

DOI: 10.54503/0571-7132-2022.65.1-63

КРАСНЫЕ ГИГАНТЫ ЕК Eri И OU And КАК ВЕРОЯТНЫЕ ПОТОМКИ МАГНИТНЫХ AP-ЗВЕЗД: ПОИСК АНОМАЛИЙ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

Л.С.ЛЮБИМКОВ¹, С.А.КОРОТИН¹, Д.В.ПЕТРОВ¹, Д.Б.ПОКЛАД¹,
Д.О.КУДРЯВЦЕВ², Д.Н.БАКЛАНОВА¹

Поступила 1 декабря 2021

Принята к печати 16 февраля 2022

Исследованы красные гиганты ЕК Eri и OU And с магнитными полями $B_{\max} = 99$ и 41 Гс соответственно, которые предположительно являются потомками магнитных Ар-звезд. Найденны их фундаментальные параметры и проанализирован химический состав. Определено содержание 17 элементов от лития ($Z=3$) до гафния ($Z=72$) для этих гигантов, а также для звезды сравнения β Gem (Поллукс). По линиям молекулы CN найдено содержание азота и отношение изотопов углерода $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$. Низкие отношения $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 17.3$ для ЕК Eri и 17.2 для β Gem доказывают, что эти гиганты прошли глубокое конвективное перемешивание в фазе FDU (First Dredge-Up). Для OU And величину $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ определить не удалось вследствие относительно быстрого вращения и повышенной эффективной температуры этой звезды, однако высокое значение отношения N/C (на 1.1 dex больше солнечного) может служить подтверждением того, что и этот гигант прошел фазу FDU. Анализ химического состава привел к важному выводу: у всех трех гигантов нет никаких аномалий в содержаниях тяжелых элементов; в частности, отсутствуют какие-либо избытки редкоземельных элементов, которые у магнитных Ар-звезд достигают 4 dex. Отсутствие такого избытка может быть следствием глубокого перемешивания в фазе FDU. Во всех трех случаях содержания углерода и азота показали ожидаемые аномалии для звезд этого типа: дефицит C от -0.3 до -0.6 dex и избыток N от +0.3 до +0.6 dex. Подтверждено предсказание теории о постоянстве суммы C+N+O в процессе эволюции: найденное для трех гигантов суммарное содержание $\log \varepsilon(\text{C} + \text{N} + \text{O}) = 8.96 - 8.98$ практически совпадает с начальным значением этой величины, конкретно со значением $\log \varepsilon(\text{C} + \text{N} + \text{O}) = 8.94$, полученным для Солнца и для ранних В-звезд ГП. Линия Li I 6707.76 Å была детектирована в спектрах всех трех звезд, показав содержание лития $\log \varepsilon(\text{Li}) = 0.7 - 1.5$, однако присутствие лития в атмосферах гигантов, прошедших фазу FDU, противоречит стандартной теории. Два наблюдаемых явления, неожиданных для красных гигантов после FDU, - наличие магнитного поля и присутствие лития в атмосфере можно объяснить в рамках одной гипотезы: захват красным гигантом планеты с массой в несколько масс Юпитера.

Ключевые слова: красные гиганты; химический состав; эволюция

1. *Введение.* Активное исследование магнитных Ар- и Вр-звезд началось во второй половине прошлого века, конкретно в 1960-80 гг. Было установлено, что эти звезды находятся на стадии Главной последовательности (ГП) и обладают рядом отличительных особенностей, среди которых для нашей работы особенно интересны следующие: 1) они имеют сильные магнитные поля, достигающие 30 тысяч Гс; 2) их химический состав демонстрирует сильные

аномалии. Избытки химических элементов, как оказалось, в среднем растут с ростом атомного номера Z , так что для редкоземельных элементов (La, Ce, Pr и др.) они могут составлять 4 dex, а для наиболее тяжелых элементов, таких как Pt, Au, Hg, вплоть до U ($Z=92$), они достигают 5-6 dex (см., например, [1,2]). Отметим, что аналогичный тренд в аномалиях содержаний с ростом Z был найден у других химически пекулярных А- и В-звезд, не показывающих заметных магнитных полей, в частности, у Am-звезд и у звезд типа HgMn.

Следует отметить, что у магнитных Ар- и Вр-звезд были найдены и другие характерные особенности. Например, было обнаружено пятнистое распределение элементов по поверхности звезд, а также вертикальная стратификация элементов в атмосфере. Однако эти особенности, интересные сами по себе, не имеют прямого отношения к теме настоящей работы.

Чтобы объяснить наблюдаемые химические аномалии у звезд указанных типов, была выдвинута гипотеза диффузии элементов в поверхностных слоях звезды под действием двух противоположно направленных сил: гравитации и давления излучения. В магнитных Ар-звездах добавлялось еще влияние магнитного поля. Предполагалось, что это чисто поверхностное явление, не затрагивающее внутренние слои звезды.

После завершения стадии ГП магнитные Ар-звезды (их массы составляют $2-3 M_{\odot}$) переходят в стадию красных гигантов, значительно увеличиваясь в размерах и понижая скорость вращения. Более того, при достижении определенной эффективной температуры они испытывают глубокое конвективное перемешивание (фаза First Dredge-Up, или FDU), которое приводит к изменениям химического состава звездной атмосферы. Возникают два вопроса. Во-первых, сохраняются ли у магнитных Ар-звезд после перехода в стадию красных гигантов какие-то остаточные магнитные поля? Во-вторых, сохраняются ли у них какие-либо остаточные аномалии химического состава?

Что касается первого вопроса, то к нему имеет прямое отношение работа [3], где были исследованы магнитные поля 48 красных гигантов. Гиганты EK Eri и OU And с наиболее сильными магнитными полями (у них $B_{\max} = 99$ и 41 Гс соответственно) были признаны здесь вероятными потомками магнитных Ар-звезд. В таком случае мы вправе применить к ним второй вопрос, поставленный выше: сохранились ли у них какие-либо остаточные аномалии химического состава? Получение ответа на этот вопрос было главной целью настоящей работы. Особое внимание было уделено поиску возможных избытков тяжелых, в том числе редкоземельных элементов.

Нами найдены фундаментальные параметры гигантов EK Eri и OU And и проанализирован их химический состав. Определены содержания 17 элементов от лития ($Z=3$) до гафния ($Z=72$). По той же методике был определен химический состав звезды сравнения, К-гиганта β Gem (Поллукс).

Такой выбор объяснялся тем, что для β Gem ранее было найдено низкое отношение изотопов углерода $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 18$ [4], которое однозначно свидетельствовало о том, что этот гигант прошел глубокое перемешивание в фазе FDU. Таким образом, для него *a priori* можно было ожидать, что какие-либо систематические избытки тяжелых элементов (если они и были до FDU) сейчас отсутствуют.

Содержания большинства элементов мы определили путем расчета синтетических спектров и их подгонки к наблюдаемым спектрам звезд. Использование эквивалентных ширин имело место только при определении содержания железа, а также параметра микротурбулентности V_t по линиям FeI. Мы использовали инфракрасные линии молекулы CN, чтобы найти содержание азота, а также отношение изотопов углерода $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, которое рассматривается как индикатор эволюционного статуса красных гигантов. Для ряда элементов анализ содержания был выполнен при отказе от условия ЛТР (локальное термодинамическое равновесие).

Наши вычисления были основаны на моделях атмосфер, рассчитанных по известной программе Куруца (Kurucz's code) ATLAS9 с использованием новых значений ODF [5]. Атомные данные, необходимые для расчетов линий исследуемых элементов, а также линий других элементов, участвующих в вычислении синтетических спектров, были взяты из базы данных VALD3 [6].

Отметим, что для звезды сравнения β Gem мы привлекли некоторые данные, полученные в недавней работе [7], где этот гигант был исследован в числе 9 близких K-гигантов с планетами. Методика, примененная в [7], была частично использована нами в настоящей работе.

2. *Некоторые данные об исследованных гигантах.* В табл.1 приведены некоторые данные о гигантах EK Eri, OU And и β Gem, включая их номера HR и HD, видимую звездную величину и спектральный подкласс. Указанные здесь величины максимального магнитного поля B_{max} и периода вращения P_{rot} взяты из упомянутой выше работы [3], а значения наблюдаемой скорости вращения $v \sin i$ - из работы [8]. Параллаксы π и соответствующие расстояния $d = 1/\pi$ для звезд EK Eri и OU And основаны на данных каталога

Таблица 1

НЕКОТОРЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОГРАММНЫХ ГИГАНТОВ
EK Eri, OU And И ЗВЕЗДЫ СРАВНЕНИЯ β Gem

Звезда	HR	HD	m_v , mag	Sp	B_{max} , Гс	P_{rot} , дни	$v \sin i$, км/с	π , mas	d , пк
EK Eri	1362	27536	6.15	K0 III	98.6	308.8	1.4	15.58	64
OU And	9024	223460	5.90	G1 III	41.4	24.2	22.5	7.17	139
β Gem	2990	62509	1.14	K0 III	0.7	590	2.8	96.54	10

Gaia DR2 [9]; в то же время для очень близкой звезды β Gem с большим параллаксом, которая отсутствует в списке Gaia DR2, мы, как и в [7], основывались на данных Hipparcos [10].

Следует отметить, что магнитное поле звезды OU And было исследовано также в [11], где обнаружены синусоидальные вариации продольного магнитного поля с периодом вращения 24.2 сут, причем максимум поля составлял около 40 Гс, в полном согласии с оценкой, приведенной в табл.1.

В табл.1 заслуживает внимания слабое магнитное поле $B_{\max} = 0.7$ Гс у гиганта β Gem, который, как отмечено выше, прошел глубокое перемешивание в фазе FDU. Следует отметить, что ранее слабое поле около 1 Гс было найдено у β Gem в [12]; при этом были обнаружены регулярные вариации поля. Примечательно, что около β Gem была открыта планета с массой $m \geq 2.6 M_J$, где M_J - масса Юпитера [13].

В табл.1 обращает на себя внимание еще одна особенность, касающаяся звезды OU And, а именно: ее относительно высокая скорость вращения $v \sin i = 22.5$ км/с против малой скорости вращения 1.4 км/с у EK Eri и 2.8 км/с у β Gem. Эта особенность гиганта OU And создает определенные затруднения при анализе его спектра, так что содержания элементов для OU And определяются с меньшей точностью, чем для EK Eri и β Gem.

3. Спектральные наблюдения. Исследования химического состава гигантов EK Eri и OU And изначально базировались на спектральных наблюдениях, выполненных 18 и 19 октября 2019г. на эшелле-спектрографе НЭС 6-м телескопа БТА САО РАН. Всего было получено по 4 спектра для каждой звезды со спектральным разрешением $R \sim 60000$ в диапазоне длин волн от 3985 до 6885 Å и отношением сигнал/шум $S/N = 90 - 170$ в зависимости от погодных условий.

Обработка спектров была выполнена по стандартной методике с помощью пакета IRAF [14]. Следуя общепринятой практике, мы сложили полученные для каждой звезды спектры, чтобы уменьшить случайные шумы и повысить отношение "сигнал/шум".

К сожалению, имеющиеся у нас спектры БТА не охватывали инфракрасный диапазон длин волн от 7000 до 10000 Å, в который попадают важные для нашего анализа линии некоторых элементов (например, линии CI и OI), а также линии молекулы CN, примененные нами при определении содержания азота и отношения изотопов углерода $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$. Поэтому при анализе химического состава гигантов EK Eri и OU And, а также звезды сравнения β Gem, мы использовали также спектры звезд из базы данных PolarBase, полученные на спектрографе NARVAL [15]. Здесь $R = 65000$ и $S/N > 350$; диапазон длин волн составляет 3700-10480 Å. Отметим, что содержания элементов, полученные

по спектрам NARVAL в видимой области, хорошо согласуются с результатами, найденными по спектрам БТА.

4. *Фундаментальные параметры.* Эффективную температуру T_{eff} и ускорение силы тяжести g (обычно указывают величину $\log g$) относят к фундаментальным (или базисным) параметрам звезды. На них основана модель атмосферы звезды, которая применяется в последующем анализе содержания химических элементов. С этими двумя параметрами тесно связаны еще четыре фундаментальные характеристики каждой звезды: масса M , радиус R , светимость L и возраст t .

Для Поллукса мы использовали эффективную температуру T_{eff} , найденную в работе [7]. Что касается звезд EK Eri и OU And, то для них приняты значения T_{eff} , полученные в проекте Gaia [16].

Другой важный фундаментальный параметр, ускорение силы тяжести в атмосфере звезды $\log g$, мы находили по тригонометрическому параллаксу π методом, описанным в работе [17]; эффективная температура T_{eff} при этом считается заданной. Благодаря высокой точности современных значений π , данный метод определения $\log g$ можно считать сегодня одним из самых точных для относительно близких звезд.

Наша методика определения $\log g$, основанная на применении параллакса π , включает использование эволюционных треков, и это обстоятельство позволяет одновременно с величиной $\log g$ определять массу звезды M . Для определения параметров $\log g$ и M всех трех звезд были применены эволюционные расчеты MIST [18]. Согласно нашим оценкам, ошибки определения величин $\log g$ и M следующие: ± 0.07 dex для $\log g$ и ± 0.2 для M/M_{\odot} .

Как видно из табл.2, наши значения T_{eff} и $\log g$ для трех рассмотренных гигантов очень хорошо согласуются с величинами, полученными в работе [8], что подтверждает надежность использованных нами значений T_{eff} и $\log g$.

Принятые в данной работе фундаментальные параметры трех гигантов,

Таблица 2

СРАВНЕНИЕ НАШИХ ЗНАЧЕНИЙ T_{eff} И $\log g$ ДЛЯ ТРЕХ ГИГАНТОВ С ДАННЫМИ ИЗ РАБОТЫ [8]

Звезда	T_{eff}	$\log g$	Источник
EK Eri	5025 ± 50 5058	3.26 ± 0.07 3.2	Настоящая работа [8]
OU And	5330 ± 50 5360	2.83 ± 0.07 2.8	Настоящая работа [8]
β Gem	4830 ± 50 4842	2.80 ± 0.07 2.9	Настоящая работа [8]

Таблица 3

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТРЕХ ГИГАНТОВ

Звезда	T_{eff}	$\log g$	M / M_{\odot}	$\log L / L_{\odot}$	R / R_{\odot}	$t, 10^9 \text{ лет}$
EK Eri	5025	3.26	1.8	1.19	5.2	1.43
OU And	5330	2.83	2.9	1.94	10.9	0.40
β Gem	4830	2.80	2.1	1.65	9.5	1.00

включая их эффективную температуру T_{eff} , ускорение силы тяжести $\log g$, массу M , радиус R , светимость L и возраст t , представлены в табл.3. Здесь величины M , R и L даны по отношению к солнечным значениям. Следует отметить, что для Поллукса переход от эволюционных треков [19], примененных в работе [7], к новым трекам MIST [18], не привел к заметным изменениям в эволюционных параметрах. Например, значение $\log g$ уменьшилось только на 0.05 dex, значение M/M_{\odot} понизилось на 0.2, а оценки радиуса R и светимости L остались прежними.

Следует отметить, что в работе [7] для β Gem (в числе 9 близких К-гигантов с планетами) были определены содержания Fe, Li, C и O; при этом были использованы линии нейтральных атомов FeI, LiI, CI и OI. Такие линии, как известно, в спектрах холодных звезд весьма чувствительны к T_{eff} , но мало чувствительны к $\log g$. Значение T_{eff} для β Gem в данной работе не изменилось относительно [7], а значение $\log g$ изменилось очень слабо,

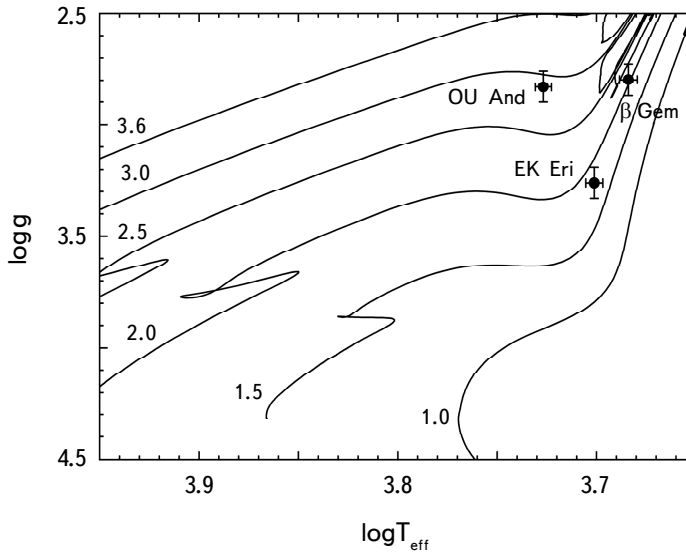


Рис.1. Диаграмма $T_{\text{eff}} - \log g$ для программных гигантов. Наряду с положениями трех исследованных звезд, здесь показаны эволюционные треки MIST [18] для масс M / M_{\odot} от 1.0 до 3.6.

поэтому содержания Fe, Li (ЛТР), C и O, найденные в [7] для этой звезды, остаются без изменений.

На рис.1 представлена диаграмма $T_{\text{eff}} - \log g$, на которой показаны положения звезд EK Eri, OU And и β Gem, а также несколько эволюционных треков MIST [18]. Из этой диаграммы, иллюстрирующей эволюционный статус рассмотренных гигантов, можно сделать предварительный вывод, что гиганты β Gem и EK Eri находятся на Ветви Красных Гигантов (ВКГ), а звезда OU And, вероятно, еще не достигла стадии ВКГ. Ниже мы обсудим эволюционный статус этих гигантов более детально, опираясь на полученные данные об их химическом составе.

5. Анализ линий FeI: содержание железа и параметр микро-турбулентности. В спектрах красных гигантов наблюдается большое число линий FeI, которые традиционно используются для определения двух важных параметров: содержания железа $\log \varepsilon(\text{Fe})$ и параметра микротурбулентности V_t . Отметим, что содержание элемента $\log \varepsilon(\text{Fe})$ здесь и далее дается в стандартной логарифмической шкале, где для водорода принято $\log \varepsilon(\text{H}) = 12.00$. Из содержания железа $\log \varepsilon(\text{Fe})$ выводится другой важный параметр - индекс металличности $[Fe/H] = \log \varepsilon(\text{Fe}) - \log \varepsilon_{\odot}(\text{Fe})$, где $\log \varepsilon_{\odot}(\text{Fe})$ - содержание железа в атмосфере Солнца. Мы приняли для Солнца $\log \varepsilon_{\odot}(\text{Fe}) = 7.48$ [20].

Параметр микротурбулентности V_t необходим для анализа содержаний других элементов, в то время как индекс металличности звезды $[Fe/H]$ должен учитываться при построении ее модели атмосферы. Как известно, индекс $[Fe/H]$ интересен также с точки зрения позиции звезды в Галактике, т.е. ее принадлежности к тонкому диску, толстому диску или гало.

Детальный анализ линий FeI был выполнен в [21] для трех K-гигантов с планетами, включая β Gem. Первоначально анализ включал 101 "золотую линию" ("golden lines") из списка, отобранного в работе [22]. Была показана существенная роль потенциала возбуждения E_l нижнего уровня линий при определении величин $[Fe/H]$ и V_t ; неучет этого эффекта в предыдущих работах мог приводить к неоднозначности в определении параметров $[Fe/H]$ и V_t . В работе [21] были даны рекомендации по выбору линий из упомянутого списка "золотых линий"; этим рекомендациям мы следовали как в работе [7] при исследовании девяти K-гигантов с планетами, так и в настоящей работе.

Мы использовали 23 линии FeI в случае EK Eri и β Gem, и 16 линий в случае OU And, где анализ линий FeI был затруднен вследствие более высокой скорости вращения. В спектрах звезд анализировали эквивалентную ширину W линий FeI, причем измерения наблюдаемых значений W были выполнены автоматическим методом с помощью нашей программы EWISS [21].

Как и в работе [7], мы оценили роль отклонений от ЛТР в линиях FeI. Используя расчеты [23], внесены не-ЛТР поправки к найденным содержаниям $\log \epsilon(\text{Fe})$; они оказались очень малыми как для индивидуальных линий FeI, так и для средних содержаний Fe (менее 0.02 dex). Подтвердился вывод работы [7]: для красных гигантов с нормальной металличностью не-ЛТР поправки для линий FeI столь малы, что их можно не принимать во внимание.

Определение параметра V_i выполнялось по стандартному методу: подбиралось такое значение V_i , при котором отсутствовал тренд индивидуальных содержаний $\log \epsilon(\text{Fe})$ с ростом эквивалентных ширин W линий FeI. Иллюстрацией этого метода для звезд EK Eri и OU And служит рис.2.

Полученные величины $\log \epsilon(\text{Fe})$ и V_i представлены в табл.4. Для β Gem приведены значения $\log \epsilon(\text{Fe})$ и V_i , найденные в [7]. Для EK Eri и OU And в табл.4 указаны значения, найденные нами по спектрам БТА. Отметим, что в случае OU And мы использовали для сравнения также эквивалентные ширины линий FeI, опубликованные в работе [11], и получили при этом практически

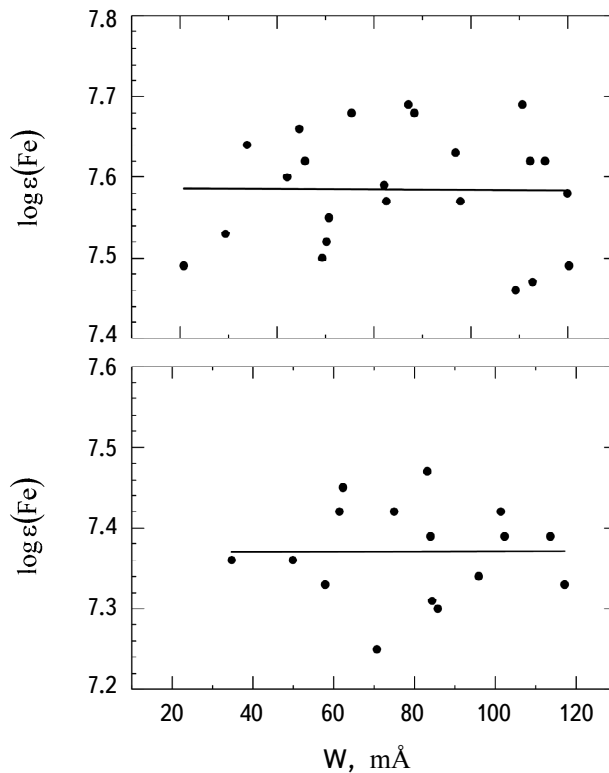


Рис.2. Зависимость содержания железа от эквивалентной ширины W линий FeI, иллюстрирующая определение величин $\log \epsilon(\text{Fe})$ и V_i для гигантов EK Eri и OU And. Прямые проведены методом наименьших квадратов.

Таблица 4

СОДЕРЖАНИЕ ЖЕЛЕЗА И ПАРАМЕТР МИКРОТУРБУЛЕНТНОСТИ
В АТМОСФЕРАХ ТРЕХ ГИГАНТОВ

Звезда	Число линий FeI	$\log \epsilon(\text{Fe})$	$[\text{Fe}/\text{H}]$	V_t , км/с
EK Eri	23	7.58 ± 0.08	0.10 ± 0.08	1.2
OU And	16	7.37 ± 0.06	-0.11 ± 0.06	1.6
β Gem	23	7.51 ± 0.05	0.03 ± 0.05	1.4

те же результаты, а именно: $\log \epsilon(\text{Fe}) = 7.34$ и $V_t = 1.7$ км/с.

Из табл.4 видно, что три рассмотренных звезды имеют нормальную металличность в области значений $[\text{Fe}/\text{H}] = \pm 0.1$ dex и малый параметр микротурбулентности $V_t \sim 1\text{--}2$ км/с, типичный для красных гигантов.

6. *Содержания легких элементов Li, C, N и O.* Эти легкие элементы часто называют ключевыми (key elements), имея в виду их ключевую роль в звездной эволюции. Содержания трех элементов, Li, C и O, определялись нами по атомарным линиям LiI, CI и OI, при этом учитывались отклонения от ЛТР. В случае азота, из-за отсутствия атомарных линий NI в спектрах холодных звезд, мы использовали линии молекулы CN. Кроме содержания N, по линиям CN определяли также отношение изотопов углерода $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$.

6.1. *Литий.* Литий является одним из самых чувствительных индикаторов звездной эволюции (см., например, обзоры [24,25]). Наше определение содержания лития основано на анализе резонансного дублета LiI 6707.76 Å. Варьируя содержание лития, вычисленный синтетический спектр в области этой линии мы подгоняли к наблюдаемому спектру. Использовались спектры, полученные на БТА.

Следуя методике, примененной в [7], выполнялись расчеты синтетических спектров в области линии LiI 6707.76 Å с помощью программы SYNTH3 [26]. Атомные данные для линий в данной области брались из списков [27] и [28]. В результате были получены содержания лития $\log \epsilon(\text{Li})$ в приближении ЛТР. Далее встал вопрос о поправках Δ_{NLTE} , учитывающих отклонения от ЛТР.

Такие не-ЛТР поправки к найденным ЛТР-содержаниям лития для 9 К-гигантов в работе [7] составили 0.2–0.4 dex в зависимости от эффективной температуры T_{eff} . Эти значения были основаны на не-ЛТР расчетах [29]. Однако недавние расчеты [30] привели к существенному пересмотру предыдущих результатов: не-ЛТР поправки оказались не столь значимыми. В частности, для наших трех гигантов они составили всего лишь $-(0.02\text{--}0.03)$ dex. В табл.5 мы привели как ЛТР, так и не-ЛТР содержания лития для трех гигантов.

Для сравнения отметим, что современная оценка содержания Li в атмосфере Солнца составляет $\log \varepsilon_{\odot}(\text{Li}) = 0.96 \pm 0.05$ [30].

Таблица 5

СОДЕРЖАНИЕ ЛИТИЯ В АТМОСФЕРАХ ТРЕХ ГИГАНТОВ

Звезда	$\log \varepsilon(\text{Li})$ ЛТР	не-ЛТР поправка	$\log \varepsilon(\text{Li})$ не-ЛТР
ЭК Eri	1.10 ± 0.08	-0.03	1.07 ± 0.08
OU And	1.55 ± 0.09	-0.03	1.52 ± 0.09
β Gem	0.73 ± 0.06	-0.02	0.72 ± 0.06

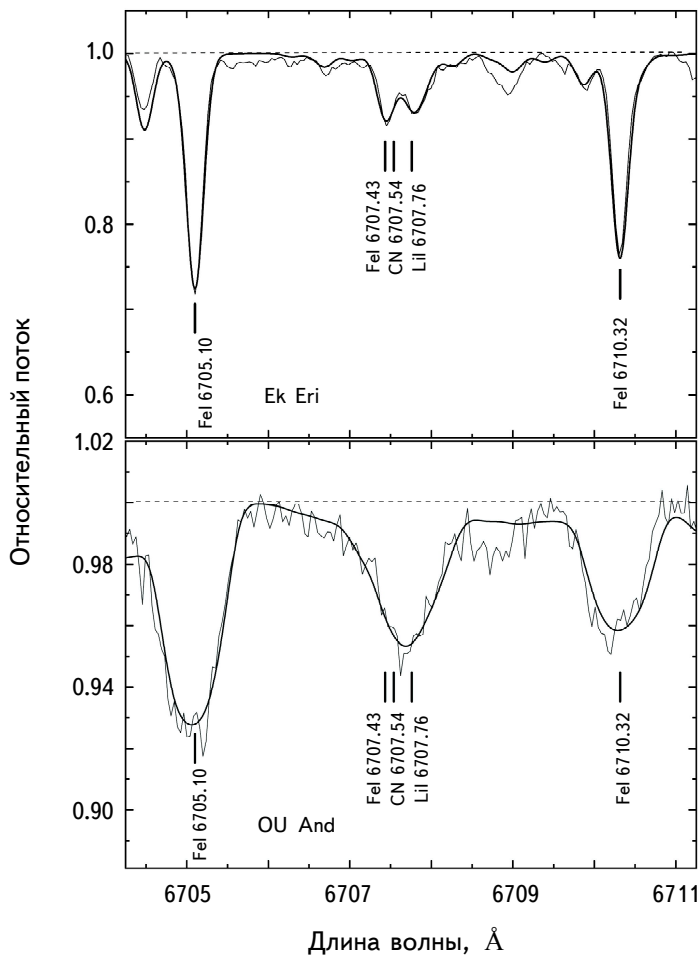


Рис.3. Сравнение синтетического и наблюдаемого спектра в области линии LiI 6707.78 Å для гигантов EK Eri и OU And. Толстая линия - синтетический спектр, тонкая линия - наблюдаемый спектр.

Сравнение наблюдаемого и синтетического спектра для гигантов EK Eri и OU And представлено на рис.3: аналогичный рисунок для β Gem был приведен в [7]. Важно, что линия лития 6707.76 Å видна в спектрах всех трех гигантов. Сам этот факт, а также найденные содержания лития требуют дальнейшего обсуждения.

6.2. Углерод и кислород. Определение содержаний этих двух элементов было проведено при отказе от предположения о ЛТР. Методика не-ЛТР расчетов описана в следующих работах: линии CI - [31], линии OI - [32]. Не-ЛТР анализ содержаний C и O для звезды β Gem был выполнен в работе [7] в числе 9 K-гигантов с планетами. В частности, в [7] был приведен список линий CI и OI, которые использовались в расчетах. В этом списке, кроме нескольких линий в видимой области спектра, содержатся линии в инфракрасной области, включая линии CI до 9658.4 Å, а также известный ИК триплет OI 7771-7775 Å.

Наше определение содержаний C и O основано на анализе спектров NARVAL, так как они охватывают как видимую, так и ИК области спектра. Отметим, что в случае OU And нам удалось использовать только ИК линии CI и OI. Однако для линий в видимой области (в случае EK Eri и β Gem) мы применили также спектры БТА; отметим, что найденные по ним содержания C и O хорошо согласуются с результатами, полученными по спектрам NARVAL.

Мы подгоняли синтетические спектры, вычисленные в области исследуемых линий CI и OI, к наблюдаемым спектрам, добиваясь наилучшего согласия путем варьирования содержаний C и O. Полученные не-ЛТР содержания $\log \epsilon(C)$ и $\log \epsilon(O)$ приведены в табл.6. Указанные здесь ошибки определения величин $\log \epsilon(C)$ и $\log \epsilon(O)$ учитывают как оцененную нами неопределенность подгонки, так и разброс в значениях $\log \epsilon(C)$ или $\log \epsilon(O)$ между индивидуальными линиями. Обращают на себя внимание относительно большие ошибки определения $\log \epsilon(C)$ и $\log \epsilon(O)$ в случае звезды OU And; они

Таблица 6

ПОЛУЧЕННЫЕ ДАННЫЕ ПО CNO-ЭЛЕМЕНТАМ

Величина	EK Eri	OU And	β Gem
$\log \epsilon(C)$	8.15 ± 0.10	7.90 ± 0.25	8.12 ± 0.05
$\log \epsilon(N)$	8.17 ± 0.12	8.40 ± 0.26	8.42 ± 0.07
$\log \epsilon(O)$	8.81 ± 0.10	8.80 ± 0.18	8.71 ± 0.05
$\log \epsilon(C + N + O)$	8.97 ± 0.19	8.98 ± 0.40	8.96 ± 0.10
[N/C]	0.64 ± 0.16	1.12 ± 0.36	0.92 ± 0.09
[N/O]	0.22 ± 0.16	0.40 ± 0.32	0.57 ± 0.09
$^{12}C/^{13}C$	17.3 ± 1.7	—	17.2 ± 1.1

объясняются сравнительно высокой скоростью вращения этого гиганта, что снижает точность определения содержаний.

Наши не-ЛТР расчеты позволили оценить, насколько велики не-ЛТР поправки Δ_{NLTE} в содержаниях С и О для рассмотренных гигантов. Эти поправки существенно различаются для линий в видимой и ИК областях. В частности, для линий СІ в видимой области они малы и составляют ~ -0.05 dex, в то время как для таких линий в ИК диапазоне значения Δ_{NLTE} варьируются от -0.17 до -0.45 dex. Ясно, что описать весь ансамбль используемых линий СІ при едином содержании С в приближении ЛТР невозможно; это удастся сделать только при отказе от условия ЛТР.

Для линий ОІ не-ЛТР поправки Δ_{NLTE} также различаются, если сравнивать линии в видимой и ИК областях. Наш анализ показал, что использованные нами запрещенные линии ОІ в красной области не подвержены влиянию не-ЛТР эффектов, в то время как для линий ИК-триплета $7771\text{-}7774 \text{ \AA}$ значения Δ_{NLTE} меняются от -0.15 до -0.30 dex.

6.3. Анализ линий молекулы CN: содержание азота и отношение изотопов углерода $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$. В спектрах холодных звезд, подобных нашим трем гигантам, линии NІ становятся слишком слабыми, поэтому определение содержания азота мы основывали на анализе линий молекулы CN. По тем же линиям определяли отношение изотопов углерода $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$.

При выборе линий CN мы следовали работе [33], в которой анализ отношения $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ был проведен для α Aur (Капелла). Нами рассматривался спектральный интервал $7985\text{-}8025 \text{ \AA}$, в котором наблюдается ряд молекулярных линий ^{12}CN , содержащих изотоп ^{12}C , а также мультиплет ^{13}CN 8004.7 \AA с изотопом ^{13}C . В этом интервале нами рассчитывался синтетический спектр звезды, который затем подгонялся к наблюдаемому спектру. При такой подгонке содержание углерода было фиксировано (оно уже было определено нами ранее), а содержание азота варьировалось.

Расчет синтетического спектра проводился с применением двух программ: программы SYNTH3, которая использовалась обычно как первое приближение, и программы TURBOSPECTRUM [34], оказавшейся весьма подходящей для определения отношения изотопов $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ (здесь величину $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ можно было задавать в расчетах как исходный параметр).

Список атомных и молекулярных линий для первой программы был взят из базы данных VALD3; во втором случае использовались списки линий программного пакета TURBOSPECTRUM [35,36].

На рис.4 приведены как наблюдаемые, так и синтетические спектры звезд β Gem и EK Eri в области $7998\text{-}8006 \text{ \AA}$, содержащей молекулярную полосу ^{13}CN $8004.56\text{-}8004.80 \text{ \AA}$ с изотопом ^{13}C . Обращает на себя внимание разная

глубина линий молекулы CN на наблюдаемых спектрах двух звезд, что объясняется различием в их эффективных температурах T_{eff} (см. табл.3). Действительно, значение T_{eff} у EK Eri почти на 200 К выше, чем у β Gem, поэтому молекулярные линии, весьма чувствительные к T_{eff} , в спектре EK Eri оказались заметно мельче, чем в спектре β Gem; это относится и к депрессии ^{13}CN 8004.56-8004.80 Å.

Еще более важное различие в температурах T_{eff} оказалось в случае OU And. У этого гиганта значение T_{eff} примерно на 300 К больше, чем у EK Eri и на 500 К выше, чем у β Gem. На вид спектра также влияет повышенная

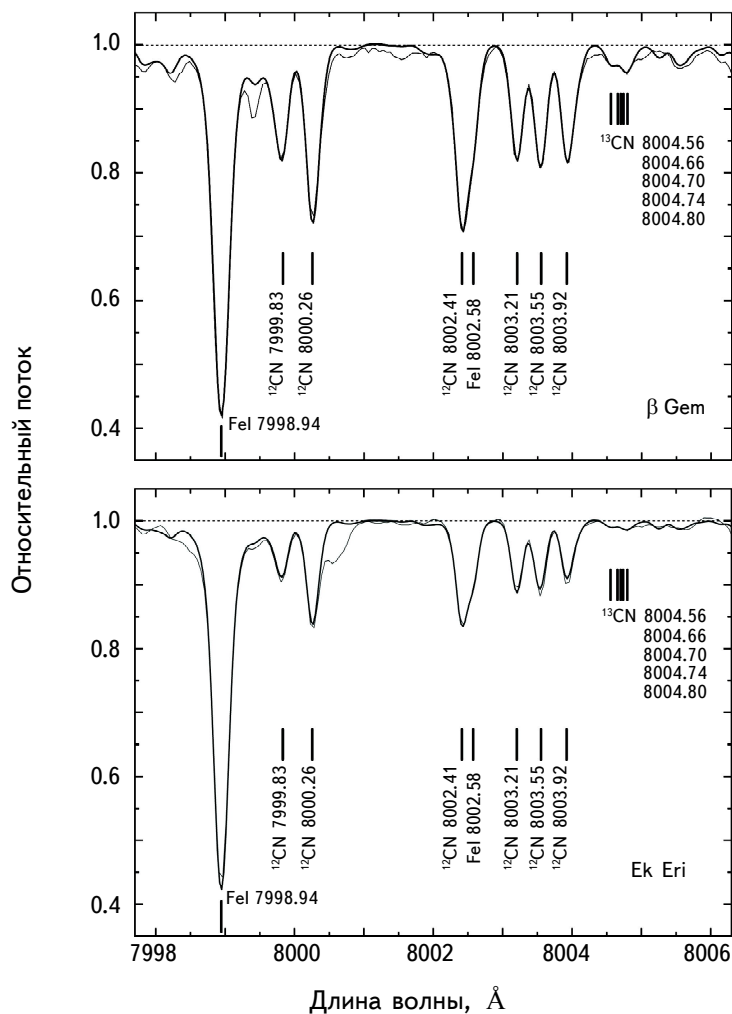


Рис.4. Участок спектра с линиями CN, использованными для определения содержания азота и отношения $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ для гигантов β Gem и EK Eri. Толстая линия - синтетический спектр, тонкая линия - наблюдаемый спектр.

скорость вращения у OU And. В результате депрессия ^{13}CN 8004.56-8004.80 Å в спектре этого гиганта становится слишком слабой, поэтому оценить для него величину $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ не представляется возможным.

Найденное содержание азота $\log \varepsilon(\text{N})$ и отношение $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ приведены в табл.6, где собраны все полученные нами данные по CNO-элементам. Из таблицы видно, что азот у всех трех гигантов показал повышенное содержание относительно солнечного значения $\log \varepsilon_{\odot}(\text{N}) = 7.85$, а пониженные значения $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 17.2-17.3$ у β Gem и ЕК Егi (у Солнца $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 89$) доказывают, что эти два гиганта прошли фазу FDU. Более детальное обсуждение данных из табл.6 представлено ниже.

Во *Введении* мы отметили, что ранее для β Gem было найдено отношение изотопов углерода $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 18$. Это значение было получено иным, более простым методом: по эквивалентным ширинам линий ^{12}CN и ^{13}CN , а не путем подгонки синтетического спектра к наблюдаемому спектру звезды, как в нашей работе. Тем не менее, эта более ранняя оценка $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ для β Gem очень хорошо согласуется с нашим новым значением $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 17.2$.

7. Содержания тяжелых элементов от Cu до Hf. К тяжелым мы относим химические элементы тяжелее железа. Всего нами было рассмотрено 12 таких элементов, 8 из них (от La до Er) относятся к редким землям (Rare Earths, далее RE), три элемента легче RE (Cu, Rb и Ba) и один тяжелее RE (Hf). Как уже отмечалось, у магнитных Ap-звезд наблюдается избыток редкоземельных элементов до 4dex, и мы пытались обнаружить возможные остатки этого избытка у гигантов ЕК Егi и OU And.

Чтобы проконтролировать наши расчеты, мы определили содержания рассмотренных элементов также для Солнца (по тем же линиям). Модель атмосферы Солнца была рассчитана по той же методике, что и для наших программных гигантов (см. *Введение*). Наблюдаемый спектр Солнца мы

Таблица 7

**НАШИ ОЦЕНКИ СОДЕРЖАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ $\log \varepsilon(\text{El})$ ДЛЯ
СОЛНЦА В СРАВНЕНИИ С ДАННЫМИ [20]**

Z	Элемент	Наши данные	[20]	Z	Элемент	Наши данные	[20]
6	C	8.43 ± 0.05	8.47 ± 0.06	60	Nd	1.44 ± 0.05	1.42 ± 0.04
8	O	8.71 ± 0.04	8.71 ± 0.04	62	Sm	1.00 ± 0.06	0.95 ± 0.04
29	Cu	4.25 ± 0.05	4.18 ± 0.05	63	Eu	0.51 ± 0.05	0.52 ± 0.04
37	Rb	2.35 ± 0.05	2.47 ± 0.07	64	Gd	1.07 ± 0.06	1.08 ± 0.04
56	Ba	2.17 ± 0.03	2.25 ± 0.07	66	Dy	1.11 ± 0.05	1.10 ± 0.04
57	La	1.11 ± 0.05	1.11 ± 0.04	68	Er	0.92 ± 0.06	0.93 ± 0.05
59	Pr	0.72 ± 0.06	0.72 ± 0.04	72	Hf	0.88 ± 0.06	0.85 ± 0.05

нашли в известном атласе спектра Солнца как звезды [37]. Как видно из табл.7, наши солнечные содержания хорошо согласуются с данными, приведенными в недавней компиляции [20].

Как уже отмечалось, анализ содержания базировался на подгонке синтетического спектра к наблюдаемому спектру звезды. Спектры NARVAL использовались как основной источник наблюдательного материала; спектры БТА также применялись для тех линий в видимой области, которые можно было анализировать достаточно уверенно. Вновь отметим, что найденные по спектрам БТА содержания, хорошо согласуются с результатами, полученными по спектрам NARVAL.

Рассмотрим наш анализ по отдельным элементам.

7.1. Медь, рубидий и барий. Содержания этих трех элементов были определены при отказе от условия ЛТР. Методика таких не-ЛТР расчетов описана в следующих работах: линии CuI - [38]; линии RbI - [39]; линии BaII - [40].

Содержание меди получено по 7 линиям CuI для EK Eri и β Gem и по 4 линиям для OU And. Содержание рубидия найдено по 2 резонансным линиям RbI для EK Eri и β Gem, в то время как для OU And содержание Rb оценить не удалось, так как линии RbI в спектре этой звезды слишком слабы из-за повышенной скорости вращения и частично из-за более высокой температуры T_{eff} относительно двух других звезд. Содержание бария для всех трех гигантов получено по 3 линиям BaII, причем все 3 линии в спектре каждой звезды описываются примерно одним содержанием бария.

Наши расчеты показали, что не-ЛТР поправки Δ_{NLTE} для линий CuI варьируются от линии к линии в диапазоне от 0.0 до +0.25 dex. Значения Δ_{NLTE} для линий RbI составляют -(0.05-0.07) dex и для линий BaII они тоже невелики: -(0.03-0.08) dex.

7.2. Редкоземельные элементы и гафний. При анализе редких земель (RE) и гафния мы применили ЛТР-подход. При подборе линий для анализа были использованы следующие работы, в которых содержания указанных элементов определялись для Солнца: LaII и EuII - [41]; GdII - [42]; PrII и DyII - [43]; NdII - [44]; SmII - [45]; ErII - [46]; HfII - [47].

Число рассмотренных линий зависело от конкретного элемента. Например, содержание неодима определено по 18 линиям NdII в случае EK Eri и β Gem и по 12 линиям в случае OU And; это было максимальное количество использованных линий в данной группе элементов. С другой стороны, для празеодима нашлись только 3 подходящих линии PrII в случае EK Eri и β Gem, а для OU And содержание Pr определить не удалось из-за слабости линий PrII в спектре этой звезды (причина все та же - относительно быстрое

вращение). По той же причине не удалось оценить для OU And также содержания Gd, Er и Hf.

В расчетах линий некоторых элементов (La, Pr и Eu) была учтена сверхтонкая структура атомных уровней; необходимые данные были взяты из упоминавшейся базы данных VALD3. В частности, все 6 использованных нами линий EuII имеют выраженную сверхтонкую структуру (по 30-40 компонентов для каждой линии). Если игнорировать этот эффект, невозможно воспроизвести в расчетах наблюдаемые асимметричные профили линий EuII.

Возникает вопрос: возможно ли для наших гигантов определение содержаний сверхтяжелых элементов, таких как Ir, Pt, Au или Pb? Известно, что в спектрах магнитных Ар-звезд эти элементы наблюдаются и показывают большие избытки (до 5-6 dex). Ответ на поставленный вопрос дают работы по Солнцу: где содержания указанных элементов оценивались обычно только по одной линии с длиной волны около 3100-3200 Å (для свинца по линии Pb I 3683 Å) и к тому же имеет место сильное блендирование. В использованных нами спектрах эта область отсутствует, т.е. нужны специальные наблюдения программных звезд в синей части спектра.

8. Химический состав. Обсуждение. Найденные нами содержания

Таблица 8

СОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ $\log \epsilon(\text{El})$ В АТМОСФЕРАХ ТРЕХ ГИГАНТОВ В СРАВНЕНИИ С ДАННЫМИ ДЛЯ СОЛНЦА [20]

Z	Элемент	EK Eri	OU And	β Gem	Солнце
3	Li	1.07±0.08	1.52±0.09	0.72±0.06	0.96±0.05 ¹
6	C	8.15±0.10	7.90±0.25	8.12±0.05	8.47±0.06
7	N	8.17±0.12	8.40±0.26	8.42±0.07	7.85±0.12
8	O	8.81±0.10	8.80±0.18	8.71±0.05	8.71±0.04
26	Fe	7.58±0.08	7.37±0.06	7.51±0.05	7.48±0.04
29	Cu	4.10±0.10	4.00±0.18	4.30±0.06	4.18±0.05
37	Rb	2.36±0.08	—	2.39±0.06	2.47±0.07
56	Ba	2.39±0.05	2.44±0.15	2.19±0.06	2.25±0.07
57	La	1.12±0.09	0.96±0.15	1.15±0.07	1.11±0.04
59	Pr	0.68±0.07	—	0.71±0.06	0.72±0.04
60	Nd	1.45±0.08	1.55±0.12	1.51±0.06	1.42±0.04
62	Sm	0.96±0.08	0.86±0.15	1.00±0.09	0.95±0.04
63	Eu	0.35±0.13	0.48±0.18	0.55±0.10	0.52±0.04
64	Gd	0.93±0.13	—	1.12±0.06	1.08±0.04
66	Dy	1.18±0.06	1.09±0.12	1.11±0.06	1.10±0.04
68	Er	0.97±0.09	—	0.93±0.08	0.93±0.05
72	Hf	0.92±0.10	—	0.94±0.08	0.85±0.05

¹ Солнечное содержание Li - см. [30].

элементов $\log \epsilon(\text{El})$ в атмосферах трех гигантов собраны в табл.8. Здесь же приведены содержания тех же элементов в фотосфере Солнца [20]. Указанные ошибки определения величин $\log \epsilon(\text{El})$ учитывают как разброс в значениях $\log \epsilon(\text{El})$ между индивидуальными линиями, так и неопределенность в подгонке синтетического спектра к наблюдаемому спектру звезды.

На рис.5, построенном по данным табл. 8, показана разница в содержаниях всех исследованных элементов между тремя гигантами и Солнцем (рис.5a), а также между гигантами EK Eri и OU And и звездой сравнения β Gem (рис.5b).

Из рис.5 следует важный вывод: нет никаких систематических избытков относительно Солнца в содержаниях тяжелых элементов ни для гигантов EK Eri и OU And, ни для звезды сравнения β Gem. Для элементов от Fe до Hf найденные содержания отличаются от солнечных содержаний обычно в

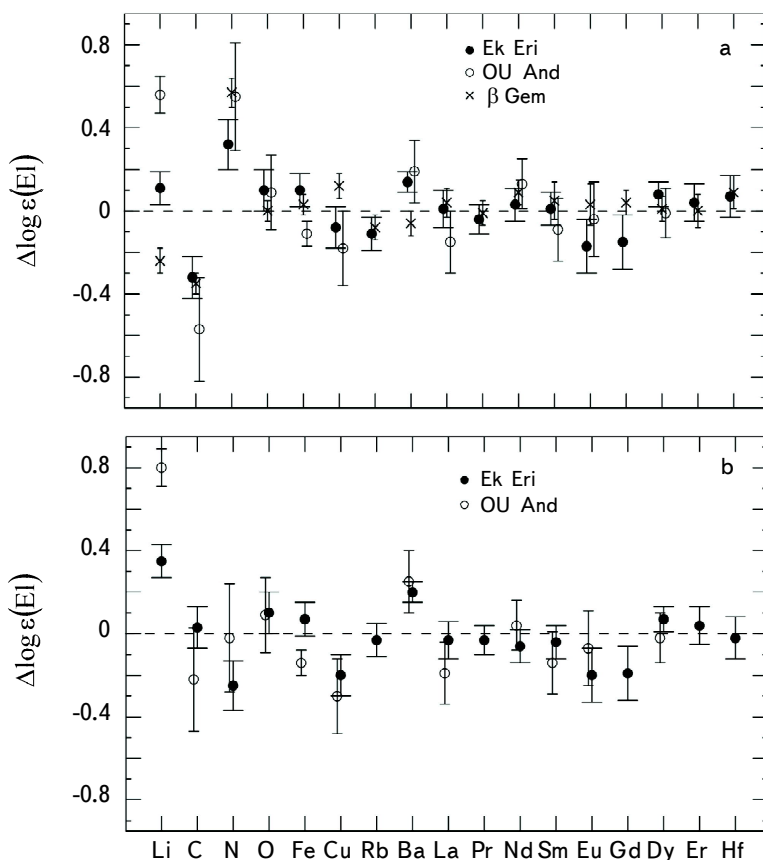


Рис.5. Разность в содержаниях элементов: а) между тремя гигантами и Солнцем; б) между гигантами EK Eri и OU And и звездой сравнения β Gem.

пределах ошибок определения. Таким образом, не подтверждается предположение о возможных остаточных избытках тяжелых элементов у ЕК Егi и OU And как вероятных потомков магнитных Ар-звезд.

Что касается легких элементов, то в их содержаниях наблюдается заметное различие между исследованными звездами и Солнцем (рис.5а). Прежде всего отметим, что для всех трех гигантов содержания углерода и азота показали аномалии, вполне ожидаемые для звезд этого типа, а именно: дефицит С от -0.3 до -0.6 dex и избыток N от $+0.3$ до $+0.6$ dex.

Следует подчеркнуть, что при этом, в полном согласии с теорией, суммарное содержание C+N+O осталось неизменным с момента рождения звезд. Действительно, как видно из табл.6, значения $\log \epsilon(C + N + O)$ для всех трех гигантов оказались, во-первых, фактически одинаковыми: 8.97, 8.98 и 8.96, соответственно для ЕК Егi, OU And и β Gem (хотя ошибки определения этой величины достаточно велики, особенно в случае OU And). Во-вторых, они практически совпадают с солнечным значением $\log \epsilon(C + N + O) = 8.94 \pm 0.14$ [20], которое можно принять в качестве исходного. Более того, они практически совпадают также со средним значением $\log \epsilon(C + N + O) = 8.94$, полученным для ранних В-звезд ГП [48] и со значением $\log \epsilon(C + N + O) = 8.97$, найденным для AFG-сверхгигантов [49].

Особого внимания заслуживают результаты, касающиеся отношения изотопов углерода $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, которое, как известно, является хорошим индикатором эволюционного статуса красных гигантов. Для Солнца было найдено отношение $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 89$, которое считается типичным для нормальных звезд ГП. Полученные нами значения $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 17.3$ для ЕК Егi и 17.2 для β Gem (табл.6) существенно ниже солнечного значения, и этот факт однозначно доказывает, что гиганты ЕК Егi и β Gem уже прошли глубокое перемешивание в фазе FDU (т.е. это объекты post-FDU).

Наши результаты для гигантов post-FDU подтверждаются оценками $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, полученными другими авторами для звезд этого типа. Например, авторы [33] нашли величину $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 17.8 \pm 1.9$ для первого компонента α Aur, гиганта с параметрами $T_{\text{eff}} = 4943$ К и $\log g = 2.52$, довольно близкими к нашим параметрам для β Gem. Другой пример - результаты определения $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ для красных гигантов в открытых скоплениях NGC 2324, 2477 и 3960 [50]. В каждом из этих скоплений было исследовано по 6-7 звезд; в среднем для скоплений найдено $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 21 \pm 1$, 20 ± 1 и 16 ± 4 , соответственно.

Таким образом, наши значения $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ для ЕК Егi и β Gem хорошо согласуются с современными данными других авторов. Более того, все эти данные в целом хорошо согласуются с эволюционными расчетами, из которых для гигантов post-FDU следуют значения $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, близкие к наблюдаемым (детали см. например, в работах [33,50]).

Итак, эволюционный статус гигантов EK Eri и β Gem, благодаря найденным низким значениям $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, вполне определен: это стадия post-FDU. Если эти два гиганта действительно являются потомками магнитных Ар-звезд, то отсутствие у них избытков тяжелых элементов вполне объясняется тем, что эти звезды прошли глубокое перемешивание в фазе FDU, вследствие которого имевшиеся избытки исчезли (напомним, что у магнитных Ар-звезд эти избытки являются поверхностным явлением, не затрагивающим глубоких слоев звезды). Очевидно, что перемешивание должно было привести и к исчезновению других особенностей магнитных Ар-звезд, отмеченных во *Введении*, например, пятнистого распределения элементов по поверхности звезды, а также вертикальной стратификации элементов в атмосфере.

Для гиганта OU And, где величину $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ найти не удалось, эволюционный статус остается неясным. С одной стороны, из рис.1 как будто следует, что гигант OU And, в отличие от EK Eri и β Gem, еще не достиг фазы FDU. С другой стороны, отсутствие у этой звезды, как и у EK Eri и β Gem, избытков тяжелых элементов, возможно, свидетельствует об испытанном ею глубоком перемешивании.

Выше отмечались две аномалии, касающиеся группы CNO-элементов, это дефицит углерода и избыток азота. Известно, что гораздо более чувствительным индикатором эволюции, чем сами содержания C и N, является отношение N/C. В нашей работе это отношение определялось относительно Солнца, т.е. рассматривалась величина $[N/C] = \log(N/C) - \log(N/C)_{\odot}$; найденные значения $[N/C]$ представлены в табл.6.

Мы сравнили эти результаты с теоретическими значениями $[N/C]$, полученными на основе расчетов [51] для моделей вращающихся звезд, как это было сделано, например, в работе [49]. Конкретно нами проводилось сравнение с расчетами для модели $M = 2.5 M_{\odot}$ в фазе post-FDU. Согласно этим расчетам, теоретические значения $[N/C]$ зависят от начальной скорости вращения V_0 и составляют 0.70 при $V_0 = 0$ км/с, 0.97 при $V_0 = 150$ км/с и 1.13 при $V_0 = 290$ км/с. Видно, что наши величины $[N/C]$ для двух post-FDU гигантов, 0.64 ± 0.16 для EK Eri и 0.92 ± 0.09 для β Gem, вполне соответствуют предсказаниям теории.

Наиболее интересно сравнение наблюдений и теории в случае OU And, звезды с неясным эволюционным статусом. Для нее получено наибольшее значение $[N/C] = 1.12 \pm 0.36$, т.е. отношение N/C превышает солнечное значение на 1.1 dex. Примечательно, что для гиганта OU And в работе [11], основываясь на эволюционных расчетах звезд с вращением, было найдено, что его начальная скорость V_0 составляла 131 км/с. Этой скорости V_0 по нашей оценке соответствует теоретическое значение $[N/C] = 0.92$, которое достаточно хорошо согласуется с полученным нами значением $[N/C] = 1.12 \pm 0.36$ (в пределах ошибки определения,

которая для OU And достаточно велика). Мы приходим к заключению, что высокое отношение N/C для OU And подтверждает, что и этот гигант прошел фазу FDU.

Содержание лития - еще одна величина, тесно связанная с эволюцией звезды. Как видно из табл.8, содержание Li в атмосферах трех гигантов варьируется от 0.72 до 1.52. Однако, согласно теории, во время перемешивания в фазе FDU литий попадает в глубокие горячие слои и там полностью выгорает, так что у post-FDU гигантов литий вообще не должен наблюдаться. Тогда как объяснить присутствие лития в атмосферах трех исследованных гигантов?

Еще одна загадка: как у таких гигантов после глубокого перемешивания могло сохраниться магнитное поле? Оказывается, на оба вопроса можно дать один ответ, который заключается в гипотетическом захвате звездой (уже после фазы FDU) планеты-гиганта с массой в несколько масс Юпитера.

Такая гипотеза в последние годы обсуждается все более активно; это объясняется тем, что быстро растущее число вновь открытых экзопланет подтверждает, что существование планетных систем около холодных гигантов - достаточно распространенное явление. Кроме того, как показали расчеты, в формирующихся планетных системах имеет место миграция планет, в результате которой какая-то планета может быть захвачена звездой.

Расчеты [52] показали, что в результате падения на красный гигант планеты с массой до $15 M_J$ (где M_J - масса Юпитера) содержание лития на поверхности звезды может повыситься до величины $\log \varepsilon(\text{Li}) \approx 2.2$. Следовательно, значения $\log \varepsilon(\text{Li}) = 0.7 - 1.5$ у наших трех гигантов вполне объяснимы в рамках этой гипотезы. Важно, что захват планеты, кроме увеличения содержания лития, приводит к значительному повышению скорости вращения красного гиганта. Согласно [53], следствием этого является запуск динамо-механизма и возникновение магнитного поля.

Таким образом, в качестве объяснения содержания лития и магнитных полей, наблюдаемых у трех исследованных гигантов, может быть предложена гипотеза захвата планеты с массой в несколько M_J . Напомним, что у β Gem уже была найдена одна планета с массой $m \geq 2.6 M_J$.

9. Заключение. Наше исследование красных гигантов EK Eri и OU And, объявленных вероятными потомками Ar-звезд, а также гиганта β Gem как звезды сравнения привело к следующим результатам.

Определены фундаментальные параметры этих звезд и проанализирован их химический состав. В целом найденные параметры являются типичными для нормальных красных гигантов. В частности, звезды имеют нормальную металличность $[\text{Fe}/\text{H}] = \pm 0.1$, а их массы $M = 1.8 - 2.9 M_\odot$ вполне соответ-

вуют как красным гигантам, так и магнитным Ap- и Bp-звездам.

Для трех гигантов определено содержание 17 химических элементов от лития ($Z=3$) до гафния ($Z=72$). Все тяжелые элементы от Fe до Hf показали солнечное содержание (в пределах ошибок определения). Таким образом, мы получили важный результат: у EK Eri и OU And, а также у β Gem нет никаких аномалий в содержаниях тяжелых элементов; в частности, отсутствуют какие-либо избытки редкоземельных элементов, которые у магнитных Ap-звезд достигают 4 dex.

Интересные результаты получены также для легких элементов, конкретно для содержаний ключевых элементов Li, C, N и O, а также для отношения изотопов углерода $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ (последнее, как и содержание азота найдено по линиям молекулы CN). В частности, полученные нами низкие значения $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 17.2$ для β Gem и $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 17.3$ для EK Eri однозначно доказывают, что оба эти гиганта прошли глубокое перемешивание в фазе FDU. Для OU And величину $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ определить не удалось, однако повышенное отношение N/C (на 1.1 dex больше солнечного) подтверждает, что и этот гигант является post-FDU объектом, прошедшим глубокое перемешивание.

Именно перемешиванием в фазе FDU можно объяснить отсутствие избытков тяжелых элементов в атмосферах EK Eri и OU And (если оно существовало до FDU).

Во всех трех случаях получены аномалии в содержаниях углерода и азота, а именно: дефицит C от -0.3 до -0.6 dex и избыток N от +0.3 до +0.6 dex. Соответственно значения [N/C] варьируются от 0.6 до 1.1 dex. Аномалии C и N, которые частично могли появиться уже к концу стадии ГП, должны были усиливаться после перемешивания в фазе FDU. В полном соответствии с теорией подтверждено постоянство суммарного содержания C+N+O в процессе эволюции; действительно, найденное для трех гигантов содержание $\log \epsilon(\text{C} + \text{N} + \text{O}) = 8.96 - 8.98$ практически совпадает с начальным значением этой величины, конкретно со значением $\log \epsilon(\text{C} + \text{N} + \text{O}) = 8.94$, полученным для Солнца и для ранних B-звезд ГП.

Литий был детектирован у всех трех гигантов, показав содержания $\log \epsilon(\text{Li}) = 0.7 - 1.5$. Однако, согласно теории, в результате перемешивания в фазе FDU литий должен был бы выгореть. Еще одно противоречие - наличие заметного магнитного поля, которое не могло сохраниться после FDU. Оба эти противоречия имеют общее объяснение: гипотетический захват красным гигантом планеты с массой в несколько масс Юпитера.

Авторы благодарят Национальный комитет по тематике российских телескопов за предоставление наблюдательного времени на БТА. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки

и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение No. 05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016).

Авторы благодарят Правительство Российской Федерации и Министерство науки и высшего образования Российской Федерации за поддержку (проект 075-15-2020-780)

¹ Крымская астрофизическая обсерватория РАН, e-mail: lyub@crao.crimea.ru

² Специальная астрофизическая обсерватория РАН

THE RED GIANTS EK Eri AND OU And AS THE PROBABLE DESCENDANTS OF MAGNETIC AP STARS: A SEARCH FOR ABUNDANCE ANOMALIES

L.S.LYUBIMKOV¹, S.A.KOROTIN¹, D.V.PETROV¹, D.B.POKLAD¹,
D.O.KUDRYAVTSEV², D.N.BAKLANOVA¹

The red giants EK Eri and OU And with the magnetic fields $B_{\max} = 99$ and 41 G, respectively, which are suspected to be the descendants of magnetic Ap stars were studied. Their fundamental parameters were found and the chemical composition was analyzed. The abundances of 17 elements from Li ($Z=3$) to Hf ($Z=72$) were determined for these giants, as well as for the comparison star β Gem (Pollux). The nitrogen abundance and the carbon isotope ratio $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ were found from CN molecular lines. The low ratios $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 17.3$ for EK Eri and 17.2 for β Gem establish that these giants passed through the deep convecting mixing in the First Dredge-Up (FDU) phase. For OU And the $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ value could not be determined because of the relatively rapid rotation and the greater effective temperature of this star, however the high N/C ratio (by 1.1 dex greater than the solar one) can be a confirmation that this giant passed through the FDU phase, too. Our analysis of the chemical composition led to the important conclusion: for all three giants there are no anomalies in abundances of heavy elements; in particular, there are no overabundances of rear earth elements, which amount 4 dex for magnetic Ap stars. An absence of such overabundances can be a result of the deep mixing during the FDU phase. In all three cases the abundances of carbon and nitrogen showed anomalies expected for stars of this type: the C deficiency from -0.3 to -0.6 dex and the N excess from +0.3 to +0.6 dex. The theory prediction on the sum C+N+O constancy during evolution is confirmed: the summed abundance $\log \varepsilon(\text{C} + \text{N} + \text{O}) = 8.96 - 8.98$ determined for three giants coincides practically with

an initial value, specifically with the value $\log \varepsilon(\text{C} + \text{N} + \text{O}) = 8.94$ obtained for the Sun and for early B-type MS stars. The Li I 6707.76 Å line was detected in spectra of all three stars, showing the lithium abundance $\log \varepsilon(\text{Li}) = 0.7 - 1.5$, however a presence of lithium in atmospheres of post-FDU giants contradicts the standard theory. Two observed facts unexpected for post-FDU giants, i.e. the existence of magnetic field and the presence of lithium in atmosphere can be explained in the framework of one hypothesis: an engulfment by a red giant of the planet with the mass of several Jupiter masses.

Keywords: *red giants: chemical composition: evolution*

ЛИТЕРАТУРА

1. Л.С.Любимков, Химический состав звезд: метод и результаты анализа, Одесса, Астропринт, 1995.
2. Л.С.Любимков, Изв. Крымской Астрофиз. Обс. **110**, 16, 2014, (Bull. CrAO, **110**, 9, 2014).
3. M.Aurière, R.Konstantinova-Antova, C.Charbonnel et al., Astron. Astrophys., **574**, A90, 2015.
4. M.J.Harris, D.L.Lambert, V.V.Smith, Astrophys. J., **325**, 768, 1998.
5. Sz.Mészáros, C.Allende Prieto, B.Edvardsson et al., Astron. J., **144**, 120, 2012.
6. T.Ryabchikova, N.Piskunov, R.L.Kurucz et al., Physica Scripta, **90**, id. 054005, 2015.
7. L.S.Lyubimkov, S.A.Korotin, D.V.Petrov et al., Astron. Nachr., **342**, 497, 2021.
8. A.Massarotti, D.W.Latham, R.P.Stefanik et al., Astron. J., **135**, 209, 2008.
9. Gaia DR2 (simbad:2018yCat.1345....0G).
10. F. van Leeuwen, Hipparcos, the New Reduction of the Raw Data, Dordrecht: Springer, 2007.
11. A.Borisova, M.Aurière, P.Petit et al., Astron. Astrophys., **591**, A57, 2016.
12. D.Baklanova, S.Plachinda, D.Mkrichian et al., Astron. Nachr., **332**, 930, 2011.
13. I.Han, B.C.Lee, K.M.Kim et al., JKAS, **41**, 59, 2008.
14. D.Tody, Instrumentation in Astronomy VI, SPIE 0627 (Ed. D.L. Crawford: 1986), p.733.
15. P.Petit, T.Louge, S.Théado et al., Publ. Astron. Soc. Pacif., **126**, 469, 2014.
16. Gaia Collaboration, A.G.A.Brown, A.Vallenari et al., Astron. Astrophys., **616**, A1, 2018.
17. L.S.Lyubimkov, D.L.Lambert, S.I.Rostopchin et al., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **402**, 1369, 2010.
18. J.Choi, A.Dotter, C.Conroy et al., Astrophys. J., **823**, 102, 2016.
19. A.Claret, Astron. Astrophys., **424**, 919, 2004.
20. K.Lodders, Space Sci. Rev., **217**, id.44, 2021.
21. Л.С.Любимков, Д.В.Петров, Д.Б.Поклад, Астрофизика, **62**, 379, 2019,

- (Astrophysics, **62**, 338, 2019).
22. *P.Jofré, U.Heiter, C.Soubiran et al.*, Astron. Astrophys., **564**, A133, 2014.
 23. *Л.И.Машонкина, Т.М.Ситнова, Ю.В.Пахомов*, Письма в Астрон. ж., **42**, 667, 2016, (Astron. Let., **42**, 606, 2016).
 24. *Л.С.Любимков*, Астрофизика, **59**, 459, 2016, (Astrophysics, **59**, 411, 2016).
 25. *Л.С.Любимков*, Астрофизика, **61**, 297, 2018, (Astrophysics, **61**, 262, 2018).
 26. *O.P.Kochukhov*, Physics of Magnetic Stars, Ed. I.I.Romanyuk, D.O.Kudryavtsev, p.109, 2007.
 27. *B.E.Reddy, D.L.Lambert, C.Laws et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **335**, 1005, 2002.
 28. *U.G.Jørgensen, M. Larsson*, Astron. Astrophys., **238**, 424, 1990.
 29. *K.Lind, M.Asplund, P.S.Barklem*, Astron. Astrophys., **503**, 541, 2009.
 30. *E.Wang, T.Nordlander, M.Asplund et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **500**, 2159, 2021.
 31. *L.S.Lyubimkov, D.L.Lambert, S.A.Korotin et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **446**, 3447, 2015.
 32. *S.A.Korotin, S.M.Andrievsky, R.E.Luck et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **444**, 3301, 2014.
 33. *D.P.Sablowski, S.Järvinen, I.Ilyin et al.*, Astron. Astrophys., **622**, L11, 2019.
 34. *B.Plez*, Turbospectrum: Code for spectral synthesis, ascl:1205.004, 2012.
 35. *R.P.Hedrosa, C.Abia, M.Busso et al.*, Astrophys. J., **768**, L11, 2013.
 36. *C.Snedden, S.Lucatello, R.S.Ram et al.*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **214**, 26, 2014.
 37. *R.L.Kurucz, I.Furenlid, J.Brault et al.*, National Solar Observatory Atlas, Sunspot, New Mexico: National Solar Observatory, Solar flux atlas from 296 to 1300 nm, 1984.
 38. *S.Andrievsky, P.Bonifacio, E.Caffau et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **473**, 3377, 2018.
 39. *С.А.Коротин*, Письма в Астрон. ж., **46**, 575, 2020, (Astron. Lett., **46**, 541, 2020).
 40. *S.M.Andrievsky, M.Spite, S.A.Korotin et al.*, Astron. Astrophys., **494**, 1083, 2009.
 41. *J.E.Lawler, M.E.Wickliffe, E.A. Den Hartog et al.*, Astrophys. J., **563**, 1075, 2001.
 42. *E.A. Den Hartog, J.E.Lawler, C.Snedden et al.*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **167**, 292, 2006.
 43. *C.Snedden, J.E.Lawler, J.J.Cowan et al.*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **182**, 80, 2009.
 44. *E.A. Den Hartog, J.E.Lawler, C.Snedden et al.*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **148**, 543, 2003.
 45. *J.E.Lawler, E.A. Den Hartog, C.Snedden et al.*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **162**, 227, 2006.
 46. *J.E.Lawler, C.Snedden, J.J.Cowan et al.*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **178**, 71, 2008.
 47. *J.E.Lawler, E.A. Den Hartog, Z.E.Labby et al.*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **169**, 120, 2007.
 48. *Л.С.Любимков*, Астрофизика, **56**, 517, 2013, (Astrophysics, **56**, 472, 2013).
 49. *L.S.Lyubimkov, S.A.Korotin, D.L.Lambert*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **489**, 1533, 2019.
 50. *G.Tautvaišienė, A.Drazdauskas, A.Bragaglia et al.*, Astron. Astrophys., **595**, A16, 2016.
 51. *C.Georgy, S.Ekström, A.Granada et al.*, Astron. Astrophys., **553**, A24, 2013.
 52. *C.Aguilera-Gómez, J.Chanamé, M.H.Pinsonneault et al.*, Astrophys. J., **829**, id. 127, 2016.