

УДК 523.94  
PACS number(s): 96-60-FS

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕФЕКТІВ НАДТОНКОЇ СТРУКТУРИ ЛІНІЙ НА ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В АТМОСФЕРІ СОНЦЯ. І. ПЕРЕВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ НЕПАРНИМИ АТОМНИМИ ТА ЗАРЯДОВИМИ ЧИСЛАМИ: Mn і Co

**М. Гірняк, М. Ковальчук**

*Астрономічна обсерваторія  
Львівського національного університету імені Івана Франка,  
буль. Кирила і Мефодія, 8, 79005 Львів, Україна  
e-mail: hirnyak@astro.franko.lviv.ua*

В основу дослідження покладено аналіз вмістів хімічних елементів на Сонці, а також перевизначення вмісту марганцю і кобальту в сонячній атмосфері з урахуванням впливу надтонкої структури (НТС) ліній. Підкреслено таку обставину: набагато більший розкид і ненадійність значень хімічного вмісту для елементів із непарними атомними та зарядовими числами, ніж для елементів з такими ж парними числами. Тим самим переконливо доведена необхідність врахування ефектів НТС, що приводять до розширення фраунгоферових ліній, при визначенні вмісту хімічних елементів. На підставі експериментальних даних про надтонке розщеплення в 21 неблендованих лініях марганцю і 23 лініях кобальту, що мають астрофізичний інтерес, проведені розрахунки їх вмістів з урахуванням НТС. На підставі комплексного підходу до розрахунку еквівалентних ширин ліній поглинання і узгодження їх зі спостережуваними даними отримані уточнені значення вмістів марганцю і кобальту на Сонці дорівнюють  $\lg A_{Mn} = 5,42 \pm 0,06$ ,  $\lg A_{Co} = 4,99 \pm 0,09$ , відповідно. Розрахунки проведені, як звичайно, в логарифмічній шкалі, де вміст водню становить  $\lg A_H = 12$ .

*Ключові слова:* сонячна атмосфера, надтонка структура ліній (НТС), вміст хімічних елементів.

Проблема визначення вмісту хімічних елементів у сонячній і зоряних атмосферах залишається актуальною і сьогодні. Це пов'язане з тим, що і теоретичні дослідження, і спектральні спостереження увесь час удосконалюються. Дослідження фраунгоферового спектра містить цінну та багату інформацію про фізичні умови, хімічний вміст, структурні особливості Сонця та зір.

І на сьогоднішній день все ще існують великі розходження в значеннях вмісту окремих хімічних елементів на Сонці. Це зумовлене, головню, різноманітністю методів дослідження різними авторами, застосуванням різних систем сил осциляторів, різних моделей сонячної атмосфери та поля швидкостей в них, неточністю параметрів постійної загасання, недостатнім врахуванням усіх механізмів, що відповідають за утворення ліній фраунгоферового спектра, а також іншими причинами, з якими безпосередньо взаємопов'язане значення хімічного вмісту.

В основу цієї роботи покладено аналіз вмістів хімічних елементів на сонці, визначених нами за роки спільної роботи з Б. Т. Бабієм [1–30], а також визначення вмістів елементів із непарними атомними та зарядовими числами – марганцю і кобальту – в сонячній атмосфері з врахуванням впливу надтонкої структури (НТС) ліній.

У свій час ми перевизначили і уточнили вміст понад 40 хімічних елементів в атмосфері Сонця [1–30]. У кожній нашій роботі завжди був зроблений короткий але детальний огляд, що стосується проблеми визначення хімічного вмісту цього елемента іншими авторами. Важливою, суттєвою ознакою чи перевагою наших робіт є те, що визначення вмісту проводилось за єдиною методикою, однаковим методом узгодження теоретичних еквівалентних ширин ліній із високоточними спостережуваними, із використанням сучасних моделей атмосфери Сонця та новітньої системи сил осциляторів. Це зменшило небезпеку випадкових помилок і залишилася лише можливість систематичної помилки. Під час аналізу результатів хімічного вмісту на Сонці, отриманого як іншими авторами, так і нами, привернула увагу одна цікава обставина: набагато більший розкид і ненадійність значень хімічного вмісту для елементів із непарними атомними та зарядовими числами, ніж для елементів з такими ж парними числами. Наявність такої відмінності між лініями елементів із парними та непарними порядковими номерами можна розглядати лише крізь призму відомого в астрофізиці ефекту надтонкої структури ліній поглинання. НТС зумовлена магнітною взаємодією між ядром і електронною оболонкою атома, а саме впливом магнітного моменту ядра, який не дорівнює нулю для непарного числа протонів, на магнітне поле атомних електронів. Енергія надтонкого розщеплення набагато менша від енергії звичайного тонкого розщеплення при спін-орбітальній взаємодії самих електронів. Але внаслідок НТС рівнів у спектрі атома замість однієї спектральної лінії з'являється група близько розташованих ліній – цим і виявляється НТС спектральної лінії. Причому вплив надтонкої структури зростає зі збільшенням атомного і зарядового непарного числа, хоча послаблюється у лініях іонів цих елементів. І навпаки, не підлягають впливу НТС лінії елементів, що мають парні зарядові та атомні числа, але, водночас, цьому впливу можуть підлягати лінії іонів цих елементів, наприклад, лінії Fe II. Ще в 1952 р. А. Абт [31] розглянув дію НТС на профілі зоряних і сонячних ліній поглинання. Згодом, у 1969 р. К. Хайд [32] і 1978 р. Т. Б'єнон [33, 34] довели, що НТС спричинює збільшення еквівалентних ширин ліній. Отже, хімічний вміст, визначений без урахування НТС, отримують завищеним. Хольвегер і Ертел [35] зробили висновок, що при визначенні вмісту елементів по лініях, еквівалентні ширини яких перебувають в межах 40–80 mÅ, результат завищується на  $\Delta \lg N \approx 0,25$  dex в логарифмічній шкалі, де вміст водню становить 12 dex. Найменше підлягають впливу НТС слабкі лінії, еквівалентні ширини яких перебувають в межах 20 mÅ. Але коли розщеплення ліній, зумовлене

НТС, стає сумірним із доплерівською шириною, то нехтування НТС приводить до суттєвих помилок, як в розрахунку теоретичних профілів, так і у разі їх інтерпретації. Є низка робіт, наприклад, В. Хіндмарша [36], Г. Хольвегера і К. Ертела [35], А. Бута, М. Шалліса, М. Уельса [37], Ханнафорда та інших [38], в яких експериментально визначено величину надтонкого розщеплення для ліній ряду елементів. В деяких лініях, зокрема ванадію, марганцю, кобальту тощо ефект впливу НТС може вдвічі перевищувати їх реальну ширину. У деяких лініях цих елементів відстань між компонентами НТС досягає кількох десятків і навіть сотень міліангстрем, НТС суттєво збільшує не тільки еквівалентну ширину, а й змінює форму самого профілю лінії. Однак, на жаль, ще мало експериментальних даних про величину надтонкого розщеплення для більшості ліній. У праці Е. Гуртовенка [39], в якій він визначив фотосферне поле швидкостей, запропоновано, що лінії, які підлягають впливу НТС, повинні бути виключені з числа ліній, що використовуються при подібних дослідженнях. Це правильно і для досліджень хімічного вмісту за такими лініями. Але коли провести розрахунки з врахуванням впливу НТС на профілі чи еквівалентні ширини ліній, то результати отримуються набагато точніші та надійніші, що було показано в уже згадуваних працях, дослідженнях. У 1985 р. Р. Бабій і Р. Рикалюк [40] визначили вміст ванадію у фотосфері Сонця з врахуванням впливу НТС. Вони засвідчили, що нехтування дією НТС некоректне і похибка при визначенні хімічного вмісту досягає значення 0,19 dex. Врахування ж ефектів НТС значно покращує отримані результати – до похибки в межах всього 0,04 dex. Згодом було перевизначено вміст ніобію [24] і родію [26], де теж звернуто увагу на необхідність врахування впливу НТС на лінії цих важких елементів.

Нині у визначених вмістах марганцю і кобальту на Сонці [35, 41] також є великий розкид і великі розходження з метеоритним вмістом [42, 43]. Тому, скориставшись експериментальними даними, наведеними у дослідженнях [37, 35] про надтонке розщеплення в лініях марганцю і кобальту, що мають астрофізичний інтерес, ми провели розрахунки їх вмістів з врахуванням НТС. Центральні глибини і еквівалентні ширини запозичені з Льежського атласу сонячного спектра [44]. Використано систему сил осциляторів із смітсоніанського каталогу [45]. Поправковий множник до величини  $\gamma_6$  (Ван-дер-Ваальсівського затухання), знайдений при узгодженні теоретичних еквівалентних ширин зі спостережуваними, становив  $E \approx 1,5$ . Значення мікро- і макротурбулентних швидкостей запозичені із праці [46].

Усі розрахунки виконані за моделлю VAL-C [47], фізичні і атомні параметри досліджуваних ліній марганцю та експериментальні дані про НТС цих ліній наведені в табл. 1, а для ліній кобальту – в табл. 2.

Таблиця 1

Фізичні й атомні параметри ліній марганцю та експериментальні дані про НТС цих ліній

№ пп	$\lambda$ , nm	$E$ , eV	$W$ , pm	$\lg gf_{KP}$	$\Delta\lambda_1$ , pm	$I_1^{HTC}$	$\Delta\lambda_2$ , pm	$I_2^{HTC}$	№ мульти
1	539,467	0,00	7,4	-3,43	3,470	0,814	6,382	0,658	1
2	543,255	0,00	4,5	-3,72	3,213	0,754	5,753	0,574	1
3	542,036	2,14	7,8	-1,70	5,460	0,750	9,950	0,525	4
4	547,064	2,16	5,2	-1,94	5,100	0,578	7,145	0,484	4
5	408,294	2,18	9,7	-0,43	1,090	0,770	1,94	0,546	5
6	500,491	2,92	1,4	-1,64	1,280	0,790	2,32	0,680	20
7	467,169	2,89	1,1	-1,59	1,700	0,810	3,08	0,650	21
8	470,972	2,89	6,9	-0,48	1,550	0,870	2,640	0,720	21
9	476,153	2,95	7,4	-0,38	1,030	0,240	2,000	0,320	21
10	449,889	2,94	5,8	-0,53	0,000	0,001	-	-	22
11	450,222	2,92	6,3	-0,68	0,920	0,860	1,630	0,500	22
12	445,301	2,94	5,5	-0,70	0,820	0,889	2,105	0,735	22
13	443,635	2,92	6,5	-0,52	0,930	0,800	1,720	0,690	22
14	441,488	2,89	5,9	-0,57	0,940	0,880	1,815	0,795	22
15	447,014	2,94	4,9	-0,70	-	-	0,440	0,750	22
16	426,592	2,94	6,1	-0,46	0,560	0,860	1,080	0,800	23
17	423,529	2,89	8,8	-0,02	0,550	0,830	1,070	0,700	23
18	601,350	3,07	8,9	-0,47	2,140	0,610	4,190	0,390	27
19	602,180	3,07	9,8	-0,17	1,800	0,840	3,14	0,710	27
20	445,755	3,07	5,6	-0,91	-	-	1,25	0,360	28
21	525,533	3,13	3,8	-0,89	2,080	0,825	3,97	0,685	32

Таблиця 2

Фізичні й атомні параметри ліній кобальту та експериментальні дані про НТС цих ліній

№ пп	$\lambda$ , nm	$E$ , eV	$W$ , pm	$\lg gf$	$\Delta\lambda_1$ , pm	$I_1^{HTC}$	$\Delta\lambda_2$ , pm	$I_2^{HTC}$	№ мульти
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	394,17	0,43	4,7	-1,96	2,1	0,156	4,1	0,08	17
2	395,79	0,58	5,4	-2,02	1,4	0,291	-	-	18
3	397,95	0,10	6,7	-2,5	1,1	0,209	2,1	0,168	3
4	399,79	1,05	11,4	-1,17	1,4	0,299	3,5	0,043	32
5	402,09	0,43	8,0	-1,91	1,1	0,38	3,3	0,45	16
6	406,64	0,92	7,6	-1,22	1,2	0,25	-	-	30
7	411,88	1,05	14,8	-0,39	1,3	0,209	2,3	0,119	28
8	419,07	0,00	5,8	-2,85	1,3	0,129	2,5	0,105	1
9	425,23	0,10	3,2	-3,00	1,0	0,113	1,8	0,093	1
10	474,97	3,04	3,5	-0,31	1,8	0,098	3,1	0,088	156
11	479,29	3,25	4,0	-0,05	0,1	0,310	-	-	158
12	481,35	3,21	5,1	+0,06	0,1	0,203	0,8	0,175	158

Закінчення табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13	486,79	3,10	5,4	+0,24	0,5	0,135	1,2	0,112	158
14	521,27	3,51	2,1	-0,11	2,0	0,094	3,4	0,062	170
15	528,06	3,63	2,0	-0,06	1,0	0,167	2,1	0,123	172
16	530,10	1,71	2,1	-1,87	1,5	0,141	2,4	0,115	39
17	535,20	3,56	2,1	-0,02	2,1	0,119	3,1	0,084	172
18	548,33	1,71	4,2	-1,42	2,0	0,137	3,4	0,105	39
19	553,08	1,70	1,4	-2,04	2,0	0,137	3,3	0,105	38
20	608,24	3,50	0,5	-0,39	3,8	0,176	–	–	169
21	618,90	1,71	0,6	-2,19	1,1	0,119	2,3	0,068	37
22	645,02	1,70	2,5	-1,58	1,4	0,056	–	–	37
23	645,49	3,63	1,1	-0,26	0,9	0,168	2,3	0,046	174

За порядком нумерації колонок в таблицях розміщені: 1 – порядковий номер досліджуваної лінії; 2, 3, 4, 5 – її довжина хвилі лінії  $\lambda$ , потенціал збудження EP, еквівалентна ширина  $W$  і сила осцилятора, відповідно. Далі, в колонках 6 і 8 – відстані від центра лінії  $\Delta\lambda_1$  і  $\Delta\lambda_2$ , а відповідні для цих відстаней для цієї лінії значення відносних інтенсивностей, спричинених впливом НТС, в колонках 7 і 9; колонка 10 – номер мультиплета.

Розрахунок проводять методом узгодження теоретичних еквівалентних ширин зі спостережуваними.

Під час розрахунку теоретичних еквівалентних ширин ліній поглинання допускалось, що процес, внаслідок якого утворюються лінії, є комбінацією істинного поглинання і когерентного розсіювання. У цьому загальному випадку функцію джерела  $S_\lambda$  можна подати як лінійну комбінацію функції Планка  $B_\lambda$  і середню інтенсивність  $J_\lambda$ , взяті з вагами, що відповідають коефіцієнтам неперервного поглинання і поглинання в лінії  $\sigma_\lambda$  за відсутності розсіювання, істинний коефіцієнт поглинання всередині ліній  $k_\lambda^0$  і коефіцієнт розсіювання всередині ліній  $\sigma_\lambda^0$  [48]:

$$S_\lambda(\tau_\lambda) = \frac{k_\lambda + k_\lambda^0}{k_\lambda + k_\lambda^0 + \sigma_\lambda^0} B_\lambda(\tau_\lambda) + \frac{\sigma_\lambda^0}{k_\lambda + k_\lambda^0 + \sigma_\lambda^0} J_\lambda(\tau_\lambda), \quad (1)$$

причому  $k_\lambda^0 = \varepsilon_\lambda \sigma_\lambda$  і  $\sigma_\lambda^0 = (1 - \varepsilon_\lambda) \sigma_\lambda$ . Величина  $\varepsilon_\lambda$  показує, яка частина селективно поглинутої енергії перетворюється в теплову, а яка буде перевипромінена у вигляді розсіювання.

У випадку когерентного розсіювання інтенсивність, усереднена за всіма напрямками, визначається інтегральним рівнянням

$$J_\lambda(\tau_\lambda) = \frac{1}{2} \int_0^\infty S_\lambda(\tau'_\lambda) E_i(|\tau_\lambda - \tau'_\lambda|) d\tau'_\lambda. \quad (2)$$

Це рівняння розв'язувалось методом послідовних наближень. За нульове наближення приймалась функція Планка. При такому комплексному підході до проблеми утворення ліній розв'язок рівняння переносу отримували після трьох-чотирьох послідовних наближень. У дослідженнях [49] допускається, що дія НТС

на профілі ліній схожа до впливу макротурбулентності і може бути подана гаусовим розподілом із деякою додатковою півшириною  $\Delta\lambda_{НТС}$ :

$$I_{НТС}(\Delta\lambda) = \exp[-(\Delta\lambda/\Delta\lambda_{НТС})^2] / \sqrt{\pi} \Delta\lambda_{НТС}, \quad (3)$$

де  $\Delta\lambda$  – відстань до центра лінії. Вплив ефектів НТС на розширення фраунгоферових ліній допускався, як і у працях [32, 35], аналогічним до впливу “додаткової” мікротурбулентної швидкості. Отже, якщо дія НТС подібна до доплерівського розширення, то спостережувана турбулентна швидкість дорівнює:

$$v_i^2 = (v_i')^2 + v_{НТС}^2, \quad (4)$$

де

$$v_{НТС} = \frac{c\Delta\lambda_{НТС}}{\lambda}. \quad (5)$$

Це розширення зумовлене НТС, причому воно не змінюється при переході від центра до краю диску Сонця, а  $v_i'$  – реальна турбулентна швидкість. Для кожної лінії марганцю і кобальту  $\Delta\lambda_{НТС}$  обчислювали з формули (3), використовуючи значення величин  $\Delta\lambda$  і  $I_{НТС}$  з таблиць 1 і 2. Розрахунки проводили за програмою, розробленою в Астрономічній обсерваторії Львівського університету.

Врахування механізму когерентного розсіяння, а також впливу ефектів НТС при обчисленні вмістів марганцю і кобальту на Сонці суттєво зменшило як розкид отриманих значень вмісту, так і саме усереднене його значення порівняно з такими ж значеннями, отриманими без урахування НТС (табл. 3 і 4).

Таблиця 3

Порівняння вмістів марганцю без врахування і з врахуванням ефекту розширення внаслідок НТС

№ п/п	$\lambda$ , nm	lgN (lgN=12)		№ п/п	$\lambda$ , nm	lgN (lgN=12)	
		без нтс	з нтс			без нтс	з нтс
1	539,467	5,55	5,42	12	445,301	5,47	5,42
2	543,255	5,50	5,46	13	443,635	5,48	5,40
3	542,036	5,52	5,44	14	441,488	5,52	5,44
4	547,064	5,54	5,45	15	447,014	5,45	5,42
5	408,294	5,57	5,44	16	426,592	5,40	5,42
6	500,491	5,47	5,45	17	423,529	5,57	5,43
7	467,169	5,51	5,48	18	601,350	5,49	5,44
8	470,972	5,48	5,43	19	602,180	5,50	5,44
9	476,153	5,48	5,41	20	445,755	5,43	5,41
10	449,889	5,48	5,42	21	525,533	5,45	5,40
11	450,222	5,45	5,39				

Середнє  $\lg N_{Mn}$  без НТС = 5,51 ± 0,14

з НТС = 5,42 ± 0,06.

Порівняння вмістів кобальту без врахування і з врахуванням ефекту розширення  
внаслідок НТС

№ п/п	$\lambda$ , nm	LgN (lgN=12)		№ п/п	$\lambda$ , nm	lgN(lgN=12)	
		без нтс	з нтс			без нтс	з нтс
1	2	3	4	5	6	7	8
1	394,17	5,72	5,31	13	486,79	5,63	4,81
2	395,79	5,64	5,25	14	521,27	5,17	4,90
3	397,95	5,80	5,42	15	528,06	5,35	5,09
4	399,79	5,55	5,11	16	530,10	5,36	5,11
5	402,09	5,63	4,96	17	535,20	5,62	5,22
6	406,64	5,73	4,85	18	548,33	5,52	4,84
7	411,88	5,60	5,07	19	553,08	5,46	5,23
8	419,07	5,48	5,14	20	608,24	5,11	5,02
9	425,23	5,27	4,93	21	618,90	5,30	5,10
10	474,97	5,15	4,78	22	645,02	5,35	4,29
11	479,29	5,24	4,60	23	645,49	5,26	4,74
12	481,35	5,52	4,96				

Середнє  $lg N_{Co}$  без НТС=5,46 ± 0,24

з НТС=4,99 ± 0,09.

Розрахунки вмістів елементів проводили, як звичайно, в логарифмічній шкалі, де вміст водню становить 12. Отже, на основі комплексного підходу до визначення хімічного вмісту ми пропонуємо для вмістів марганцю і кобальту в сонячній атмосфері усереднені значення, визначені по 21-й досліджуваній лінії марганцю та 23-х лініях кобальту, відповідно дорівнюють  $lg A_{Mn}=5,42 \pm 0,06$  та  $lg A_{Co}=4,99 \pm 0,09$ . Метеоритні вмісти марганцю і кобальту, нормалізовані до сонячної шкали, становлять  $lg A_{Mn}=5,53$  [43] і  $lg A_{Co}=4,92$  [43].

1. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б., Рикалюк Р.Е.* Исследование содержания бериллия на Солнце // Деп. в УкрНИИНТИ. 1989. № 441. Ук 89. 11 с.
2. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б.* О содержании углерода в солнечной атмосфере и уточнении сил осцилляторов нейтрального углерода // Кинематика и физика небесных тел. 1985. Т. 1. № 4. С. 16–20.
3. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б., Рикалюк Р.Е.* Исследование содержания азота на Солнце // Деп. в УкрНИИНТИ. 1989. № 454. Ук 89. 5 с.
4. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б., Ковальчук М.М., Рикалюк Р.Е.* Исследование содержания кислорода на Солнце // Деп. в УкрНИИНТИ. 1989. № 2866. Ук 89. 9 с.
5. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б., Рикалюк Р.Е., Стодилка М.И.* Определение содержания натрия в солнечной атмосфере с использованием слабых и умеренных линий // Деп. в УкрНИИНТИ. 1989. № 455. Ук 89. 9 с.
6. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б., Стодилка М.И.* Исследование содержания магния на Солнце // Деп. в УкрНИИНТИ. 1989. № 473. Ук 89. 8 с.

7. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б., Рикалюк Р.Е.* О содержании алюминия на Солнце // Деп. в УкрНИИНТИ. 1989. № 464. Ук 89. 9 с.
8. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б., Рикалюк Р.Е.* О содержании кремния в фотосфере Солнца // Циркуляр Львов. АО. 1978. № 54. С. 27–33.
9. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б., Рикалюк Р.Е.* Исследование содержания ниобия на Солнце // Деп. в УкрНИИНТИ. 1989. № 411. Ук 89. 6 с.
10. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б., Рикалюк Р.Е.* Исследование содержания серы на Солнце // Деп. в УкрНИИНТИ. 1989. № 457. Ук 89. 7 с.
11. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б., Рикалюк Р.Е.* О содержании калия на Солнце // Деп. в УкрНИИНТИ. 1989. № 456. Ук 89. 6 с.
12. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б., Рикалюк Р.Е.* О содержании кальция на Солнце // Деп. в УкрНИИНТИ. 1989. № 409. Ук 89. 7 с.
13. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б.* Определение содержания скандия в солнечной фотосфере по слабым фраунгоферовым линиям атомов и ионов // Вопросы астрофизики. 1980. № 55. С. 7–16.
14. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б., Рикалюк Р.Е.* Определение содержания скандия в солнечной атмосфере по слабым фраунгоферовым линиям атомов и ионов // Деп. в УкрНИИНТИ. 1989. № 474. Ук 89. 10 с.
15. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б., Рикалюк Р.Е.* Определение содержания титана на Солнце по линиям атомов и ионов // Деп. в УкрНИИНТИ. 1989. № 460. Ук 89. 12 с.
16. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б., Рикалюк Р.Е.* Исследование содержания ванадия на Солнце // Деп. в УкрНИИНТИ. 1990. № 320. Ук 90. 10 с.
17. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б., Рикалюк Р.Е.* Исследование содержания хрома на Солнце // Деп. в УкрНИИНТИ. 1990. № 319. Ук 90. 10 с.
18. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б., Рикалюк Р.Е.* Исследование содержания азота на Солнце // Деп. в УкрНИИНТИ. 1989. № 454. Ук 89. 5 с.
19. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б., Марголыч И.Ф.* Исследование содержания никеля в солнечной атмосфере // Астрометрия и астрофизика. 1982. Т. 47. С. 22–27.
20. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б.* О содержании никеля в солнечной атмосфере // Солнечные данные. 1983. № 6. С. 100–105.
21. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б., Рикалюк Р.Е.* Исследование содержания цинка на Солнце // Деп. в УкрНИИНТИ. 1989. № 412. Ук 89. 8 с.
22. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б.* Исследование содержания иттрия в атмосфере Солнца // Кинематика и физика небесных тел. 1986. Т. 2. № 5. С. 94–96.
23. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б.* О содержании циркония на Солнце // Солнечные данные. 1986. № 5. С. 85–88.
24. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б., Рикалюк Р.Е.* Исследование содержания ниобия на Солнце // Деп. в УкрНИИНТИ. 1989. № 411. Ук 89. 13 с.
25. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б., Рикалюк Р.Е.* Исследование содержания молибдена и рутения на Солнце // Деп. в УкрНИИНТИ. 1990. № 316. Ук 90. 8 с.
26. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б., Рикалюк Р.Е.* Исследование содержания родия и палладия на Солнце // Деп. в УкрНИИНТИ. 1989. № 410. Ук 89. 8 с.
27. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б.* Содержание бария в солнечной атмосфере // Проблемы космической физики. 1981. Т. 16. С. 38–41.
28. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б., Рикалюк Р.Е.* Исследование содержания свинца на Солнце // Деп. в УкрНИИНТИ. 1990. № 318. Ук 90. 8 с.



29. *Гирняк М.Б.* Сравнительный анализ обилий различных металлов, полученных по линиям атомов и ионов // Тезисы докл. на Всесоюзной конф. "Физика Солнца". 1987. Алма-Ата.
30. *Бабий Б.Т., Гирняк М.Б., Ковальчук М.М., Олійник П.А.* Некоторые аспекты определения содержания химических элементов по спектру фотосферы Солнца // Деп. в УкрНИИИТИ. 1990. № 317. Ук 90. 14 с.
31. *Abt A.* Hyperfine structure in the Solar Spectrum // *Astrophys.J.* 1952. Vol. 115. 199 p.
32. *Heide K.v.d.* Fraunhoferlinien mit Hyperfeinstructur // *Z.Astrophys.* 1968. Vol. 69. P. 220–239.
33. *Beunon T.G.R.* Hyperfine structures for Astrophysically Interesting Levels of Mn I // *Astron. Astrophys.* 1977. Vol. 61. 853 p.
34. *Beunon T.G.R.* Manganese to iron Ratios in F and G Dwarf stars // *Astron. Astrophys.* 1978. Vol. 64. P. 145–152.
35. *Holweger H., Oertel K.B.* Hyperfine Structure on the Solar Cobalt Abundance // *Astron. Astrophys.* 1971. Vol. 10. № 3. P. 434–436.
36. *Hindmarsh W.R.* An interferometric investigation of the effect of hyperfine structure on solar line profiles // *Monthly Notices of R.A.S.* 1955. Vol. 115. № 3. P. 269–278.
37. *Booth A.J., Shallis M.J., Wells M.* Hyperfine structure measurements for lines of astrophysical interest in Mn I // *Monthly Notices of R.A.S.* 1983. Vol. 205. № 1. P. 191–205.
38. *Hannaford P., Lowe R., Biemont E., Grevesse N.* Radiative lifetimes for Nb II and the problem of the solar abundance of niobium // *Astron.Astrophys.* 1985. Vol. 143. № 2. P. 447–450.
39. *Гуртовенко Э.А.* Изменение центр-край профилей слабых фраунгоферовых линий. IV. Интерпретация ширины различных линий в центре диска // *Астрометрия и астрофизика.* 1975. Вып. 26. С. 78–86.
40. *Бабий Б.Т., Рикалюк П.Е.* Определение содержания ванадия в фотосфере Солнца с учетом влияния сверхтонкой структуры // *Кинематика и физика небесных тел.* 1985. Т. 1. № 3. С. 78–82.
41. *Margrave T.E.* The Solar Manganese Abundance // *Solar Phys.* 1972. Vol. 27. № 2. P. 294–298.
42. *Аллер Л.* Распространенность химических элементов. М.: Иностранная литература, 1963. 357 с.
43. *Anders E., Grevesse N.* Abundances of the elements – Meteoritic and Solar // *Geochimica Cosmochimica Acta* (ISSN 0016–7037). 1989. Vol. 53. P. 197–214.
44. *Delbuille L., Neven L., Roland G.* Photometric atlas of the solar spectrum from 3000 to 10 000 Å. Institute d'Astrophys. Univ. de Lie'ge. 1973.
45. *Kuruch L. and Peytremann E.* A table of semi-empirical gf-values // *Smithsonian Astrophysical Observatory. Special Report.* № 362. 1975. P. 400–800.
46. *Гуртовенко Э.А., Костык Р.И.* Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. К.: Наук. думка, 1989. 200 с.
47. *Vernazza J., Avrett E., Loeser R.* Structure of the solar chromosphere. III. Models of EUV brightness of the quiet Sun // *Astroph. J., Suppl.Ser.* 1981. Vol. 45. № 4. P. 635–725.
48. *Бабий Б.Т., Ковальчук М.М.* Об образовании слабых фраунгоферовых линий солнечного спектра // *Астроном. журн.*, 1984. Т. 61. Вып. 4. С. 771–777.

49. Унзольд А. Физика звездных атмосфер. М.: Иностранная литература, 1949. 630 с.

**ANALYSIS OF INFLUENCE OF HYPERFINE STRUCTURE OF LINES ON  
THE DETERMINATION OF ABUNDANCE IN SOLAR ATMOSPHERE.  
I. DETERMINATION OF SOLAR MANGANESE AND COBALT  
ABUNDANCES**

**М. Hirnyak, M. Koval'chuk**

*Astronomical observatory of the Ivan Franko Lviv National University,  
Kyrylo i Mephodii str., 8, 79005 Lviv, Ukraine  
e-mail: hirnyak@astro.franko.lviv.ua*

Analysis of solar abundance of elements and investigations of influence of hyperfine structure (HFS) of lines on the determination of the solar manganese and cobalt abundances are taken as a principle of present work. The scatter and uncertainties of abundance values for elements with odd atomic and charge numbers are much larger for elements with the same even numbers.

Necessity of accounting of hyperfine structure effect, that leads to the widening of fraunhofer lines at determination abundances is clearly shown.

Calculations of solar manganese and cobalt abundances were carried out with accounting of hyperfine structure effect on basis of experimental data about hyperfine splitting in 21 Mn and 23 Co lines, which have astrophysical interest.

More accurate abundances of  $\lg A_{Mn} = 5,42 \pm 0,06$  and of  $\lg A_{Co} = 4,99 \pm 0,09$  are obtained (where  $\lg A_H = 12,00$ ) with complex approaching to calculation of equivalent width of absorption lines and agreement of them with observed data.

*Key words:* solar atmosphere, hyperfine structure (HFS), abundance.

Стаття надійшла до редколегії 19.05.2004

Прийнята до друку 21.11.2005