

УДК: 524.31.02—366

О СОДЕРЖАНИИ ТЕХНЕЦИЯ В ХОЛОДНЫХ ГИГАНТАХ

А. А. АКОПЯН, Ю. К. МЕЛИК-АЛАВЕРДЯН

Поступила 1 апреля 1988

Принята к печати 15 марта 1990

На основе модельных расчетов и имеющихся данных относительно интенсивностей линий Tc рассмотрен вопрос о содержании Tc в звездах. Установлены корреляция между содержанием Tc и физическими параметрами звезд.

Технеций в звездах был впервые обнаружен Мериллом в 1952 г. [1]. Как известно, технеций не имеет стабильных изотопов и, следовательно, его присутствие в атмосферах звезд указывает на сравнительно недавний процесс образования элементов. Поэтому выявление технеция в звездах различных классов имеет важное значение для теории звездной эволюции.

Практически все имеющиеся к настоящему времени данные о содержании технеция в звездах собраны в [2], где 279 звезд разбиты на следующие 5 групп на основании признаков наличия (или отсутствия) технеция: а) звезды, в которых технеций, по мнению авторов, несомненно присутствует; б) звезды, в которых Tc , по всей вероятности, присутствует; в) звезды, в которых Tc , возможно, имеется; г) звезды, в которых Tc , вероятно, нет; д) звезды, в которых технеция нет определенно.

Можно ли, используя результаты работы [2], выяснить какие-либо закономерности процесса образования технеция, например, на какой стадии эволюции образуется этот элемент, как долго продолжается процесс его образования, имеется ли корреляция интенсивности этого процесса с теми или иными параметрами звезд? Ответить на все эти вопросы можно было бы, располагая данными о содержании технеция в звездах. Однако в работе [2] приводятся лишь качественные оценки, относящиеся к содержанию технеция. Тем не менее — в этом и заключается основная идея нашей работы — можно, используя данные работы [2], получить определенное представление о том, как содержание технеция связано с теми или иными физическими параметрами рассматриваемой группы звезд.

С этой целью мы выбрали среди звезд, исследованных в [2] с точки зрения наличия признаков содержания технеция, те звезды, которые относятся к долгопериодическим переменным спектрального класса М. Эти

звезды представляют позднюю стадию эволюции. В аспекте исследования происхождения технеция для нас существенно то обстоятельство, что теоретическое рассмотрение этой эволюции дает возможность оценить важнейшие физические параметры звезд, такие, как абсолютная светимость, масса, возраст. Для этих целей служит, так называемая, диагностическая диаграмма [3]. Таким образом, оценив содержание технеция в миридах, мы сможем связать эту величину с рядом физических параметров мирид, определенных с помощью диагностической диаграммы.

Перейдем теперь к определению содержания технеция. Конечно, мы не располагаем данными, которые позволили бы нам получить точное значение этой величины. Однако, располагая данными [2], мы можем ввести в рассмотрение некоторый параметр δ , который, как будет показано ниже, определенным образом связан с содержанием технеция. Для этого поступим следующим образом. Все мириды, классифицированные в [2] по наличию (или отсутствию) технеция, разделим на две группы. В первую группу включим те звезды, в которых наличие технеция, согласно [2], считается установленным или хотя бы вероятным, а во вторую — остальные. Обозначим относительное число звезд, принадлежащих к первой группе, через δ . Величина δ , которая, как будет показано ниже, определенным образом связана с содержанием технеция, для различных групп звезд будет, вообще говоря, различной. В частности, мы распределили все рассматриваемые звезды на 6 групп по величине параметра m , представляющего собой величину массы звезды, найденную с помощью диагностической диаграммы. Оказалось, что величина δ увеличивается с увеличением m (см. табл. 1). В этой же таблице приводятся зависимости δ от других, определенных также с помощью диагностической диаграммы, параметров: первоначальной массы, величины потери массы, возраста мириды.

Таблица 1

m	<0.6	0.6—0.7	0.7—0.8	0.8—0.9	0.9—1.0	>1.0		
δ %	6	14	35	62	73	77		
m_0	<0.9	0.9—1.0	1.0—1.1	1.1—1.2	1.2—1.3	1.3—1.4	1.4—1.5	>1.6
δ %	0	12.5	25	7	62.5	64	76.5	70
Δm	<0.4	0.4—0.45	0.45—0.5	0.5—0.55	0.55—0.6	>0.6		
δ %	13	20	52	70	75	100		
$t \cdot 10^5$ лет	<7.5	7.5—10	10—12.5	12.5—15	15—17.5	17.5—20	>20	
δ %	0	15	17	37.5	81	75	67	

Рассмотрим теперь полученные зависимости в отдельности (они показаны также на рис. 1—4).

Зависимость δ — масса. На рис. 1 и 2 показаны зависимости величины δ от массы звезды и от ее первоначальной массы m_0 , то есть массы, ко-

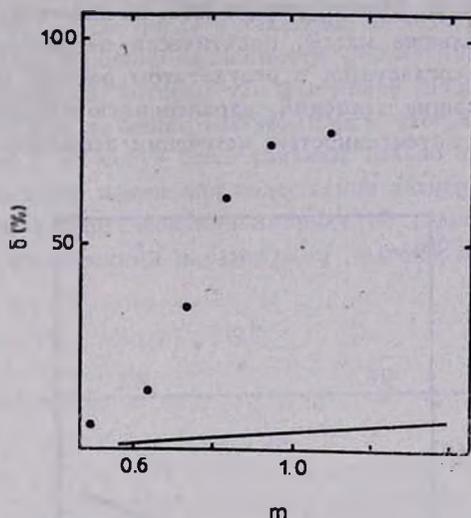


Рис. 1. Зависимость δ от текущей массы m .

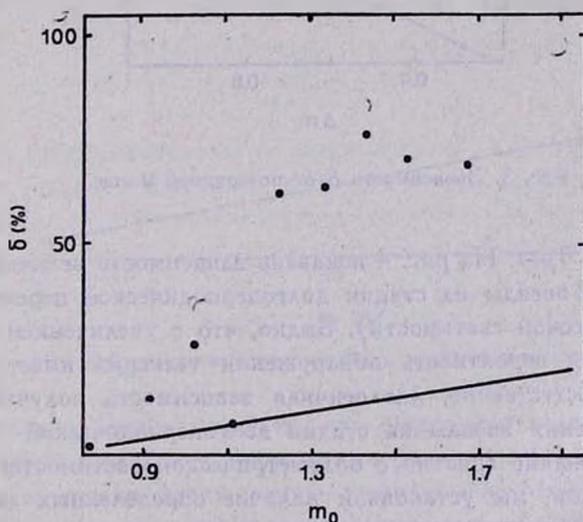


Рис. 2. Зависимость δ от первоначальной массы m_0 .

торая была у данной звезды на главной последовательности. Как видно из этих рисунков, относительное число звезд, содержащих технеций, тем больше, чем больше масса звезды.

Разница в массах m_0 и m обусловлена истечением вещества, особенно активным, как известно, на стадии красного гиганта. На рис. 3 приводится зависимость величины δ от величины массы, выброшенной звездой в ходе ее эволюции. Как видно из этого рисунка, величина δ быстро растет с увеличением потери массы. Можно утверждать, по-видимому, что все звезды, потерявшие значительные массы, практически несомненно содержат технеций. Этот вывод согласуется с результатом работы [4], где отмечено, что звезды, содержащие технеций, характеризуются инфракрасными избытками и высокой интенсивностью истечения вещества.

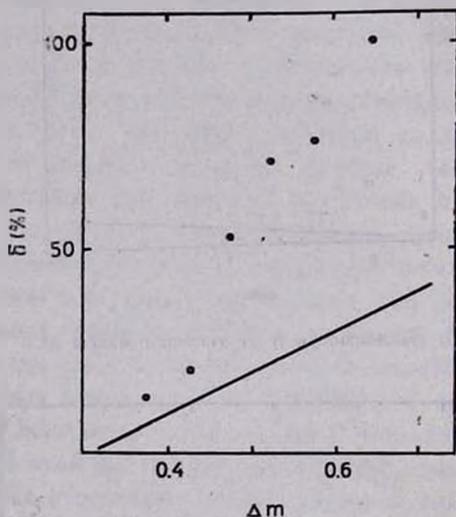


Рис. 3. Зависимость δ от потерянной массы.

Зависимость $\delta - t$. На рис. 4 показана зависимость величины δ от времени пребывания звезды на стадии долгопериодической переменной (или от ее болометрической светимости). Видно, что с увеличением болометрической светимости вероятность обнаружения технеция имеет тенденцию увеличиваться. Естественно, аналогичная зависимость получается и для времени пребывания звезды на стадии долгопериодической переменной (это время однозначно связано с болометрической светимостью [3]).

Таким образом, мы установили наличие определенных зависимостей величины δ от ряда физических параметров долгопериодических переменных звезд. Можно ли на основании этого утверждать, что с рассматриваемыми вариациями физических параметров рассматриваемых звезд связаны реальные изменения содержания технеция? В этом можно сомневаться.

Действительно, все рассматриваемые физические параметры звезд коррелируют с их эффективной температурой, которая непосредственно влияет на интенсивность линий поглощения, образующихся в атмосферах соответствующих звезд, и, следовательно, на возможность обнаружения любого химического элемента, в том числе и технеция. Вследствие этого можно ожидать наличия определенной зависимости рассматриваемой нами величины δ от всех параметров, которые так или иначе связаны с эффективной температурой звезд. Тем не менее, мы убедились, что полученные нами зависимости величины δ не могут быть связаны только с данным эффектом и указывают на реальные изменения содержания технеция, и, следовательно, можно говорить о существовании корреляций содержания технеция с рассматриваемыми физическими параметрами долгопериодических переменных.

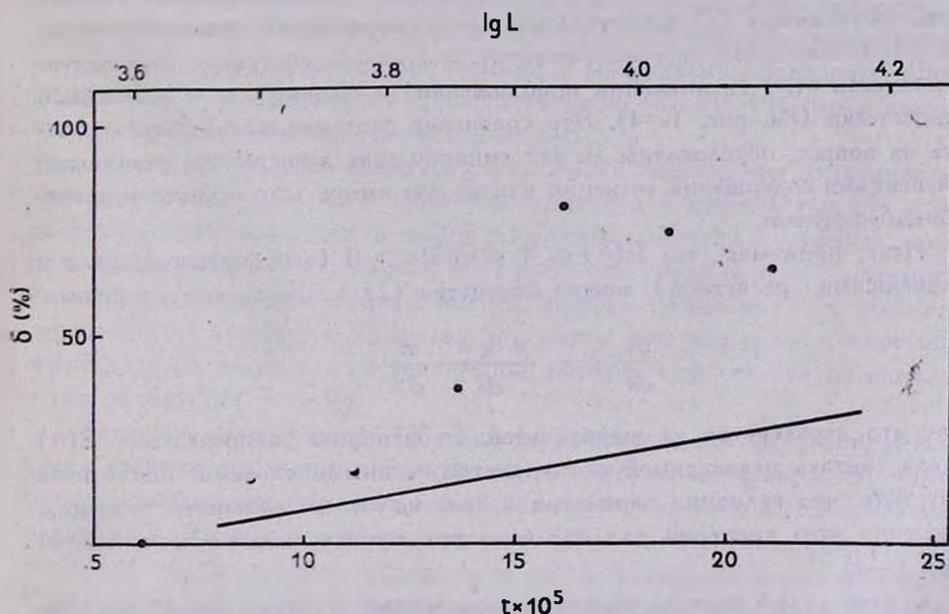


Рис. 4. Зависимость δ от светимости и времени пребывания на стадии мириды.

Действительно, чтобы показать, что ожидаемая вследствие температурного эффекта зависимость δ от рассматриваемых физических параметров не может объяснить наблюдаемую, выполним некоторые расчеты. Выразим определенную выше величину δ следующим образом:

$$\delta = \int_{\lg n'}^{\bar{}} E(n) d \lg n, \quad (1)$$

где $E(n)$ — нормированная функция распределения содержания технеция в рассматриваемых звездах, n' — минимальное обнаружимое содержание технеция, зависящее, в частности, от спектрального класса звезды.

Теперь мы можем рассчитать ожидаемые зависимости величины δ от рассматриваемых физических параметров, характеризующих мириды, и сравнить эти зависимости с полученными выше (см. рис. 1—4). Для этого рассмотрим зависимость δ от некоторого параметра, который мы обозначим через x . Дифференцируя (1) по x и полагая, для начала, что $E(n)$ не зависит от x , находим:

$$\frac{d\delta}{dx} = -E(n') \frac{d \lg n'}{dx} = -E(n') \frac{d \lg n'}{ds} \frac{ds}{dx}, \quad (2)$$

где s — параметр, определяющий спектральный подкласс звезды. Правая часть соотношения (2) представляет собой коэффициент линейной регрессии $\delta(x)$. Рассчитав этот коэффициент, мы можем построить ожидаемую зависимость $\delta(x)$ (в линейном приближении) и сравнить ее с полученной эмпирически (см. рис. 1—4). Это сравнение даст нам возможность ответить на вопрос, обусловлены ли эти эмпирические зависимости реальными изменениями содержания технеция или же мы имеем дело с чисто температурным эффектом.

Итак, принимая, что $E(n) \leq 1$ и $d\delta/dx > 0$ (это подтверждается и дальнейшими расчетами), можно равенство (2) заменить неравенством:

$$\frac{d\delta}{dx} \leq - \frac{d \lg n'}{ds} \frac{ds}{dx}. \quad (3)$$

Если это неравенство не выполняется, то функцию распределения $E(n)$ нельзя считать независимой от параметра x , иными словами, приходится допустить, что величина параметра x связана с содержанием технеция. Применим этот критерий для анализа полученных выше зависимостей (рис. 1—4).

С этой целью оценим значения производных в приведенном выше неравенстве (3). Расчет величины ds/dx особых трудностей не представляет: в качестве ds/dx можно взять коэффициент линейной регрессии спектрального подкласса и параметра x . Необходимые для расчета этих коэффициентов данные у нас имеются: это спектральные подклассы и периоды изменения блеска, приведенные в [2] для рассматриваемых звезд. Воспользовавшись этими данными и привлекая для оценки параметров L , m , m_0 и t диагностическую диаграмму, мы получили следующие значения коэффициентов регрессии: 0.77 (для коэффициента регрессии спектрального подкласса с массой m), 10 (с потерей массы), 5.06 (со светимостью), 0.17 (с возрастом), 1.75 (с m_0).

Что касается величины $d \lg n' / ds$, то при некоторых упрощающих предположениях ее можно оценить, используя кривые роста линии поглощения технеция для звезд различных спектральных классов. Необходимые кривые роста мы построили, используя для расчетов модели атмосфер холодных гигантов классов M [5]. Так как эти модели атмосфер рассчитаны для определенных значений эффективных температур и ускорений силы тяжести, а в качестве характеристики звезды мы приняли ее спектральный подкласс, то для использования данных моделей нам необходимо задаться определенным соответствием между спектральным подклассом, с одной стороны, и эффективной температурой и ускорением силы тяжести — с другой. Такое соответствие мы приняли согласно работе [6].

Не останавливаясь на методике построения кривых роста, отметим лишь следующее. При расчетах профиль линий поглощения технеция принимался фойгтовским [7], учитывалась микротурбулентность, скорость которой принималась равной 3 км/с. Учитывалось поглощение отрицательными ионами водорода, рассеяние атомами и молекулами водорода. Силы осцилляторов линий технеция приняты согласно [8]. Полученные в результате расчетов кривые роста показаны на рис. 5.

Теперь, располагая кривыми роста линий поглощения технеция, мы можем рассчитать величину $d \lg n' / ds$, входящую в неравенство (3) и характеризующую зависимость минимально обнаружимого количества технеция от спектрального подкласса. Для этого мы приняли в качестве минимальной регистрируемой эквивалентной ширины линии 4297 Тс значение, равное 50 mÅ (нетрудно убедиться, что выбор того или иного конкретного значения этой величины на дальнейшие расчеты существенно не влияет), и нашли $d \lg n' / ds \sim -0.1$.

Вернемся к неравенству (3). Теперь у нас есть все необходимые значения величин, входящих в правую часть этого неравенства, и мы можем оценить наибольшие ожидаемые значения $d\delta/dx$ для всех рассматриваемых параметров. Рассматривая эти значения $d\delta/dx$ в качестве коэффициентов регрессии, мы построили на рис. 1—4 соответствующие линии регрессии. Сопоставляя эти линии с построенными ранее эмпирическими зависимостями, мы приходим к основному выводу нашей работы: во всех представленных на рис. 1—4 случаях имеет место определенная зависимость содержания технеция от физических свойств звезд, так как ожидаемые вследствие температурных эффектов соответствующие зависимости значительно слабее наблюдаемых. Этот вывод дает нам моральное право утверждать, что полученные нами зависимости величины δ от параметров m , m_0 , Δm и t отражают зависимость от этих параметров именно содержания технеция. Поэтому ниже мы будем вместо слов зависимость δ от физических параметров m , m_0 , Δm и t говорить о зависимости от этих параметров именно содержания технеция. Что можно сказать о природе этих зависимостей?

Согласно современным представлениям, мириды — это звезды, в ядрах которых выгорел He. Светимость таких звезд однозначно определяет время их пребывания в стадии мириды [3]. Учитывая это обстоятельство, мы пришли к выводу, что чем больше время пребывания данной звезды на стадии мириды, тем больше в ней технеция. Вторым важным выводом нашей работы заключается в том, что содержание технеция увеличивается с увеличением массы звезды, и, следовательно, с уменьшением времени, проведенного звездой на главной последовательности. Это означает, что содержание технеция уменьшается с увеличением возраста звезды.

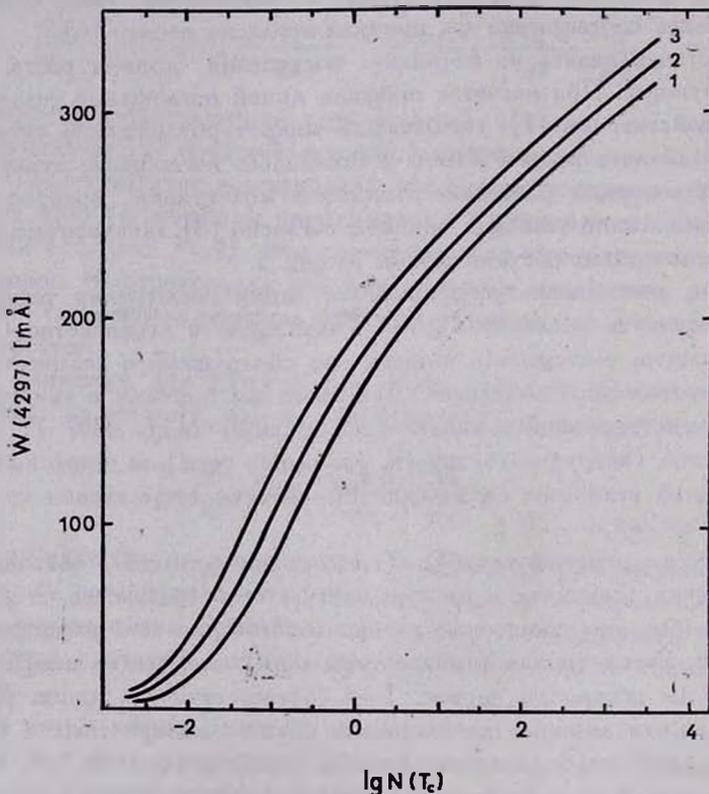


Рис. 5. Кривые роста для звезд разных спектральных подклассов: 1—M2, 2—M4, 3—M6.

Сопоставляя между собой два этих заключения, можно сделать вывод, что образование технеция в звездах происходит именно на стадии мириды. Действительно, если бы процесс образования технеция завершился до вступления звезды на стадию мириды, то вследствие распада технеция наблюдалось бы уменьшение его содержания с возрастом звезды.

Следовательно, учитывая вышесказанное, мы должны допустить, что обогащение атмосфер звезд технецием происходит на стадии мириды, и интенсивность этого процесса тем выше, чем меньше средний возраст звезды.

Из полученных выше кривых роста линий технеция следует, что диапазон изменения содержания технеция, соответствующий наблюдаемому диапазону эквивалентных ширин этих линий (50—300 *m* А), составляет примерно 4 порядка. Это означает, что после однократного образования технеция этот элемент может наблюдаться в спектре звезды в течение времени, соответствующего не более чем 10 периодам его полураспада. Наиболее долгоживущие изотопы технеция имеют, как известно, следующие периоды полураспада:

$$^{99}\text{Tc} - 2.1 \cdot 10^5, \quad ^{98}\text{Tc} - 1.5 \cdot 10^6, \quad ^{97}\text{Tc} - 2.6 \cdot 10^6 \text{ лет.}$$

Как видно из рис. 4, содержание технеция за время 10^6 лет не только не уменьшается, а, наоборот, увеличивается. Этот факт говорит о том, что в рассматриваемых звездах образование технеция представляет собой, вероятно, не однократный, а длительный процесс. Покажем это на некоторой упрощенной модели. Допустим, что образование технеция на стадии мириды происходит с некоторой постоянной интенсивностью. Тогда изменение содержания технеция с учетом его распада выражается уравнением:

$$\frac{dN}{dt} = a - \frac{N}{t_0}, \quad (4)$$

где t_0 — период полураспада. Из уравнения (4) получим:

$$N(\text{Tc}) = a t_0 [1 - \exp(-t/t_0)], \quad (5)$$

где a — постоянная, которую можно определить по данным наблюдений.

Как видно из (5), содержание ^{99}Tc в рассматриваемой модели при $t > 5 \cdot 10^5$ лет практически не должно зависеть от возраста. В противоположность этому, на рис. 4 наблюдается заметное увеличение содержания технеция с возрастом звезды. Это противоречие приводит нас к предположению, что технеций в миридах может быть представлен не изотопом ^{99}Tc , а изотопами ^{97}Tc или ^{98}Tc — так как для периодов полураспада этих изотопов формула (5) предсказывает наблюдаемое усиление содержания технеция со временем.

Конечно, в качестве альтернативного объяснения наблюдаемого увеличения содержания технеция с возрастом мирид можно допустить, что технеций образуется с возрастающей производительностью. Однако для такого предположения у нас пока нет никаких оснований.

Вывод о том, что Tc в миридах представлен своими наиболее долгоживущими изотопами ^{97}Tc и (или) ^{98}Tc , имел бы принципиально важное значение. Дело в том, что образование технеция в звездах обычно связывают с

процессом нейтронного захвата изотопом ^{98}Mo , который распадается, образуя ^{90}Tc . Остальные два долгоживущих изотопа технеция не могут образовываться путем нейтронного захвата. Для объяснения происхождения этих изотопов приходится привлекать такие процессы, как захват протонов, реакции с γ -квантами, распад тяжелых элементов. Эти процессы предполагаются, или, во всяком случае, допускаются в гипотезе о распаде сверхплотного дозвездного вещества, выдвинутой в [9]. Конечно, приведенные выше соображения еще не являются доказательством существования такого рода процессов в миридах, так как нельзя полностью исключить возможность того, что увеличение содержания технеция с возрастом мириды связано с увеличением интенсивности образования этого элемента. Трудно понять, однако, почему характерное время этого процесса совпадает с периодом полураспада ^{98}Tc или ^{97}Tc .

В заключение отметим, что полученные выше результаты могут служить критерием для проверки представлений об эволюции мирид. Принимая обычную оценку возраста мириды $2 \cdot 10^6$ лет (мы имеем в виду, конечно, длительность стадии мириды, а не возраст звезды), можно, рассматривая рис. 4, прийти к выводу, что к концу стадии мириды звезда все еще может содержать значительное количество технеция. Если мириды, как полагают, действительно превращаются в планетарные туманности, то, поскольку время жизни планетарных туманностей достаточно мало, есть все основания ожидать присутствия в них технеция.

Бюраканская астрофизическая
обсерватория

ON THE Tc CONTENT IN COOL GIANT STARS

A. A. AKOPYAN, Yu. K. MELIK-ALAVERDIAN

From an examination of the available data of Tc line intensities the Tc contents in cool giant stars are considered. The correlations between Tc abundances and some physical parameters of Mira stars are discussed.

ЛИТЕРАТУРА

1. P. W. Merrill, *Astrophys. J.*, 116, 21, 1952.
2. S. J. Little, I. R. Little—Marentin, W. H. Bauer, *Astron. J.*, 94, 981, 1987.
3. J. H. Cahn, S. P. Watt, *Astrophys. J.*, 221, 163, 1978.
4. F. Sanner, *Astrophys. J.*, 219, 538, 1978.
5. H. R. Johnson, A. P. Bernat, B. Krupp., *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 42, 501, 1980.
6. T. Tsuji, *Astron. and Astrophys.*, 62, 29, 1978.
7. К. Ленг, *Астрофизические формулы*, Мир, М., 1978.
8. R. H. Garstang, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 93, 641, 1981.
9. В. А. Амбарцумян, *Сообщ. Бюракан. обсерв.*, 13, 3, 1954.