

УДК 523.94

Определение содержания ванадия в фотосфере Солнца с учетом влияния сверхтонкой структуры

Б. Т. Бабий, Р. Е. Рикалюк

Выполнены расчеты профилей 39 линий нейтрального ванадия и на основе анализа 25 линий, не подверженных влиянию СТС, определено содержание элемента по трем моделям солнечной атмосферы. Учет эффектов СТС, приводящих к уширению фраунгоферовых линий, выполнен в предположении, что СТС уширяет линии аналогично микротурбулентности. При определении химического содержания по совпадению эквивалентных ширин влияние эффектов СТС на его величину порядка 0.04 dex, а по совпадению центральных глубин — 0.14 dex в рамках одной модели.

Среднее значение содержания ванадия находится в пределах величин $3.91 \leq A_V \leq 4.08$, причем наибольшее значение соответствует модели HOLMU, наименьшее — модели VAL.

DETERMINATION OF VANADIUM ABUNDANCE IN THE SOLAR PHOTOSPHERE ACCOUNTING FOR THE EFFECT OF HYPERFINE STRUCTURE, by Babij B. T., Rikalyuk R. E.—From the analysis of 25 full profiles of neutral vanadium lines without influence of hyperfine structure (HFS) with 3 recent solar atmospheric models abundance of vanadium is obtained within 4.08 to 3.91 dex as function of adopted solar atmospheric model. HFS reduced vanadium abundance on 0.04—0.14 dex.

Проблема определения содержаний химических элементов в звездных атмосферах является актуальной и в настоящее время в связи с тем, что и теоретические исследования и наблюдения все время совершенствуются, а результаты предыдущих работ могут служить своеобразным критерием правильности полученных результатов. Целью данной работы является определение содержания ванадия в атмосфере Солнца, а также исследование возможного влияния на профили линий ванадия эффектов сверхтонкой структуры (СТС).

В табл. 1 приведены почти все известные нам результаты определения содержания ванадия. Согласно этим данным, наиболее правдоподобное значение содержания ванадия близко к $\lg N_V/N_H \equiv A_V = 4.0$, где N_V — число атомов ванадия, N_H — число атомов водорода, условно принимаемое равным $\lg N_H = 12.0$.

На необходимость учета эффектов СТС, приводящих к уширению фраунгоферовых линий, при определении содержания химических элементов указывают авторы многих работ, в частности, Хейде [14] и Холвергер, Эртель [17]. Последние предполагают, что СТС уширяет линии аналогично микротурбулентности, т. е. увеличивает эквивалентные ширины. Унзольд [24] допускал, что действие СТС на профили линий может быть представлено гауссовым распределением с некоторой полушириной $\Delta\lambda_{\text{СТС}}$:

$$I_{\text{СТС}}(\Delta\lambda) = \exp[-(\Delta\lambda/\Delta\lambda_{\text{СТС}})^2]/\sqrt{\pi}\Delta\lambda_{\text{СТС}},$$

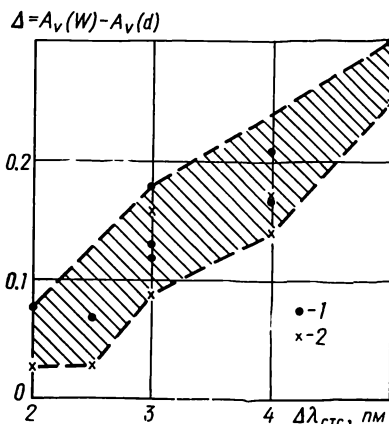
где $\Delta\lambda$ — расстояние от центра линии. Это аналогично действию на наблюдаемые профили макротурбулентных движений. Э. А. Гуртовенко [3] справедливо допускал, что линии, подверженные влиянию СТС, должны быть исключены из числа линий, используемых при определении фотосферного поля скоростей.

Наблюдательный материал, методика расчета содержания ванадия, полученные результаты.

Расчеты выполнены для 39 линий нейтрального ванадия, эквивалентные ширины и центральные глубины которых заимствованы из [15]. Содержание A_V определялось с использованием сил осцилляторов, дан-

ных в работах [5, 19]. Так как исследуемые нами линии слабые или умеренной интенсивности, то согласно [9], теоретический расчет профилей линий может быть выполнен в приближении локального термодинамического равновесия по методике, изложенной в [2]. Эмпирическая постоянная затухания и величина турбулентной скорости (в нашем случае слабых линий совместная скорость микро- и макротурбулентных движений) подбирались по совпадению теоретически вычисленных и наблюдаемых профилей линий ванадия, помещенных в каталоге [4], не подверженных уширению вследствие СТС ($\lambda=611.16; 613.54; 623.32; 625.18; 627.47$ нм). В результате усреднения оказалось, что параметр постоянной затухания $\alpha=0.25 \cdot 10^{-8}$, а полуширины линий совпадают с наблюдаемыми, если в качестве турбулентной скорости воспользоваться амплитудным значением зависящего от глубины общего поля скоростей [13]. Полное согласование наблюдаемых профилей с теоретическими означало также согласование их центральных

Зависимость разности содержаний, определяемых по W и d от полуширины СТС — компоненты $\Delta\lambda_{\text{СТС}}$. 1 — расчет по модели VAL, 2 — по модели HOLMU



глубин и эквивалентных ширин, что освобождает нас от необходимости учета плохо установленной к настоящему времени величины макротурбулентной скорости $v_{\text{макро}}$. С целью определения влияния модели на определяемое содержание ванадия все расчеты выполнены по трем моделям атмосферы Солнца: Гарвард-Смитсоновской [11] (HSRA), Холвергера—Мюллер [16] (HOLMU), а также одной из последних Вернацца и др. [25] (VAL). Все полученные нами результаты вместе с наблюдаемыми и атомными характеристиками исследуемых линий сведены в табл. 2, в которой в порядке нумерации колонок размещены: 1 — порядковый номер исследуемой линии, 2, 3, 4, 5 — ее длина волны λ , потенциал возбуждения EP , центральная глубина d , эквивалентная ширина W и сила осцилляторов $\lg gf$ [19], соответственно. Далее в колонках 7, 8, 10 и 11 помещены рассчитанные значения содержания ванадия по эквивалентным ширинам $A_v(W)$ по трем вышеуказанным моделям атмосферы соответственно. В колонке 9 помещены значения содержания ванадия, найденные по центральным глубинам $A_v(d)$. Все значения содержаний, кроме помещенных в колонке 11, получены с использованием в качестве турбулентной скорости общего поля скоростей. В заключение отметим, что фактически нами рассчитывался параметр $\lg L = \lg A + \lg gf$, поэтому с помощью данных, помещенных нами в колонки 6—11, легко можно произвести перерасчет содержания ванадия в других системах сил осцилляторов.

Дискуссия и обсуждение результатов. Прежде всего обращает на себя внимание то, что для 8 линий с известными величинами $\Delta\lambda_{\text{СТС}}$ [17], получено большое различие между $A_v(d)$ и $A_v(W)$. Параметры этих линий приведены в табл. 3, а на рисунке изображена зависимость между величиной $\Delta = A(W) - A(d)$ и полуширинами $\Delta\lambda_{\text{СТС}}$ этих же линий для двух моделей. Обнаружение такой почти прямопропорциональной зависимости, дало нам возможность отнести к категории линий, «подозреваемых» в расширении вследствие эффекта СТС еще 6 линий, для которых $\Delta\lambda_{\text{СТС}}$ в литературе не указано (линии отмечены звездочками в табл. 2). Для этих линий, пользуясь рисунком, нетрудно определить предполагаемую полуширину $\Delta\lambda_{\text{СТС}}$. В дальнейшем при определении

Таблица 1. Содержание ванадия в фотосфере Солнца по данным разных авторов

Год	Авторы	Литературный источник	Содержание	Способ определения
1929	Рассел	[23]	5.0	Визуальные оценки
1960	Голдберг и др.	[12]	3.7	Кривая роста
1964	Мюллер, Мючлекнер	[20]	4.13—4.14	Кривая роста
1965	Аллер	[6]	4.12	Кривая роста
1968	Уорнер	[26]	3.92	Кривая роста для линий ионов
1974	Энгвольд, Хауге	[10]	4.00	Сводное значение
1976	Росс, Аллер	[22]	4.02	Сводное значение
1977	Бабий и др.	[1]	3.97	Центральные глубины
1977	Хауге, Энгвольд	[18]	4.1	Сводное значение
1978	Бьемон	[8]	4.14—4.17	Линии ионов по трем моделям
1978	Бьемон	[7]	3.81—3.94	Линии атомов по трем моделям
1979	Пейджел	[21]	4.0	Сводное значение

Таблица 2. Параметры фраунгоферовых линий и содержание ванадия, определенное по ним

Номер линии	λ , нм	EP , эВ	d , %	W , нм	$\lg gf$ [19]	HOLMU $A_V(W)$	HSRA $A_V(W)$	VAL		
								$A_V(d)$	$A_V(W)$	$A'_V(W)$
1	445.20	1.86	27	2.4	+0.69	3.92	3.80	3.67	3.84	3.88
2	456.07	1.94	14	9.9	+0.26	3.94	3.81	3.86	3.85	3.87
3	457.72	0	39	2.8	-1.14	4.08	3.88	3.80	3.87	3.91
4	458.64	0.04	51	4.1	-0.86	4.08	3.86	3.73	3.85	3.93
5	459.41	0.07	52	5.3	-0.73	4.15	3.94	3.64	3.94	4.05
6	482.75*	0.04	13	1.1	-1.43	3.91	3.71	3.55	3.70	3.71
7	483.24	0	18	1.2	-1.46	3.92	3.74	3.70	3.73	3.74
8	485.15	0	35	3.4	-1.09	4.10	3.91	3.68	3.89	3.94
9	487.55	0.07	50	4.3	-0.74	3.98	3.77	3.63	3.76	3.83
10	488.06	1.19	14	0.9	-1.26	4.73	4.58	4.61	4.60	4.61
11	560.49	1.04	4	0.3	-0.96	3.73	3.58	3.57	3.59	3.58
12	562.76	1.08	22	2.1	-0.92	4.63	4.49	4.38	4.49	4.50
13	565.74	1.06	6	0.5	-1.03	4.04	3.90	3.85	3.90	3.90
14	566.84	1.08	6	0.5	-1.07	4.10	3.95	3.91	3.96	3.96
15	567.08	1.08	7	0.6	-1.12	4.23	4.09	4.03	4.09	4.09
16	570.36	1.05	29	2.5	-0.38	4.15	4.00	3.96	4.00	4.03
17	572.70*	1.08	34	3.5	+0.05	3.95	3.78	3.65	3.78	3.83
18	572.77	1.05	7	0.8	-0.75	3.96	3.82	3.63	3.81	3.82
19	573.70	1.06	10	0.8	-0.54	3.76	3.62	3.59	3.62	3.62
20	603.97	1.06	13	1.0	-0.68	3.98	3.84	3.85	3.83	3.84
21	608.14	1.05	13	0.8	-0.65	3.84	3.69	3.81	3.69	3.69
22	609.02	1.08	33	2.7	-0.14	3.95	3.80	3.82	3.80	3.82
23	611.16	1.04	10	0.9	-0.78	4.01	3.86	3.80	3.86	3.87
24	611.95	1.06	23	1.5	-0.43	3.92	3.78	3.89	3.77	3.78
25	613.54	1.05	9	0.7	-0.81	3.94	3.79	3.80	3.78	3.79
26	615.01*	0.30	7	0.8	-1.53	4.01	3.82	3.62	3.79	3.80
27	619.92	0.29	11	0.9	-1.61	4.11	3.94	3.90	3.91	3.92
28	621.39	0.30	5	0.3	-2.39	4.40	4.23	4.33	4.21	4.21
29	621.64	0.27	32	3.1	-1.45	4.53	5.37	4.26	4.34	4.37
30	622.45	0.29	5	0.4	-2.15	4.28	4.11	4.07	4.09	4.09
31	623.32	0.27	5	0.4	-2.14	4.25	4.08	4.04	4.05	4.06
32	624.28*	0.26	7	0.7	-1.67	4.03	3.85	3.72	3.83	3.83
33	624.31*	0.30	26	2.5	-0.96	3.94	3.79	3.69	3.76	3.79
34	624.47	0.27	8	0.6	-1.69	3.98	3.81	3.81	3.78	3.78
35	625.18	0.29	14	1.2	-1.32	3.95	3.78	3.72	3.75	3.76
36	625.69	0.27	2	0.2	-1.89	3.69	3.51	3.37	3.49	3.50
37	628.52	0.27	11	0.7	-1.50	3.86	3.69	3.77	3.67	3.67
38	629.65	0.30	8	0.6	-1.61	3.93	3.76	3.76	3.72	3.73
39	645.24*	1.19	6	0.7	-3.21	6.41	6.30	6.16	6.30	6.31

средней величины содержания ванадия эти 14 линий мы не учитывали. Выполнены также расчеты A_V по согласованию эквивалентных ширин линий с постоянной по глубине величиной турбулентной скорости $v_{\text{микро}} = 1$ км/с. Для модели VAL значения A_V приведены в последней колонке табл. 2. Разность A_V , полученных при расчетах с общим полем скоростей и постоянным значением 1 км/с существенно только для линий, подверженных влиянию СТС. Следует указать, что не все авторы учитывают влияние эффектов СТС на величину определяемого содержания ванадия. Например, Бьмон [7] считает такое влияние незначительным, что нашими расчетами не подтверждается. Как следует из табл. 3,

Таблица 3. Содержание ванадия с учетом эффекта уширения вследствие СТС в системе сил осцилляторов из [19] (модель VAL)

λ , нм	$\Delta\lambda_{\text{СТС}}$, пм	без учета СТС		с учетом СТС	
		$A_V(d)$	$A_V(W)$	$A_V(d)$	$A_V(W)$
445.20	4.0	3.67	3.84	3.87	3.81
457.72	2.5	3.80	3.87	3.90	3.85
458.64	3.0	3.73	3.85	3.87	3.81
459.41	5.0	3.64	3.94	3.92	3.81
485.15	4.0	3.68	3.89	3.87	3.85
487.55	3.0	3.63	3.76	3.76	3.71
572.77	3.0	3.63	3.81	3.72	3.81
621.64	2.0	4.26	4.34	4.31	4.33
		3.76 ± 0.20	3.91 ± 0.17	3.90 ± 0.17	3.87 ± 0.18

даже при расчете по эквивалентным ширинам значения содержаний ванадия, определяемые с учетом влияния СТС и без него, сильно различаются, причем они тем больше, чем больше величина $\Delta\lambda_{\text{СТС}}$. Здесь расчеты выполнены только по модели VAL. Чтобы точно учесть эффекты уширения профилей вследствие СТС, нужно определить уширение всеми компонентами СТС данной спектральной линии, как это сделано, например, в [17]. Однако, как следует из табл. 3, удовлетворительных результатов можно достичь и более простым способом, если в теоретических профилях учитывать влияние СТС путем прибавления к тепловой и турбулентной скорости в выражении для доплеровского уширения дополнительной скорости, обусловленной СТС: $v_{\text{СТС}} = c \cdot \Delta\lambda/\lambda$. Таким образом уширение вследствие наличия СТС аналогично действию микро-турбулентности. Как видно из табл. 3, учет эффектов СТС уменьшает среднее значение содержания ванадия, определяемое по эквивалентным ширинам на 0.04 dex. Определение содержания ванадия по центральным глубинам без учета влияния эффектов СТС, по нашему мнению, некорректно (здесь $\delta = A_V(\text{СТС}) - A_V(\text{не СТС}) \approx 0.14$).

Полученные нами результаты определения содержания ванадия в солнечной атмосфере, рассчитанные по эквивалентным ширинам W и центральным глубинам d по трем моделям атмосферы, усредненные по 25 линиям VI, сведены в табл. 4. Такое усреднение возможно, поскольку корреляции между параметрами, характеризующими каждую линию в отдельности (например, E_p , $\lg gf$, W , d), и значениями содержаний, определенных для этих линий, не обнаружено. Содержание определено в системе сил осцилляторов [5] и [19].

Получить содержание ванадия по другим системам сил осцилляторов, в частности [7], нам не представилось возможным в связи с малым числом совпадаемых линий.

Следует отметить, что точность определения среднего значения A_V в системе сил осцилляторов [5] несколько выше, чем в системе [19]. В то же время разность средних значений содержания ванадия в рамках одной модели не превышает значения 0.03 dex.

Как видно из табл. 2 и табл. 4 существует некоторая зависимость от избранной модели атмосферы. Наибольшее значение получается с использованием модели HOLMU, а наименьшее — с использованием VAL. Такое же различие в значениях A_V получено и в работе [7], и как отмечает ее автор, может быть объяснено большим температурным уровнем модели HOLMU по сравнению с VAL и HSRA.

Таблица 4. Средние значения содержания ванадия для трех моделей солнечной атмосферы

Система сил осцилляторов	Способ определения	Средние значения содержания ванадия		
		HOLMU	HSRA	VAL
Куруч—Пейтримен [19]	$A(d)$	4.08 ± 0.25	3.92 ± 0.25	3.89 ± 0.26
	$A(W)$	4.05 ± 0.25	3.90 ± 0.25	3.89 ± 0.26
Корлисс—Бозман [5]	$A(d)$	4.10 ± 0.18	3.94 ± 0.18	3.91 ± 0.18
	$A(W)$	4.08 ± 0.18	3.92 ± 0.18	3.91 ± 0.19

Следовательно, можем сделать вывод, что содержание ванадия в фотосфере Солнца находится в пределах $4.08 \geq A_V(W) \geq 3.91$ (в шкале, где для водорода $\lg N_H = 12.00$).

1. Бабий Б. Т., Керик Р. Е., Кордуба Б. М.—Циркуляр Львов. астрон. обсерватории, 1977, № 52, с. 25—28.
2. Бабий Б. Т., Кордуба Б. М., Рыкалюк Р. Е.—Циркуляр Львов. астрон. обсерватории, 1978, № 53, с. 32—41.
3. Гуртовенко Э. А.—Астрометрия и астрофизика, 1975, вып. 26, с. 78—86.
4. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И., Орлова Т. В. и др. Профили избранных фраунгоферовых линий для разных положений центр—край на диске Солнца.—Киев: Наук. думка, 1975.—222 с.
5. Корлисс Ч., Бозман У. Вероятности переходов и силы осцилляторов 70 элементов.—М.: Мир, 1968.—562 с.
6. Aller L. The abundance of the elements in the solar atmosphere.—Adv. Astron. and Astrophys., 1965, 3, p. 1—25.
7. Biemont E.—Solar Phys., 1978, 56, p. 79—86.
8. Biemont E.—Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 1978, 184, p. 683—694.
9. Dumont S., Heidmann N., Jefferies J., Pecker J.—Astron. and Astrophys., 1975, 40, p. 127—132.
10. Engvold O., Hauge O.—Inst. Theoret. Astrophys., 1974, Rep. N 39.—25 p.
11. Gingerich O., Noyes R., Kalkofen W., Cuny J.—Solar Phys., 1971, 18, p. 347—365.
12. Goldberg L., Müller E., Aller L.—Astrophys. J., Suppl. Ser., 1960, 5, p. 1—138.
13. Gurtovenko E.—Solar Phys., 1975, 42, p. 25—33.
14. Heide K.—Z. f. Astrophys., 1968, 69, S. 220—239.
15. Holweger H.—Z. f. Astrophys., 1967, 65, S. 365—417.
16. Holweger H., Müller E.—Solar Phys., 1974, 39, p. 19—30.
17. Holweger H., Oertel K.—Astron. and Astrophys., 1971, 10, p. 434—436.
18. Houge O., Engvold O.—Inst. Theoret. Astrophys., 1977, Rep. N 49.—23 p.
19. Kurucz R., Peytremann E. Tables of semiempirical gf values.—Smithsonian Astrophys. Observ., Spec. Rep., 1975, N 362.—1219 p.
20. Müller E., Mutschlechner J.—Astrophys. J., Suppl. Ser., 1964, N 85, p. 1—64.
21. Pagel B. E. Solar abundance. A new Table (Oct. 1976).—In: Origin and Distribution Elements. Oxford: Pergamon Press. 1979, p. 79—80.
22. Ross J., Aller L.—Science, 1979, 191, p. 1223—1230.
23. Russel H.—Astrophys. J., 1929, 70, p. 11—82.
24. Unsöld A. Physik der Sternatmosphären.—Berlin: Springer, 1955.
25. Vernazza L., Avrett E., Loeser R.—Astrophys. J., Suppl. Ser., 1981, 45, p. 635—725.
26. Warner B.—Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 1968, 138, p. 229—243.