отбрасывались.

Существенное уточнение содержаний элементов может быть получено при учете флуктуаций электронной температуры в туманности и существенно различающейся точности определения потоков в слабых и сильных по сравнению с линией $N\beta$ линиях (Холтыгин, 1998а,б, 2000). По этой причине для содержаний С и О использовались данные указанных работ.

Массы центральных звезд туманностей, взятые из разных источников, могут сильно различаться. Для устранения ошибки за неоднородность выборки масс центральных звезд туманностей использовался объединенный список масс из работ Малькова (1997) и Горного и др. (1997), так как массы центральных звезд для туманностей, присутствующих в обоих списках, близки. В табл. 1 приведены значения коэффициентов корреляции между двумя шкалами масс центральных звезд ПТ.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции для масс ядер ПТ

Шкала	LL	LG	GL	GG
Коэффициент корреляции (Горный и др. (1997)/Мальков (1997))	0.80	0.79	0.79	0.79

Примечание. L — массы взяты в линейной шкале, G — в логарифмической. Значения масс центральных звезд туманностей, представленных в обоих списках, взяты из работы Малькова (1997).

Таблица 2. Средние по типам туманностей согласно классификации Пеймберта (1978) расстояния $\langle |z| \rangle$ ПТ до галактической плоскости и средние массы $\overline{M_{cs}}$ центральных звезд туманностей

Тип	Данные Масиел, Дутра (1992)			Настоящая работа				
	n	$\langle z \rangle$, пк	σ_z , пк	n	$\langle z \rangle$, пк	σ_z , пк	$\overline{M_{cs}}$	σ_M
I	53	0.15	0.13	42	0.27	0.33	0.71	0.16
IIa	32	0.28	0.21	37	0.43	0.32	0.62	0.03
IIb	28	0.42	0.36	24	0.68	0.56	0.60	0.02
III	33	0.66	0.64	23	1.04	0.60	0.61	0.03

Примечание. n — число звезд данного типа, σ_z и σ_M — стандартные отклонения $\langle |z| \rangle$ и $\overline{M_{cs}}$ соответственно.

Из анализа списка Милановой, Холтыгина (2005) нами получены средние расстояния от галактической плоскости, средние значения масс центральных звезд, а также стандартные отклонения этих величин в зависимости от их класса по Пеймберту (1978). Результаты приведены в табл. 2. Из анализа таблицы видно, что с удалением от плоскости Галактики массы ядер туманностей уменьшаются, что соответствует переходу от молодых звезд-предшественников туманностей к более старым объектам.

Для сравнения в табл. 2 приведены средние значения высот над галактической плоскостью, полученные в работе Масиел, Дутра (1992). Сравнение наших результатов с расчетами указанных авторов показывает, что в пределах одного стандартного отклонения σ средние расстояния планетарных туманностей различных типов до галактической плоскости, полученные в настоящей работе, соответствуют данным Масиел, Дутра (1992).

ЗАВИСИМОСТЬ СОДЕРЖАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ В ТУМАННОСТЯХ ОТ МАССЫ ИХ ЦЕНТРАЛЬНЫХ ЗВЕЗД

На протяжении эволюции звезды промежуточной массы ее внешние слои обогащаются химическими элементами (Ибен, Рензини, 1983). При образовании планетарной туманности вещество внешних слоев звезды становится веществом туманности. При этом содержания элементов в туманности соответствует химическому составу звезды в момент сброса оболочек звезды на стадии пост-асимптотической ветви гигантов (стадии пост-АВГ).

Содержания элементов в звезде на стадии пост-АВГ определяются, главным образом, ее массой и начальным химическим составом, поэтому химический состав туманности несет информацию как о химическом составе межзвездной среды в момент образования туманности, так и о скорости ядерных реакций в недрах звезды. Средний

химический состав межзвездной среды зависит, в основном, от полного времени эволюции звезды, которое, в свою очередь, определяется массой звезды-предшественника туманности M_{ini} .

Тем самым можно сделать вывод, что содержания элементов в планетарных туманностях зависят, в основном, от M_{ini} или от массы центральной звезды туманности M_{cs} ввиду существования зависимости начальная — конечная масса звезды (см. ниже). Предварительный анализ показал, что зависимость содержаний элементов $N(X) = N(X, M_{ini})$ в ряде случаев нельзя представить какой-либо гладкой кривой ввиду как стохастического характера этой зависимости, так и значительных ошибок определений масс ядер туманностей и химического состава самих туманностей.

На основании анализа полученных нами зависимостей $N(X, M_{ini})$ или $N(X, M_{cs})$ можно высказать предположение о возможности ее аппроксимации кусочно-линейной непрерывной функцией. При построении искомой аппроксимации интервал масс звезд-предшественников (масс центральных звезд туманностей) разбивается на несколько интервалов (обычно 1–2) таким образом, чтобы в каждый интервал попадало не меньше 10 точек. На каждом из интервалов зависимости содержаний элементов от массы центральной звезды туманности представлялись линейной:

$$N = N(M_{cs}) = N(X, M_{cs}) = a + b \times M_{cs}, \quad (1)$$

где a и b — численные константы, определяемые методом наименьших квадратов из условия минимума квадратов невязок $\sum_{i=0}^n (N_i^* - N(X, M_{cs}^i))^2$, где суммирование ведется по всем имеющимся определениям содержания данного элемент N_i^* для туманности с номером i .

Для иллюстрации на рис. 1 представлена полученная нами кусочно-линейная аппроксимация зависимости содержаний углерода и азота от массы центральной звезды. Для представления зависимости $N(M_{cs})$ весь интервал масс ядер ПТ

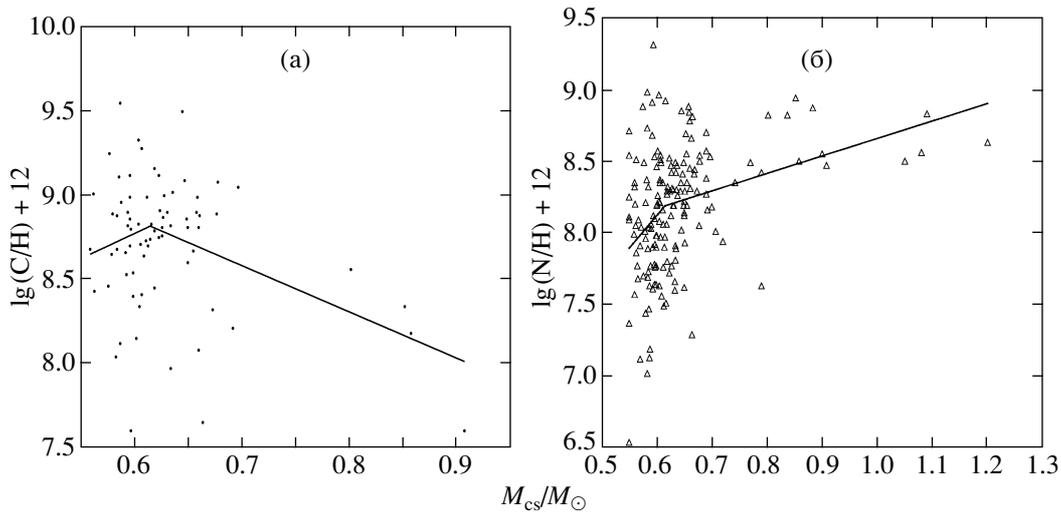


Рис. 1. Аппроксимация зависимости содержаний углерода и азота от массы центральной звезды по формуле (1) — сплошные линии. Точки и треугольники — содержания С (а) и N (б) соответственно для индивидуальных туманностей.

был разбит на два промежутка с граничным значением $0.62M_{\odot}$. Большой градиент содержания $dN(X)/dM_{cs}$ в области масс центральных звезд туманностей $M_{cs} < 0.62M_{\odot}$ отражает резкий рост скорости образования звезд малых масс на начальных этапах эволюции Галактики в согласии с предсказаниями большинства моделей химической эволюции Галактики (см., например, Маттеучи, 2003). Для кислорода не удалось получить статистически значимой зависимости содержания от массы ядра туманности ни при каком разбиении полного интервала масс ядер.

Зависимость $N(M_{cs})$ для более тяжелых, чем С, N и O элементов, содержания которых слабо меняются в ходе эволюции звезды-предшественника туманности, существенно проще и может быть аппроксимировано одной зависимостью 1 для всего интервала масс ядер ПТ, как показано на рис. 2. В табл. 3 приведены полученные нами значения параметров a и b для С, N, Ne, Ar и Cl.

Известные в настоящее время содержания элементов в туманностях и массы ядер туманностей отягощены существенными ошибками, поэтому весьма важен вопрос о том, насколько статистически значимы полученные нами эмпирические зависимости $N(M_{cs})$. Для решения этого вопроса нами был использован следующий подход. Задавался малый уровень значимости $\alpha \ll 1$. Для заданного объема выборки N некоррелированных случайных величин определялось значение r_0 такое, что вероятность $P_N(|r| \geq r_0)$ того, что коэффициент корреляции $|r| \geq r_0$, не превысит значения α . В случае, если коэффициент корреляции для рассматриваемых нами содержаний и масс ядер туманностей превысит значение r_0 , его можно рассматривать как статистически значимый на уровне

значимости α . Полученные значения коэффициентов корреляции и соответствующие им величины α также приведены в табл. 3. Проведенный нами анализ, с использованием значений $P_N(|r| \geq r_0)$ (см, например, Тейлор, 1985), показал, что для всех рассмотренных нами элементов, за исключением кислорода, серы, а также азота и углерода для звезд малых масс, найденные нами зависимости $N(M_{cs})$ значимы на уровне $\alpha = 0.05-0.001$.

Вследствие большого разброса содержаний элементов в выборке ПТ важно выяснить природу отклонений содержаний N_i^* какого-либо элемента в туманности с номером i от полученного в результате аппроксимации (1). Для решения этого вопроса мы предположили, что разность $\varepsilon = N_i^* - N(X, M_{cs})_i$ для каждого элемента i является нормально распределенной случайной величиной с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 , одинаковой для всех значений M_{cs} . Справедливость данного предположения была проверена нами с помощью критерия χ^2 (см., например, Тюрин, Макаров, 2003). В табл. 4 отмечены элементы, для которых выдвинутая гипотеза справедлива на уровне значимости $\alpha = 0.01$.

Рассчитанные значения математического ожидания $\bar{\varepsilon}$ и дисперсии $\sigma^2(\bar{\varepsilon})$ случайной величины ε для каждого элемента даны в табл. 4 (столбцы 3 и 4). Значение $|\bar{\varepsilon}|$ не превосходит 10^{-14} , что подтверждает гипотезу о нормальности распределения величины ε . Средняя ошибка определения содержания не превосходит 0.3 dex и лишь для С и N увеличивается до 0.4 dex. Для O не обнаружено статистически значимой корреляции между содержанием кислорода в туманности и массой ядра туманности.

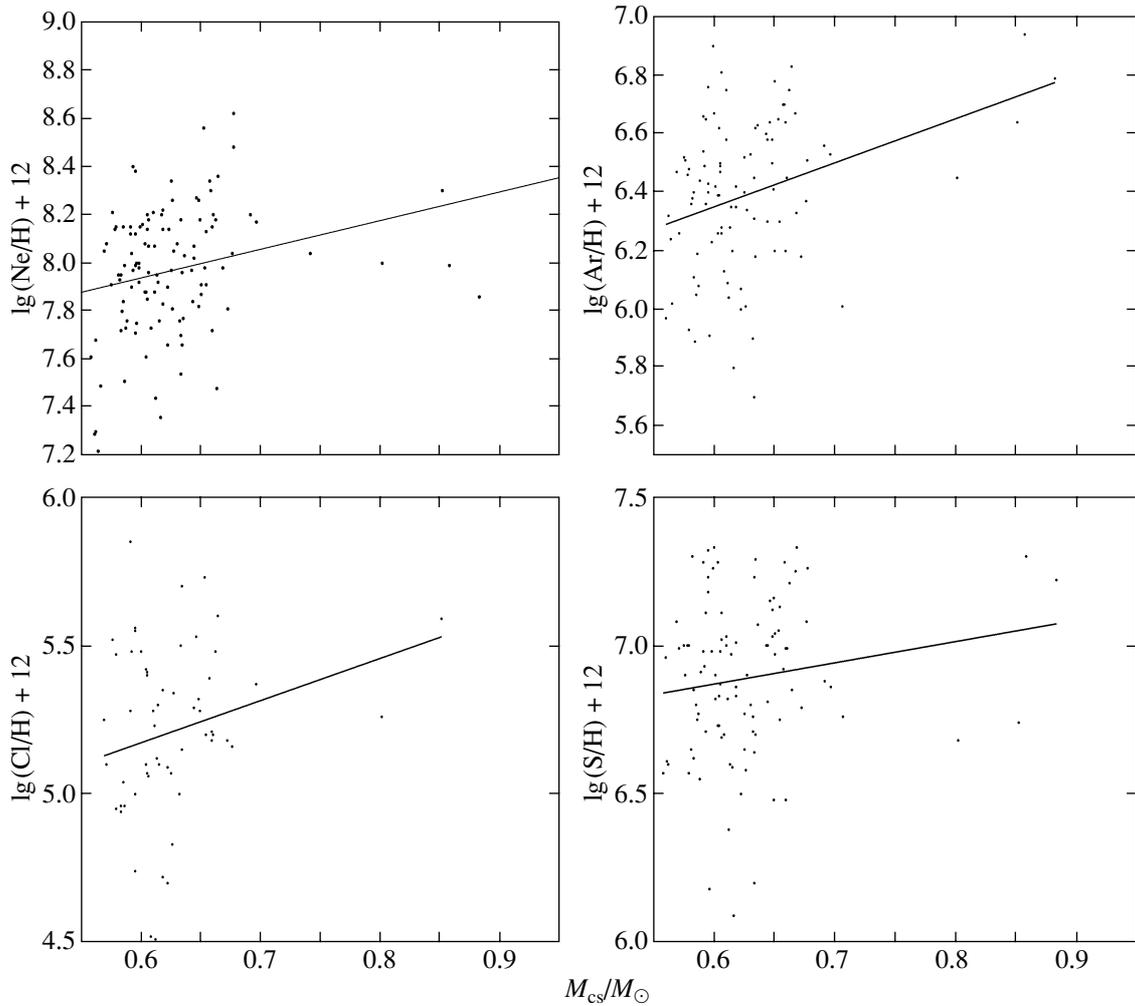


Рис. 2. Аппроксимация зависимости содержаний Ne, Ar, Cl и S от массы центральной звезды по формуле (1) — сплошные линии. Точки и треугольники — содержания для индивидуальных туманностей.

Формула (1) может быть использована для оценки массы центральной звезды туманности с известным содержанием $N(X)$ элемента X :

$$M_{cs} = M_{cs}(N(X)) = \frac{N(X) - a}{b}, \quad (2)$$

где a и b — константы, определенные в соотношении (1).

Для группы из k туманностей с близкими значениями содержаний элементов средняя ошибка определения массы центральной звезды уменьшается в \sqrt{k} раз. Использование для оценки массы центральной звезды M_{cs} содержаний нескольких элементов позволяет дополнительно уменьшить эту ошибку. Полученные таким образом массы ядер ПТ неотягощены ошибками определения расстояний до туманностей. Так как содержания химических элементов определяется с относительно высокой точностью, то определенные с помощью

соотношения (2) массы центральных звезд туманностей можно использовать для оценки самих состояний.

ЭВОЛЮЦИЯ СРЕДНЕГО СОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В АНСАМБЛЕ ПЛАНЕТАРНЫХ ТУМАННОСТЕЙ

Основываясь на синтетической модели эволюции ПТ (ван ден Хоек, Гроеневаген, 1997; Гроеневаген, Мариго, 2003), мы определили предсказанные содержания элементов в туманностях в предположении, что вещество звезды-предшественника, выброшенное на разных стадиях ее эволюции, полностью перемешано в туманности, а также содержания элементов в межзвездной среде в момент формирования звезды-предшественника туманности. Эти зависимости изображены на рис. 3 (пунктирные и штриховые линии соответственно). Предсказанные содержания сравниваются с полученными нами средними содержаниями C, N и

Таблица 3. Коэффициенты a и b , полученные для зависимости (1), коэффициенты корреляции r для зависимости содержание — масса и соответствующие им уровни значимости

Элемент	a	b	Интервал масс, M_{cs}	r	α	Реальность корреляции
C	6.98	2.99	0.559–0.615	–0.02	0.93	–
	10.51	–2.75	0.615–0.908	–0.52	0.001	+
N	5.38	4.56	0.55–0.615	0.11	0.32	–
	7.43	1.22	0.615–1.2	0.35	0.001	+
Ne	7.22	1.19	0.55–0.95	0.25	0.01	+
Cl	4.32	1.42	0.55–0.9	0.23	0.05	+
Ar	5.45	1.51	0.55–0.9	0.33	0.001	+

Таблица 4. Результаты применения критерия χ^2 для проверки гипотезы о нормальности распределения случайной величины

Элемент	Количество объектов	$\bar{\epsilon}$	$\sigma^2(\bar{\epsilon})$	Нормальность распределения ϵ
C	74	1.69×10^{-15}	0.14	+
N	168	-7.4×10^{-17}	0.17	+
O	166	–	–	–
Ne	114	2.06×10^{-15}	0.06	+
Cl	60	1.05×10^{-15}	0.08	+
Ar	98	3.62×10^{-16}	0.06	+

Примечание. ϵ — ошибки определения содержания заданного элемента, '+' — гипотеза принимается, '–' — гипотеза отвергается.

О для выборки галактических ПТ с известными начальными массами центральных звезд в четырех промежутках начальных масс: 0.9–1.5, 1.5–2.0, 2.0–3.0 и 3.0–6.0 M_{\odot} . Для каждого из четырех выбранных интервалов получены как средние содержания C, N и O в данном интервале, так и соответствующие стандартные отклонения, представленные на рис. 3. Полученные средние значения и стандартные отклонения отнесены к средним значениям масс для каждого из рассмотренных интервалов масс центральных звезд ПТ.

Для получения начальных масс звезд-предшественников ПТ использовалась построенная нами эмпирическая зависимость начальная масса–конечная масса (масса центральной звезды туманности M_{cs}), представленная на рис. 4. Эту зависимость можно аппроксимировать формулой:

$$M_{ini}/M_{\odot} = 7.08 + 10.55 \lg(M_{cs}/M_{\odot}), \quad (3)$$

где M_{ini} — начальная масса звезды-предшественника туманности, M_{cs} — масса центральной звез-

ды туманности. При получении данного соотношения использованы следующие источники: Блокер (1995) — B95, Ибен (1998) — Ib98, Вассилидиас, Вуд (1993) — VW93, Вайдеман (1987) — W87.

Важную проблему представляет вопрос о средней ошибке определения масс ядер туманностей и масс их звезд-предшественников. Для ответа на этот вопрос нами использовалось следующее приближение. Предполагалось, что массы центральных звезд туманностей, определенные в работах Малькова (1997) и Горного и др. (1997), являются случайными величинами с одинаковыми математическим ожиданием и дисперсией $D(M_{cs})$, зависящей от массы ядра туманности. В этом случае разность масс ядер для туманностей, общих в обоих списках, будет являться случайной величиной с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $D(M_{cs})$.

Использование данного подхода дает значения стандартного отклонения $\sigma \approx 0.01$ для масс ядер

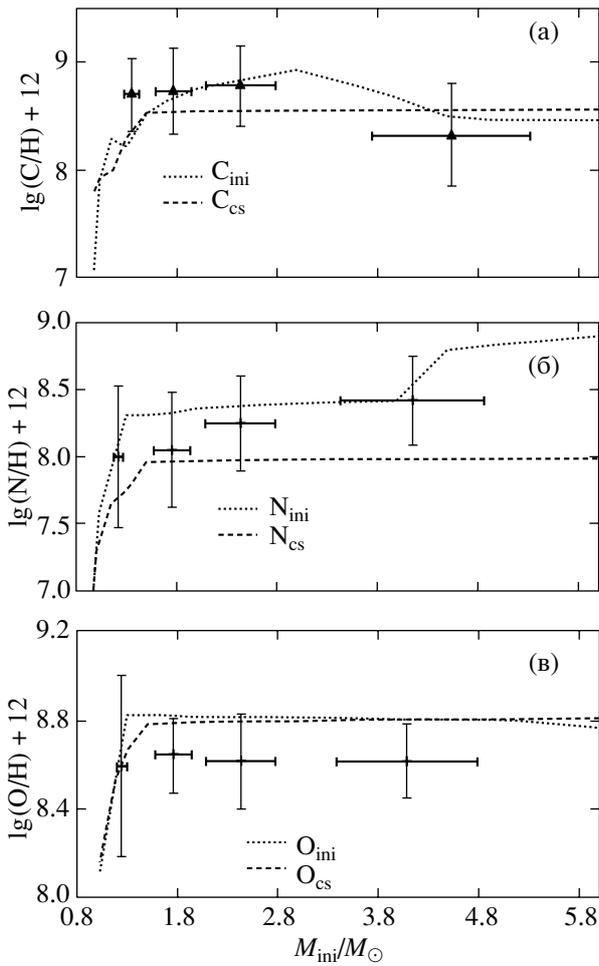


Рис. 3. Зависимости содержаний CNO в планетарных туманностях от масс звезд-предшественников туманностей: (а) — для углерода, (б) — для азота, (с) — для кислорода. Пунктирные линии — начальные содержания рассматриваемых элементов, штриховые линии — предсказанное содержание в сброшенной оболочке AGB-звезды (ван ден Хоек, Гроеневаген, 1997). Треугольники (для С) и крестики (для N и О) — средние содержания соответствующих элементов для выбранных интервалов масс звезд-предшественников. Указаны бары ошибок содержаний и масс звезд-предшественников в данных интервалах.

$M_{cs} \approx 0.6M_{\odot}$ и $\sigma \approx 0.04$ для $M_{cs} \approx 0.8M_{\odot}$. Для перехода от ошибок в определении масс центральных звезд к ошибкам в определении M_{ini} — начальных масс звезды-предшественника можно использовать соотношение (3). Полученные таким образом значения ошибок в определении M_{ini} (на уровне одного стандартного отклонения) представлены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, теоретические зависимости содержаний С и N от M_{cs} в первом приближении соответствуют зависимостям, полученным в настоящей работе, с точностью на уровне одного стандартного отклонения. В то же время найденное

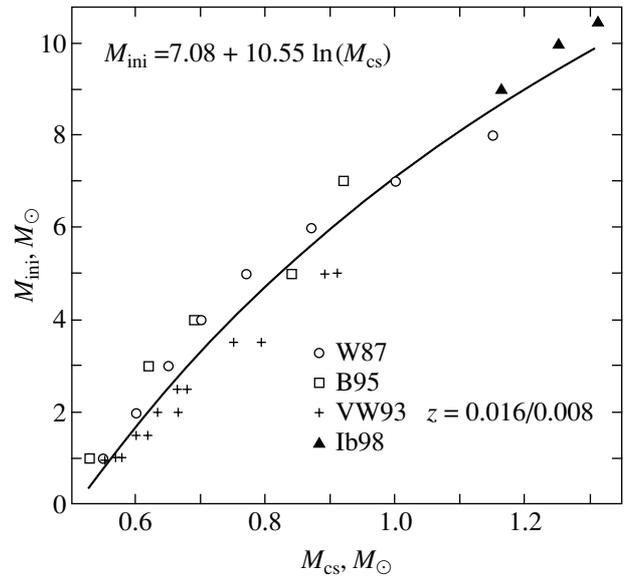


Рис. 4. Зависимость конечная масса—начальная масса центральной звезды планетарной туманности.

нами среднее содержания О, существенно меньше (примерно в два раза) теоретического значения. С увеличением массы звезды-предшественника от 1 до 6–8 M_{\odot} средние содержания С и N возрастают в 3–4 раза, в то время как содержание О почти не изменяется.

Зависимости содержаний Ne и Cl от начальных масс звезд-предшественников представлены на рис. 5. Очевидно увеличение содержаний с ростом массы звезды-предшественника. Содержания Ne и Cl практически не меняется в ходе эволюции звезд промежуточных масс (Блокер, 1995; Ибен, 1998). Таким образом, содержания этих элементов в туманности соответствует их содержанию в момент образования звезды-предшественника туманности. А это, в свою очередь, означает, что содержания Ne и Cl в планетарной туманности определяется составом межзвездной среды в месте формирования звезды-предшественника в момент ее образования.

Таблица 5. Коэффициенты p и q для соотношения возраст—масса (5)

M_1	M_2	p	q
0.9	1.5	-4.68	17.28
1.5	2.0	-0.886	8.743
2.0	3.0	-0.32	6.48
3.0	4.0	-0.057	4.114
4.0	6.0	-0.034	3.744
6.0	9.0	-0.002	2.592

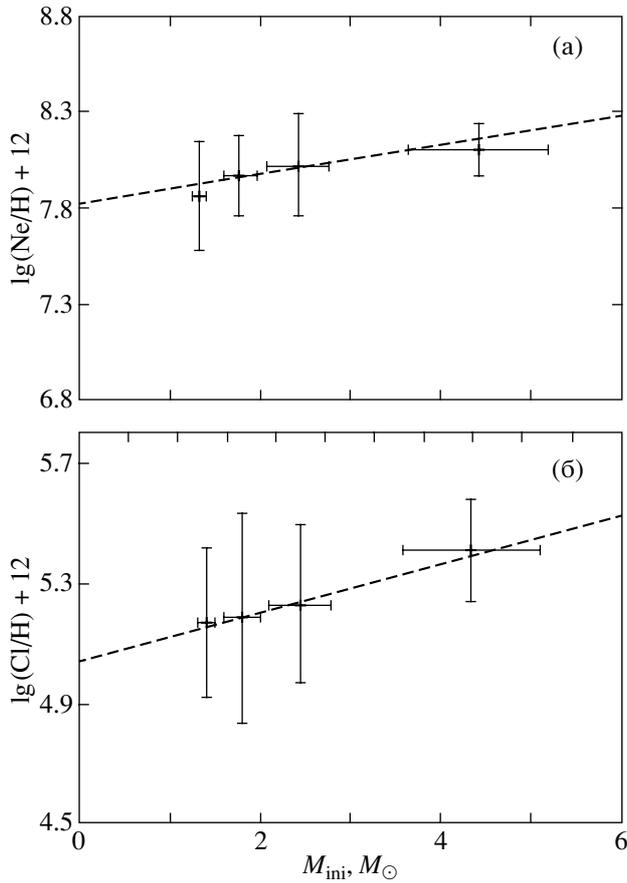


Рис. 5. Зависимости содержаний элементов от массы центральной звезды: (а) — для неона, (б) — для хлора. Пунктир — линейная аппроксимация данной зависимости. Крестиками отмечено среднее содержание элемента для выбранных интервалов масс звезд-предшественников. Указаны бары ошибок содержания и масс звезд-предшественников в выбранных интервалах.

Время, прошедшее после образования звезды-предшественника туманности до момента образования самой туманности, равно сумме времен пребывания звезды на стадиях до главной последовательности ($\tau_{\text{Pre-MS}}$), на главной последовательности (τ_{MS}), красного гиганта (τ_{RGB}), асимптотической ветви гигантов (τ_{AGB}) и пост-асимптотической стадии эволюции ($\tau_{\text{post-AGB}}$) соответственно:

$$\tau_{\text{tot}} = \tau_{\text{Pre-MS}} + \tau_{\text{MS}} + \tau_{\text{RGB}} + \tau_{\text{AGB}} + \tau_{\text{post-AGB}}. \quad (4)$$

Для звезд промежуточной массы время их жизни на главной последовательности значительно превышает времена их нахождения на других этапах эволюции.

Для определения значения τ_{tot} воспользуемся табличными значениями этой величины в книге Бинья, Мерифилда (2003). Для расчета τ_{tot} при промежуточных значениях масс разобьем проме-

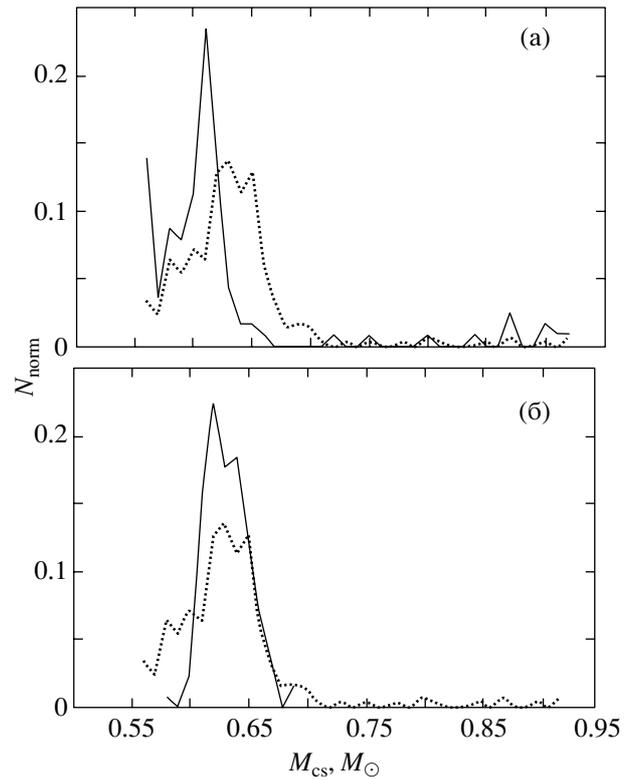


Рис. 6. (а) — Сравнение функции распределения масс центральных звезд планетарных туманностей в интервале $0.55\text{--}0.95M_{\odot}$, полученной в настоящей работе (МКх, пунктирная кривая), с данными работы Стасинской и др. (1997) (S, сплошная кривая) для туманностей с массой оболочки $0.1M_{\odot}$; (б) — то же, что и на рис. (а), но сравнение проведено с функцией распределения предсказанных масс центральных звезд ПТ, определенных по предложенной в настоящей работе формуле.

жуток начальных масс звезд от 0.8 до $9M_{\odot}$ на шесть промежутков и представим зависимость от начальной массы звезды на каждом из интервалов в виде:

$$\tau_{\text{tot}} = p + q/M^2, \quad 10^9 \text{ лет}. \quad (5)$$

Коэффициенты p и q даны в табл. 5.

Подставляя в эту формулу средние значения масс звезд в рассматриваемых нами интервалах начальных масс, получим величины 7.2×10^9 лет, 5.2×10^9 лет, 4.2×10^9 лет и 2.4×10^9 лет соответственно. Таким образом, можно сделать вывод, что найденная нами зависимость содержаний Ne и Cl от масс звезд-предшественников туманностей отражает увеличение средних содержаний тяжелых элементов в ходе химической эволюции Галактики за время $\approx 7 \times 10^9$ лет до современной эпохи.

ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАСС ЦЕНТРАЛЬНЫХ ЗВЕЗД ТУМАННОСТЕЙ

На основании определений масс центральных звезд ПТ, представленных в списке Милановой, Холтыгина (2005), нами построена функция распределения масс центральных звезд туманностей. На рис. 6 представлена гистограмма плотности функции распределения масс центральных звезд $f(M_{cs})$ в промежутке масс $0.55-0.95 M_{\odot}$. При построении гистограммы весь промежуток масс разбивался на 50 равномерно распределенных интервалов и подсчитывалось число туманностей $N(\bar{M}_i)$ с массами центральных звезд в интервале M_i-M_{i+1} . Средняя масса центральных звезд с массами в данном интервале полагалась равной $\bar{M}_i = (M_i + M_{i+1})/2$. Нормированная функция масс определялась из следующего соотношения:

$$N_{\text{norm}} = N_{\text{norm}}(M_{cs}) = N(\bar{M}_i)/N_{\text{tot}}, \quad (6)$$

где N_{tot} — полное число туманностей с известными массами центральных звезд.

Для увеличения статистической значимости отсчетов гистограммы у туманностей с неизвестными массами центральных звезд для их оценки использовалось соотношение (2).

На рис. 6а полученная нами функция распределения масс центральных звезд планетарных туманностей в области масс $0.55-0.95 M_{\odot}$ сравнивается с полученной в работе Стасинской и др. (1997). Видно существенное различие полученной нами плотности функции распределения с определенной в работе Стасинской и др. (1997).

Во-первых, полученная нами плотность функции распределения достигает максимума при значении $M_{cs} \approx 0.63 M_{\odot}$ в отличие от величины $0.61 M_{\odot}$ в работе Стасинской и др. (1997). Во-вторых, максимум плотности функции распределения, полученный нами, существенно шире. Наиболее вероятной причиной расхождения является больший объем выборки ПТ (примерно в три раза), используемой в настоящей работе.

На рис. 6б сравниваются функция масс, полученная только по предсказанным из соотношения (2) массам центральных звезд с полной функцией масс. Из рисунка видно, что функция распределения предсказанных масс определена только в интервале масс $0.57-0.7 M_{\odot}$. Узость интервала предсказанных масс вероятнее всего объясняется недостатком данных о ПТ с очень высокими и низкими содержаниями металлов. Максимум функции распределения предсказанных масс центральных звезд ПТ достигается при значении $M_{cs} \approx 0.62 M_{\odot}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Существует статистически значимая зависимость содержаний С, N, Ne, Cl и Ag в туманностях от масс их центральных звезд.

2. Зависимости содержаний С и N в туманностях от масс звезд-предшественников соответствуют современным синтетическим моделям эволюции звезд промежуточных масс. Найденные средние содержания O в ансамбле планетарных туманностей Галактики в два раза меньше теоретических значений.

3. Максимум эмпирической функции распределения масс центральных звезд планетарных туманностей достигается при $M_{cs} \approx 0.62-0.63 M_{\odot}$.

Работа поддержана грантом Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-1088.2003.3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биней, Меририлд (J. Binney and M. Merifield), *Galactic Astronomy* (Princeton, USA: Princeton Univ. Press, 1998).
2. Блокер (T. Blocker), *Astron. Astrophys.* **297**, 627 (1995).
3. Вайдман (V. Weidemann), *Astron. Astrophys.* **188**, 74 (1987).
4. ван ден Хоек, Гроеневерген (L.B. van den Hoek and M.A.T. Groenewegen), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **123**, 305 (1997).
5. Вассилидиас, Вуд (V. Vassiliadis and P.R. Wood), *Astrophys. J.* **413**, 641 (1993).
6. Горный и др. (S.K. Górny, G. Stasińska, and R. Tylenka), *Astron. Astrophys.* **318**, 256 (1997).
7. Гроеневерген, Мариго (M.A.T. Groenewegen and P. Marigo), *Asymptotic Giant Branch Stars* (Ed. H.J. Habing, H. Olofsson, N.Y.: Springer-Verlag, 2003), p. 105.
8. Ибен (I. Iben), *Modern problems of stellar Evolution* (Ed. D.S. Wiebe, Moscow: GEOS, 1998), p. 52.
9. Ибен, Рензини (I. Iben and A. Renzini), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **21**, 271 (1983).
10. Коста и др. (R.D.D. Costa, C. Chiappini, W.J. Maciel, and J.A. Freitas Pacheco), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **116**, 249 (1996).
11. Мальков Ю.Ф., *Астрон. журн.* **6**, 853 (1997).
12. Масиел, Дутра (W.J. Maciel and C.M. Dutra), *Astron. Astrophys.* **262**, 271 (1992).
13. Масиел, Кёппен (W.J. Maciel and J. Koppen), *Astron. Astrophys.* **282**, 436 (1994).
14. Масиел, Куиреза (W.J. Maciel and C. Quireza), *Astron. Astrophys.* **345**, 629 (1999).
15. Маттеучи (F. Matteucci), *The Chemical Evolution of the Galaxy, Astrophysics and Space Science Library* (Dordrecht: Kluwer, reprint, 2003), v. 253.

16. Миланова Ю.В., Холтыгин А.Ф., http://www.astro.spbu.ru/staff/aik/AtDatCentre/-PIDiagn/neb_ab.html, (2005).
17. Пеймберт (M. Peimbert), *Planetary Nebulae, Proc. IAU Symp. №76* (Ed. Y. Terzian, Dordrecht: D. Reidel Publ. Co., 1978), p. 215.
18. Перек, Когоутек (L. Perek and L. Kohoutek), *Catalogue of Galactic Planetary Nebulae* (Publ. House Czech. Acad. Sci., part 3, 1-276, 1967).
19. Перинотто и др. (2004) (M. Perinotto, L. Morbidelli, and A. Scatarzi), MNRAS 349, 793 (2004).
20. Станжеллини и др. (L. Stanghellini, J.B. Kaler, and R.A. Shaw), *Astron. Astrophys.* **291**, 604 (1994).
21. Станжеллини и др. (L. Stanghellini, J.B. Kaler, R.A. Shaw, and S.di S. Alighieri), *Astron. Astrophys.* **302**, 211 (1995).
22. Стасинская и др. (G. Stasińska, S.K. Górný, and R. Tylanda), *Astron. Astrophys.* **327**, 736 (1997).
23. Тейлор Дж., *Введение в теорию ошибок* (М.: Мир, 1985), с. 254.
24. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А., *Анализ данных на компьютере* (М.: ИНФРА-М, 2003), с. 499.
25. Холтыгин (A.F. Kholtygin), *Astron. Astroph.* **328**, 691 (1998a).
26. Холтыгин (A.F. Kholtygin), *Astroph. Space Sci.* **255**, 513 (1998b).
27. Холтыгин А.Ф., *Астрофизика* **43**, 627 (2000).
28. Эскудеро и др. (A.V. Escudero, R.D.D. Costa, and W.J. Maciel), *Astron. Astrophys.* **414**, 211 (2004).