

*С.Г. Можаровский*

**РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА SUNWORLD  
ОБЗОР СВОЙСТВ И МЕТОДОВ SUNWORLD  
ОТ ВЕРСИИ 1990 г. ДО СОВРЕМЕННОЙ**

В работе описаны основные особенности программного комплекса SunWorld. Приведена краткая история его развития. Отмечен ключевой момент для эффективного функционирования комплекса – это правильная организация структур управляющих данных. Рассказано об инструментах для обработки данных общего назначения SunWorld, инструментах анализа специфических данных расчетных проектов – профилей Стокса, векторов моделей фотосферы. Приведены типовые методы расчетов, кратко упомянуты возможные направления дальнейшего развития SunWorld.

*СОЗДАНИЕ SUNWORLD 1990*

Программный комплекс SunWorld сложился постепенно как компиляция алгоритмов из десятков источников. Основной задачей комплекса было воспроизведение профилей Стокса линий, наблюдаемых в спектрах солнечных пятен.

Программа начиналась с расчетов по аналитическим формулам Д.Н. Рачковского [6] на Фортране, алгоритма Рунге-Кутта [3], взятого из программы И.М. Каца на Алголе для БЭСМ, и дошла до своей окончательной реализации в виде комплекса SunWorld 1990 г. (далее SW90) сначала на Паскале-РАФОС для СМ-ЭВМ, а затем перенесена на Турбо-Паскаль IBM PC.

Формулы, которые лежат в основе алгоритмов SW90, наиболее соответствуют формулам, опубликованным в работе Ланди дель-Иммоченти 1976 [12].

В СНГ аналогом SW90 был программным комплекс SPANSAT Гадуна и Шеминовой [1], разработанный в Киеве.

SW90 был законченным программным комплексом, включавшим в себя:

- текстовый редактор-оболочку, который позволял интегрировать все разнообразные входные и выходные текстовые данные в единую среду, а также запускать алгоритмы расчета в виде цепочки отдельных программ;

- модуль чтения моделей фотосфер, заданных в текстовом формате, максимально приближенном к виду в оригинальных публикациях. Модуль включал необходимые преобразования физических величин и их интерполяцию на сетку оптических глубин с шагом  $0,05 \lg(t)$ ;

- модуль подготовки моделей к расчету, в котором основные векторы моделей – температура  $T$  и газовое и электронное давления в виде  $\lg(P_g)$  и  $\lg(P_e)$  пересчитывались в физические величины, входящие в уравнения для системы Рунге-Кутты:  $h_0$  – отношение коэффициента поглощения в центре линии к поглощению в континууме,  $a$  – параметр, задающий отношение лорцевской и доплеровской частот в функции Фойгта,  $Dl_D$  – доплеровская ширина,  $Dl_H$  – величина магнитного расщепления;

- модуль расчета ионизационного и гидростатического равновесия, который восстанавливал величины газового и электронного давлений  $\lg(P_g)$  и  $\lg(P_e)$  в случае, когда модель была задана одним только температурным распределением  $T$ ;

- отдельные процедуры ввода:

- данных об атомах;

- коэффициентов непрерывного поглощения;

- таблиц для вычисления сумм по состояниям;

- данных о спектральных линиях и их силах осцилляторов;

- модуль расчета структуры зеемановского расщепления по атомным данным линий;

- модуль расчета профилей Стокса по аналитическим формулам для модели Милна–Эддингтона;

- модуль расчета профилей Стокса методом Рунге–Кутты для произвольных одномерных (плоско-параллельных) моделей;

– процедуру для сохранения результатов расчетов в файлы для последующего анализа;

– процедуру чтения задания на расчет. Задание содержало параметры расчета в текстовом виде. Параметры могли быть множественными, например могли включать команды, предписывающие рассчитать профили для нескольких значений напряженности поля или (и) для нескольких разных спектральных линий;

– систему рестарта. При выполнении задания для большого числа профилей продолжительность счета достигала многих часов. Система рестарта позволяла выключать компьютер в любой момент и при следующем включении программы продолжить счет начиная с последнего законченного профиля;

– модуль графического отображения рассчитанных профилей. Графики профилей могли выводиться как на монитор, так и на принтер;

– модуль графики общего назначения, который считывал текстовые таблицы и строил по ним графики. Этот модуль позволял визуально представить распределения разных физических параметров по глубине в фотосфере.

### *ОСНОВА SUNWORLD 2009 – ПРАВИЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ДАННЫХ*

После долгого перерыва в 2009 г. комплекс SunWorld был восстановлен. Он был переведен в систему программирования Delphi и собран в единую программу.

Основное отличие SunWorld версии 2009 г. (далее просто SunWorld) от SW90 – это наличие структур, организующих данные [5]. SW90 был интегрирован в единый комплекс с помощью оболочки, построенной на базе гипертекстового редактора. Оболочка позволяла как редактировать данные, так и запускать множество отдельных модулей – выполняемых файлов комплекса. Данные на выходе каждого модуля преобразовывались в текстовый формат, а затем считывались следующим модулем. Это обеспечивало гибкость и возможность описывать в каждом модуле только самое необходимое. В современном комплексе SunWorld данные являются сквозными, они в неизменном

виде существуют в каждой фазе расчета, поэтому в структуры данных приходится включать все многообразие вариантов их использования. Это накладывает на структуры данных особые требования: они одновременно должны как обеспечивать все виды расчетов, так и быть максимально простыми, чтобы избежать согласований при очередных модификациях алгоритмов.

Основные структуры данных SunWorld:

- база данных (в формате MS Access), которая хранит списки спектральных линий и сил осцилляторов и другие данные;
- структура, отвечающая за все данные об атомах, Mend;
- записи Vemo, описывающие векторы физических параметров в одномерных моделях фотосферы, список этих записей Lvemo;
- записи Unno, хранящие посчитанные профили Стокса, и список записей LunnO;
- структура Variator, организующая множество параметров расчета. Variator хранит массивы вариантов одного или нескольких расчетов (расчет – Quest). Каждому элементу массива Variator соответствует один профиль Unno в списке LunnO.

## *ИНСТРУМЕНТЫ SUNWORLD ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ*

Программный комплекс SunWorld имеет следующие подсистемы обработки данных общего назначения:

- база данных (БД);
- текстовый редактор;
- подсистема графики.

Рассмотрим каждую подсистему.

### **База данных. Списки спектральных линий**

База данных SunWorld хранит самые разные данные, однако эффективной оказывается только в случае действительно массовых данных, а именно списков атомных спектральных линий и их сил осцилляторов. Для ввода в БД данных SunWorld использует автоматизированные процедуры чтения из текстовых таблиц. Наиболее полными

в настоящее время являются таблицы Куруча [11], а также данные, которые можно получить по запросу из Венской БД VALD [10]. Ранее линии в БД SunWorld добавлялись вручную из таблиц Мур [13]. Сейчас этот процесс происходит следующим образом:

- в заданный диапазон длин волн автоматически переносятся все атомные линии из таблиц Kurucz [11]. К уже присутствующим в БД линиям информация по мере необходимости добавляется, для остальных линий в базе данных создаются новые записи;

- для всех вновь введенных линий производится расчет профилей интенсивностей для модели невозмущенной фотосферы [9] (HM – Holweger, Müller) и модели тени [14] (SW – Stellmacher, Wiehr);

- линии, для которых оказываются пренебрежимо малыми значения эквивалентных ширин и центральных глубин для обеих моделей, из БД исключаются.

В результате получается список линий, фрагмент которого от  $\lambda$  6301 Å до  $\lambda$  6303 Å показан на рис. 1.

Ценность базы данных состоит в том, что она позволяет быстро делать выборки по любым полям. Например, на рис. 2 приведена выборка всех включенных в БД линий FeII, которые имеют эквивалентную ширину при расчете для модели тени более трех миллиангстрем.

LINE	LAMB	Atom	N	Mult	ELDW	LGGF	Wcd	Dcd	JL	JU	GL	GU	WHM	DHM	Wsw	Dsw	Rad	Stark	Waa
CR6301	6301,045	CR	1	999	3,1216	4,912			8	6	1,163	1,64	0	0	0,01	0,02	8,36	-5,46	-7,57
SM6301	6301,182	SM	2	999	1,2623	1,976			7	9	0	0	0,07	0,15	0,05	0,11	0	0	0
TI63014	6301,444	TI	1	999	3,7087	2,634			6	4	1,34	0,695	0	0,01	0,02	0,03	8,27	-4,68	-7,45
FE6301	6301,517	FE	1	816	3,65	-0,57	36,76	0,719	4	4	1,835	1,503	116,23	73,93	129,14	68,5	7,93	-5,46	-7,58
SI6301	6301,625	SI	1	999	5,9538	-3,21			2	2	0	0	0,47	0,37	0,01	0	0	0	0
FE63017	6301,767	FE	1	999	5,4582	3,167			8	6	1,444	1,286	0,13	0,18	0,03	0,04	7,59	-4,03	-7,33
MO6301	6301,768	MO	1	999	2,9876	1,826			8	6	0	0	0	0	0	0,01	0	0	0
FE63018	6301,863	FE	1	999	3,6398	-4,53			4	6	1,16	1,352	0,27	0,43	0,28	0,46	7,69	-6,28	-7,83
PP6301	6301,933	P	2	999	0,8864	1,544			4	6	0	0	0,05	0,05	0	0	0	0	0
PR6302	6302,358	PR	2	999	1,3063	0,728			10	12	0	0	0,73	1,51	0,49	0,97	0	0	0
FE63023	6302,394	FE	2	999	7,7271	2,651			7	7	0,961	0,891	0,08	0,1	0	0	8,5	-6,59	-7,91
SM6302	6302,402	SM	2	999	1,5581	-1,771			5	5	0	0	0,06	0,13	0,03	0,07	0	0	0
FE6302	6302,508	FE	1	816	3,63	-1,15	90,82	0,65	2	0	2,487	0	87,21	69,82	85,12	59,2	7,93	-5,43	-7,59
NI630277	6302,771	NI	1	999	5,3026	-2,152			6	6	1,218	1,035	0,15	0,21	0,01	0,02	8,27	-3,94	-7,37
FE63027	6302,78	FE	1	999	5,3712	3,973			12	10	1,178	1,324	0,02	0,03	0	0,01	7,4	-4,05	-7,32
TI6302	6302,846	TI	1	999	3,716	1,215			8	10	1,05	1,03	0,11	0,15	0,65	0,9	8,15	-5,13	-7,47

Рис. 1. Фрагмент таблицы спектральных линий в базе данных. Таблица упорядочена по длине волны

LINE	LAMB	Atc	Ni	Mu	ELDW	LGGF	Wcd	Doc	JL	JL	GL	GU	WHM	DHM	WSW	DSW	Rad	Star	Waa
FE44891	4489,183	FE	2	37	2,85	-2,99	74,7	0,749	0	2	0,398	0,445	73,69	81,95	6,92	12,03	8,49	-6,6	-7,95
FE4491	4491,4	FE	2	37	2,85	-2,99	74,7	0,749	0	2	0,398	0,445	84,25	84,59	9,95	16,39	8,48	-6,6	-7,95
FE4508	4508,28	FE	2	38	2,85	-2,64	88,5	0,808	0	2	0,398	0,021	104,6	87,37	18,83	27,09	8,62	-6,67	-7,95
FE4576	4576,34	FE	2	38	2,84	-3,145	68,6	0,693	0	2	1,019	1,35	66,93	79,1	5,72	9,96	8,61	-6,67	-7,95
FE4582	4582,83	FE	2	37	2,84	-3,395	55,2	0,631	0	2	1,019	1,29	64,21	78,13	5,16	9,09	8,49	-6,6	-7,95
FE4620	4620,51	FE	2	38	2,83	-3,5	53,3	0,587	0	2	1,21	1,4	57,7	74,71	3,78	6,8	8,61	-6,67	-7,95
FE51975	5197,57	FE	2	49	3,23	-2,44	85	0,715	0	2	0,574	0,445	101,01	80,63	8,36	12	8,48	-6,6	-7,95
FE5234	5234,62	FE	2	49	3,22	-2,38	88,5	0,722	7	5	0,98	1,069	104,46	80,85	9	12,7	8,49	-6,6	-7,95
FE5325	5325,55	FE	2	49	3,22	-3,37	45,4	0,45	0	2	0,98	1,29	78,15	74,32	3,6	5,54	8,49	-6,6	-7,95

Рис. 2. Выборка из линий Fe II, которые можно наблюдать в тени пятна

В таблицах Куруча и VALD существует проблема уникальной идентификации линий: возможны ситуации, когда одна линия, взятая из разных источников, окажется описанной дважды. Соответственно в БД SunWorld эта проблема наследуется.

## Текстовый редактор

Текстовый редактор SunWorld имеет две функции, которые отличают его от обычного блокнота, это:

- функция гипертекста;
- возможность редактирования таблиц.

**Функция гипертекста.** Редактор может работать с текстовыми файлами специального вида, эти файлы имеют расширение имени. dir. Строки в таких файлах разбиты на две части. В левой находится произвольный текст, который по смыслу является комментарием к правой части. В правой части содержится имя файла. По команде Enter (вход) редактор загружает указанный файл, по команде Escape (выход) возвращается в тот же файл и позицию, откуда был сделан вход. Благодаря умению строить иерархии dir-файлов редактор позволяет организовывать огромное множество текстовых данных в единое целое (пример 1):

**Редактирование таблиц.** Любой участок текста, который содержит колонки цифр (слов, разделенных пробелами), считается таблицей. Для таблиц возможны следующие операции.

**Выравнивание.** Все слова (последовательности символов, отдельные пробелами) выстраиваются в колонки. Слова, включающие

**Листинг текстовой страницы, предоставляющей доступ к другим файлам**

ОБЗОР ПРОЕКТА «ЦИРКОНИЙ»	
результаты расчетов (и старый ВХОД) картинки профилей РАБОЧИЕ ФАЙЛЫ ПРОЕКТА Zr	DC\dc.dir PIC\pic.dir wrk\swe.dir
ГРАФИКИ:	
КАЛИБР.КРИВЫЕ W получены сдвигом КАЛИБР.КРИВЫЕ W рассчитаны Инт-ти контин.разрезов пятна 13.09.1985 график - 3 спектрограммы рядом Бисекторы и ширины фотометрир.профилей	KAL1\kalib.dir KAL2\kalib.dir SPOT\spot.dir SPOT\I_Spot.dat BI_SHIFT\swe.dir
ПРОЧЕЕ:	
Данные с фурье - спектрометра Центральная длина волны 6122 А Центральная длина волны 7770 А	LIB\DATA\Flux\6122\ LIB\DATA\Flux\7770\ 
ВОЗВРАТ в главное меню ГРАФИКИ	..\SW09\GRA\grad.dir

буквы, выравниваются по первому символу; слова, представляющие собой числа – по десятичной точке (см. пример 2).

Сортировка. Сортируется вся таблица по той колонке, в которой в данный момент находится курсор. Если в колонке есть слова, состоящие из букв, происходит сортировка по алфавиту, если колонка содержит числа, то по значениям.

Удаление колонки. Текущую колонку можно целиком вырезать.

Запоминание и вспоминание колонки. Колонку можно запомнить и затем вспомнить (получить ее дубль) в новой позиции.

Запоминание и вспоминание в формате Excel. Таблица целиком может быть запомнена в виде, пригодном для вставки ее в Excel и, наоборот, в текст может быть вставлена таблица, ранее запомненная в программе Excel.

## Пример 2

### Пример работы функции выравнивания колонок

Idx	Quest	KV	sVarNd	d0dMax	Idx	Quest	KV	sVarNd	d0
1	Ni6767	2	#XM = -100	72.91	1	Ni6767	2	#XM = -100	72.91
2	Ni6767	3	#XM = -80	72.91	2	Ni6767	3	#XM = -80	72.91
3	Ni6767	4	#XM = -60	72.91	3	Ni6767	4	#XM = -60	72.91
4	Ni6767	5	#XM = -40	72.91	4	Ni6767	5	#XM = -40	72.91
5	Ni6767	6	#XM = -20	72.91	5	Ni6767	6	#XM = -20	72.91
6	Ni6767	7	#XM = 0	72.82	6	Ni6767	7	#XM = 0	72.82
7	Ni6767	8	#XM = 20	72.82	7	Ni6767	8	#XM = 20	72.82
8	Ni6767	9	#XM = 40	72.82	8	Ni6767	9	#XM = 40	72.82
9	Ni6767	10	#XM = 50	72.54	9	Ni6767	10	#XM = 50	72.54
10	Ni6767	11	#XM = 60	72.54	10	Ni6767	11	#XM = 60	72.54
11	Ni6767	12	#XM = 70	72.54	11	Ni6767	12	#XM = 70	72.54
12	Ni6767	13	#XM = 80	72.54	12	Ni6767	13	#XM = 80	72.54
13	Ni6767	14	#XM = 90	72.54	13	Ni6767	14	#XM = 90	72.54
14	Ni6767	15	#XM = 100	72.06	14	Ni6767	15	#XM = 100	72.06
15	Ni6767	16	#XM = 110	72.06	15	Ni6767	16	#XM = 110	72.06
16	Ni6767	17	#XM = 120	72.05	16	Ni6767	17	#XM = 120	72.05

### Подсистема графики общего назначения

Комплекс SunWorld, помимо рисования профилей Стокса, позволяет быстро и удобно отображать произвольные графики. Для этого создана [7] подсистема графики общего назначения. Она имеет меньше возможностей, чем графические системы MatLab или IDL, но благодаря интеграции этой подсистемы и гипертекстового редактора, в котором есть развитые функции операций с таблицами, позволяет оперативно представлять текстовые табличные данные в виде графиков.

Рассмотрим пример. Пусть у нас есть данные об атомах в виде таблицы в файле tb\_mend.txt.



## Данные об атомах для примера построения графика

N	Atom	P_at	E_ion_I	E_ion_II	E_ion_III	E_ion_IV
1	H	1.0080	13.598	0.0	0.0	0.0
2	HE	4.0026	24.587	54.416	0.0	0.0
3	LI	6.941	5.392	75.638	122.451	0.0
4	BE	9.0122	9.322	18.211	153.893	217.713
5	B	10.811	8.298	25.155	37.930	259.366
6	C	12.0111	11.260	24.383	47.887	64.492
7	N	14.0067	14.534	29.601	47.448	77.472
8	O	15.9994	13.618	35.117	54.934	77.413
9	F	18.9984	17.422	34.970	62.707	87.138
10	NE	20.179	21.564	40.962	63.45	97.11
.....						
24	CR	51.996	6.766	16.50	30.96	49.1
25	MN	54.9380	7.435	15.640	33.67	51.4
26	FE	55.847	7.870	16.16	30.561	54.8
27	CO	58.9332	7.86	17.06	33.50	51.3
28	NI	58.71	7.635	18.168	35.17	54.9
29	CU	63.546	7.726	20.292	36.83	55.2
30	ZN	65.37	9.394	17.964	39.72	59.4

Мы хотим увидеть график зависимости атомного веса от атомного номера. Для этого необходимо создать текст – так называемую дисплейную программу, которую нужно сохранить в файле, например, graphic.txt (пример 3).

### Пример 3

#### Листинг дисплейной программы, которую «проигрывает» интерпретатор графиков системы SunWorld

```
#FILE tb_mend.txt ! имя текущего файла данных
!----- задание размера поля зрения -----
#VIEW M 5 85 5 85 ! поле зрения в М/Р (в мм/точках) - 80x80 мм
!----- задание самого графика -----
#GRAFIK pAt/Nat      ! команда «начать график»,
                    ! за ней строковое имя графика
1 30                ! строк_до_начала_данных, строк_данных
1 N 0 30           ! номер_колонки_X, тип_масштаба(N/E/L),
                    ! мировые координаты по X
3 N 70 0           ! то же самое для Y, большие значения -
                    ! вверх
1 0 + 0.5         ! 0/1 - соединять/не соединять точки,
                    ! цвет графика, вид и размер маркера
```

```

!----- оформление - координатная сетка и оси -----
#GRID 0 30 5 70 0 10 7 + 0.5 ! x0 x1 dx y0 y1 dy,
                                ! цвет_сетки вид и размер_точек
                                ! сетки
#OXY 0 0 L ! ось Y, заданы: Уровень_X,
            ! Число_цифр_после_точки_в_подписи, (L-левее оси)
#OXX 0 0 D ! ось X, заданы: Уровень_Y,
            ! Число_цифр_после_точки_в_подписи, (D-ниже оси)
----- ! команда рисования
===== ! команда завершения дисплейной программы

```

После выполнения команды «проиграть дисплейную программу» на экране будет отображен график (см. рис. 3).

### *ИНСТРУМЕНТЫ SUNWORLD ДЛЯ ОБРАБОТКИ СВОДНЫХ ДАННЫХ РАСЧЕТНЫХ ПРОЕКТОВ*

Программный комплекс SunWorld имеет следующие интерфейсные страницы для управления и получения информации по сводным данным расчетных проектов:

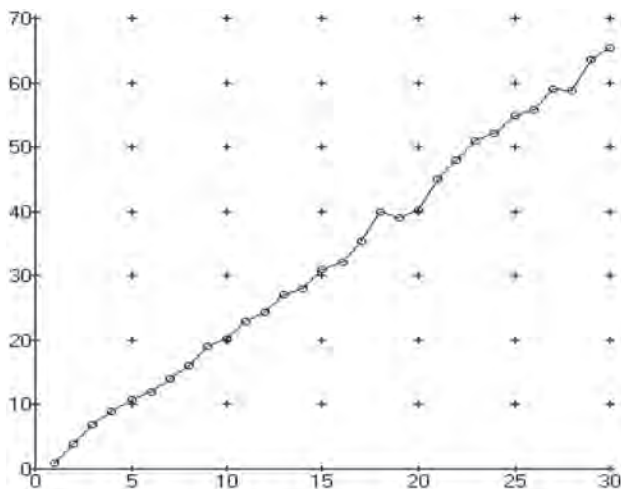


Рис. 3. Результат действия дисплейной программы из примера 3 – график зависимости атомного веса в а.е.м. от атомного номера

- страница управления проектами;
- подсистема рисования графиков профилей Стокса;
- таблица интегральных параметров рассчитанных профилей;
- список векторов моделей фотосферы;
- страница для построения графиков моделей;
- ряд других инструментов.

Рассмотрим эти страницы.

## **Управление проектами**

Комплекс SunWorld производит большое число разнообразных расчетных данных за короткое время, расчеты могут проводиться по разным не связанным темам. Нужно обеспечить порядок среди файлов входных и выходных данных из разных тем, для этого есть система управления проектами. Каждая отдельная тема расчетов объявляется проектом. Проекту необходимо дать название на странице управления проектами. Название должно быть кратким, состоять из латинских букв и цифр и не содержать пробелов; название проекта одновременно будет использоваться как имя каталога со всеми данными: с заданием на расчет, рассчитанными профилями и описателями графиков. Поскольку имя проекта краткое, в дополнение к нему вводится развернутое описание. Данные проекта впоследствии могут быть целиком заархивированы, перенесены на другой компьютер или целиком удалены. Данные разных проектов не пересекаются, они абсолютно независимы.

Достаточно часто в одной задаче требуется произвести ряд различных расчетов, данные которых будут использоваться совместно. В SunWorld расчеты такого типа называются квестами (quest). Они, как и проекты, имеют краткое название, которое служит именем подкаталога внутри каталога проекта, а также развернутое описание. Данные разных квестов (рассчитанные профили, векторы моделей и т.д.) могут присутствовать в программе одновременно и совместно обрабатываться.

Интерфейсная страница проектов позволяет:

- ввести название и описание проекта;
- ввести название и описание квеста;

- открыть текстовый файл задания на расчет;
- запустить расчет и отслеживать ход его выполнения;
- просмотреть текстовый файл с результатами счета;
- загрузить результаты счета из архива текущего проекта, если эти результаты были получены ранее при предыдущих запусках комплекса SunWorld.

### **Подсистема рисования рассчитанных профилей**

Наиболее интересным результатом расчетов SunWorld являются графики профилей Стокса, которые можно визуально сравнивать с графиками, полученными экспериментально. При рисовании используется тот же принцип дисплейной программы, что и в случае графиков общего назначения, только программа выглядит по-другому (см. пример 5, где показана начальная часть дисплейной программы). Она не включает в себя команды, а содержит только поля данных, которые управляют генерацией отображения. Первая строка этой программы управляет общими параметрами всей картинке. Каждая последующая строка управляет генерацией отображения одного графика.

Пусть у нас есть задание на расчет (quest) с именем «Base» в виде, представленном в примере 4.

#### **Пример 4**

#### **Текстовый файл типичного задания на расчет системы SunWorld**

```
#INC default.dat # ! включает все значения по умолчанию
#MOD T SW = #      ! модель T = таблица SW = ШТЕЛЬМАХЕР-ВИР
                  1975г
#N 3000 #         ! напряженность поля
#GM 60 #         ! угол поля к лучу зрения
#LIN FE6137 FE6151 FE6213 FE6219 FE6265 FE6297 FE6335 FE6430 #
#RUN CONT #      ! команда запустить расчет методом Рунге-
                  Кутта
```

Тогда в качестве результата мы получим 8 записей в списке Lunno для 8 линий железа: по 4 профиля Стокса (RI, RV, RQ, RU) для модели фотосферы Stellmacher – Wiehr [14] для магнитного поля с напряженностью 3000 Гс и углом наклона силовых линий к лучу зрения

60°. Интерпретатор дисплейной программы генерирует представления профилей в графическом виде. Для этого он берет отображаемые данные не из текстового файла, а из размещенных в памяти SunWorld записей UNNO из списка LUNNO, а управляющие данные – из полей в строках дисплейной программы.

## Пример 5

### Фрагмент дисплейной программы для рисования профилей Стокса

```

24 O ! ЧислоКонтуров, ТипМасштаба (O = поле зрения целиком)
O Base 1 RI 0 2 34 63 98 250 80.00 $0 1 #LIN = FE6137
O Base 1 RV 0 34 66 63 98 250 40.00 $0 1 #LIN = FE6137
O Base 1 RQ 0 66 98 63 98 250 40.00 $0 1 #LIN = FE6137
O Base 2 RI 0 2 34 54 89 250 80.00 $0 1 #LIN = FE6151
O Base 2 RV 0 34 66 54 89 250 40.00 $0 1 #LIN = FE6151
.....
и т.д.

```

Поля каждой строки дисплейной программы имеют следующие назначения в порядке их следования:

- тип графика;
- имя квеста;
- номер записи Unno в списке Lunno для этого квеста;
- опция выбора между RI, RQ, RV, RU профилями Стокса;
- ширина сглаживающей гауссианы, позволяющей учесть макротурбулентную скорость и аппаратную функцию спектрограф;
- четыре поля – координаты поля зрения;
- два поля – размах графика в миллиангстремах ( $m\text{\AA}$ ) и интенсивности (%;
- цвет графика;
- номер кадра в случае мультиплицированного изображения;
- комментарий, поясняющий, что изображено на этом кадре.

Второе и третье поля – имя квеста и номер записи для этого квеста являются полями ключа, позволяющего выбрать конкретный рассчитанный профиль в списке Lunno.

**Интерфейсная страница для отображения профилей Стокса.** Отдельная страница интерфейса SunWorld позволяет открыть в

редакторе дисплейную программу, отредактировать ее и затем запустить интерпретатор дисплейной программы. Интерпретация приведет к генерированию изображения (см. рис. 4). На данной интерфейсной странице есть элементы управления, которые позволяют:

- перейти к редактированию дисплейной программы;
- запустить интерпретацию дисплейной программы, которая может генерировать как статическую картинку, так и мультфильм;

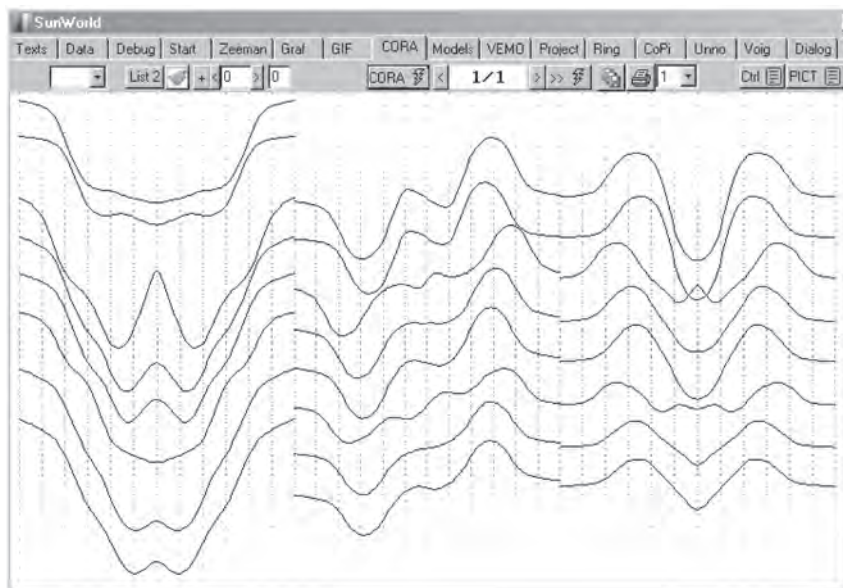


Рис. 4. Отображение профилей Стокса в окне системы SunWorld

- остановить или запустить снова мультфильм;
- перейти к следующему или предыдущему изображению мультфильма;
- вывести картинку или мультфильм в gif-файл;
- вывести текущую картинку на принтер.

**Страница для настройки вида графиков и генерации дисплейной программы для рисования профилей Стокса.** В 1990 г. в программном комплексе SW90 8 линий со сложным расщеплением рассчитывались более трех часов, ручное составление дисплейной

программы было вполне оправдано. В SunWorld профили считаются за секунды. Поэтому, чтобы достичь оперативности вывода графиков, дисплейная программа генерируется автоматически на специальной интерфейсной странице.

Важным понятием на этой странице является ось – то направление, вдоль которого располагаются профили с варьируемым параметром. В SunWorld используются оси X, Y (вдоль координат поля зрения) и ось T (когда картинки располагаются в анимируемой последовательности). По оси Y графики располагаются, как правило, с наложением. Параметр Tile = 100% (см. рис. 5 справа) означает расположение графиков бок-о-бок, при Tile = 20% (как на примере по шкале Y) верхняя кромка второго графика будет на уровне 20% первого и соседние графики перекроются на 80%. Вдоль оси T удобно располагать профили при небольшом шаге изменения какого-либо физического параметра. Кроме осей X, Y, T возможна еще ось C (colors), определяющая разные цвета для разных графиков, но на практике осей X, Y и T бывает достаточно для большинства задач.

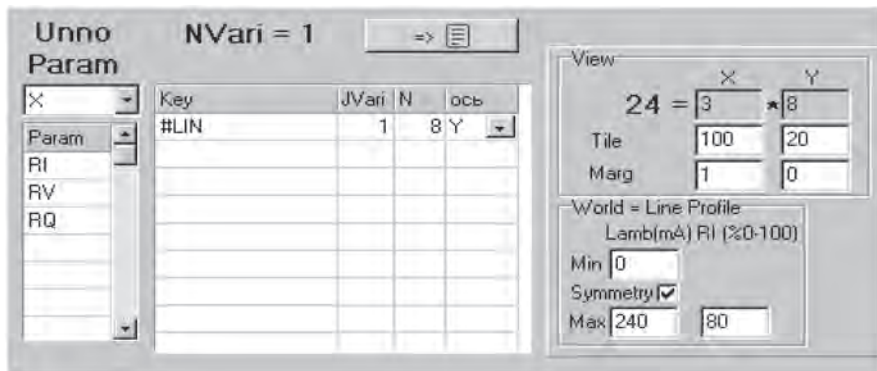


Рис. 5. Фрагмент интерфейсной страницы настройки вида графиков

Одно из полей страницы для автогенерации дисплейной программы (Param, см. рис. 5 слева) позволяет задать параметры Стокса, которые будут выводиться (RI, RQ, RU, RV, I+V, I-V, I+Q и т.д.), и количество этих параметров (в нашем примере – три), а также ось, вдоль которой они будут располагаться (в примере – ось X).

Следующее поле (Key) содержит список параметров расчета, которые варьируются. В нашем примере это всего один параметр – линия (#LIN), и мы выбираем его вариацию вдоль оси Y.

И, наконец, третье поле позволяет выбрать перекрытие (Tile) графиков по X, Y и отступ (Marg) в процентах от краев поля зрения, а также пределы (Max) профилей линий в «мировых координатах», в миллиангстремах (240), от центра линии до края графика и в процентах для шкалы интенсивностей. Восемьдесят процентов в случае RI будет соответствовать графикам от 100% до 20% остаточной интенсивности, а для RV, RQ, RU – от –40% до +40%.

Кнопка генерации создает дисплейную программу и записывает ее в файл (пример 5), который затем можно будет отредактировать или запустить в существующем виде на странице отображения профилей.

### Таблица интегральных параметров рассчитанных профилей

Помимо рассмотрения графиков профилей Стокса рассчитанных линий, часто возникает необходимость анализировать интегральные параметры профилей. Список рассчитанных профилей отображается в специальной таблице (рис. 6).

Idx	Quest	ID	KV	sVar	Cont	wI	wV	wQ	wU	V/W	dV
0	Base	1	1	#LIN=FE6137	34.048E+12	126.0492	45.63	49.11	8.62	0.3620	42.08
1	Base	1	2	#LIN=FE6151	34.091E+12	96.4321	37.62	42.57	7.87	0.3901	41.69
2	Base	1	3	#LIN=FE6213	34.266E+12	196.8834	43.01	32.44	10.89	0.2184	31.44
3	Base	1	4	#LIN=FE6219	34.281E+12	187.1269	40.34	31.94	8.94	0.2156	28.28
4	Base	1	5	#LIN=FE6265	34.401E+12	171.7743	40.40	33.45	8.47	0.2352	28.95
5	Base	1	6	#LIN=FE6297	34.482E+12	165.1642	33.15	15.73	6.12	0.2007	24.21
6	Base	1	7	#LIN=FE6335	34.571E+12	200.2881	36.03	20.80	6.37	0.1799	22.04
7	Base	1	8	#LIN=FE6430	34.774E+12	214.0797	36.82	23.48	5.65	0.1720	21.40

Рис. 6. Фрагмент таблицы интегральных параметров рассчитанных профилей

Эта таблица содержит число строк, равное числу рассчитанных профилей во всех quest (заданиях на расчет), и переменное число колонок. Видимыми постоянно на экране остаются те колонки, которые позволяют идентифицировать профили, остальные включаются или



выключаются группами. В колонках могут отображаться следующие интегральные параметры:

- эквивалентные ширины разных параметров Стокса;
- сигнал лямдаметра  $(\int V_\lambda \times (\lambda - \lambda_0) \times d\lambda) / W_r$ ;
- центральная и максимальная глубины линий  $D_{10}, D_{Max}$ ;
- длины волн первой и последней точек профилей;
- длина волны центра тяжести линии  $l_0$ ;
- смещение профилей (mÅ либо км/с относительно заданных линий сравнения;
- абсолютная ширина линии на заданном абсолютном или относительном уровне остаточной интенсивности линии и т.д. Колонки могут быть в любой момент добавлены, а их вычисление внесено в программу по мере необходимости.

На интерфейсной странице рядом с таблицей есть кнопка, позволяющая все содержимое таблицы в текстовом виде передать в окно текстового редактора. Далее данные могут быть сохранены в виде файла, отсортированы, по ним могут быть построены графики, проведены дальнейшие вычисления в Excel, составлен отчет.

### Список векторов моделей фотосферы

При каждом счете создается большое количество векторов распределения физических параметров с высотой в фотосфере. В первую очередь, это векторы на сетке глубин оригинальной модели или моделей, если рассчитываются профили для нескольких моделей. Затем это векторы, интерполированные на рабочую сетку расчета. Они подразделяются на векторы, общие для всей модели фотосферы (температура, напряженность поля, плотность и т.п.), и векторы, зависящие от того или иного параметра. Например, от длины волны  $\lambda$  зависит коэффициент непрерывного поглощения  $k_{5000}$ , от длины волны  $\lambda$  и косинуса гелиоцентрического угла  $\cos q$  – уровень непрерывного спектра  $I_{cont}$ , от линии зависят поглощение в центре линии  $h_0$ , параметр затухания  $a$ , от атома – суммы по состояниям  $U_0, U_1, U_2$  и т.д. Разбираться сразу во всем множестве векторов сложно, поэтому интерфейсная страница, кроме самого списка векторов, имеет дополнительные элементы, позволяющие отфильтровать векторы. Поставленные отметки

приводят к появлению соответствующих векторов в главной таблице, пропущенные – к сокрытию (см. рис. 7):

1. Поле выбора формата модели позволяет включать для просмотра оригинальные векторы ( $FMOD = 0$ ) и рабочие векторы ( $FMOD = 1$ ).

2. Поле Model, которое позволяет включать/выключать видимость векторов выбранных моделей фотосферы.

3. Поле sIdV (полный строковый идентификатор вектора) позволяет отбирать векторы, которые зависят от длины волны LAM, собственно линии LI (атомного перехода), от атома AT и от косинуса гелиоцентрического угла MJU.

Главная таблица содержит следующие важные поля:

- имя модели Model;
- имя вектора физического параметра VEMO;
- строку, определяющую параметры вектора sIdV;
- число слоев модели N;
- формат модели F (FMOD): 0 – оригинальный, 1 – рабочий;
- отметку Rep, включающую или выключающую режим вывода столбца данного вектора в отчет.

Остальные поля служебные. Они определяют параметры форматирования данных при выводе их в отчет, показывают порядок, в каком выполнен расчет векторов (поля Alg и Time), и т.д.

Не все возможные векторы порождаются в момент расчета профилей линий. На этот случай сделана кнопка CALC (посчитать) (см. 4 на рис 7.). Она расположена на интерфейсной странице рядом с полем выбора физического параметра, который требует расчета (это, например,  $h$  – высота в километрах,  $z$  – масса столба газа над текущим уровнем,  $dS/dt$  – градиент функции источников и т.д.). Сначала нужно выбрать физический параметр, а затем посчитать его, добавив его таким образом к набору имеющихся векторов.

Наиболее интересный результат работы данной интерфейсной страницы – это вывод в одну таблицу данных одного и того же параметра для разных моделей фотосферы (пример 6). Здесь происходит сравнение геометрических глубин в километрах  $h$  для моделей тени SW75 [14] и невозмущенной фотосферы HOLMU [9]. Значения  $\lg(t)$ , соответствуют той модели, для которой вектор  $X = \lg(t)$  на интерфейс-

Id	R	F	N	Mo.	VEMO	sldV	Orde	T	Dig	Header	Time	Alg	Full sld
9	1	201	SW	X			100	N	3	lg(TAU)	19:47:45.551	1	SW741
10	1	201	SW	T			100	N	3	Temp	19:47:45.563	2	SW711
11	1	201	SW	LGPG			100	N	4	lg(Pg)	19:47:45.567	3	SW1LGP611
12	1	201	SW	LGPE			100	N	4	lg(PE)	19:47:45.571	4	SW1LGP611
13	1	201	SW	VMI			100	N	3	Vmic	19:47:48.279	5	SW7MI11
17	1	201	SW	H			100	N	0	H[Fc]	19:47:48.269	6	SW7H11
18	1	201	SW	GM			100	N	0	Gm	19:47:48.270	7	SW7GM11
19	1	201	SW	Xi			100	N	0	Xi	19:47:48.271	8	SW7MI11
20	1	201	SW	VD			100	N	3	VD	19:47:48.272	9	SW7VD11
21	1	201	SW	RD			10	N	4	density	19:47:48.277	10	SW7RD11
22	1	201	SW	NHPNH			100	L	4	nH+/nH	19:47:48.273	11	SW1NHPNH11
23	1	201	SW	NHMNH			100	L	4	nH-/nH	19:47:48.274	12	SW1NHMNH11
24	1	201	SW	NH			100	L	4	NH	19:47:48.275	13	SW1NH11
25	1	201	SW	NHM			100	L	4	NH-	19:47:48.276	14	SW1NHM11
26	1	201	SW	KAP5			100	N	5	KAP5	19:47:48.278	15	SW7KAP511
27	1	201	SW	KATOMP			100	L	4	k.Tomps	19:47:48.283	16	SW7KATOMP11
42	1	201	SW	U0	AT=FE		100	N	3	U0_FE	19:47:45.863	31	SW7U011AT=FE
43	1	201	SW	U1	AT=FE		100	N	3	U1_FE	19:47:45.864	32	SW7U111AT=FE
44	1	201	SW	U2	AT=FE		100	N	3	U2_FE	19:47:45.865	33	SW7U211AT=FE

Рис. 7. Интерфейсная страница, которая позволяет выбрать из всего множества векторов необходимые для просмотра и анализа векторы. Пояснения см. в тексте

ной странице (рис. 7) выбран первым. В левой части приведена сетка глубин модели HOLMU, в правой – модели SW75.

Таким образом происходит сопоставление текстовых таблиц для числового сравнения разных моделей. Менее точный, но более наглядный способ сравнения моделей – это графический способ.

### Пример 6

#### Два сравнения геометрических глубин в фотосфере для моделей тени пятна и невозмущенной фотосферы на сетках глубин обеих моделей

lg(Tau)	h(SW75)	h(HOLMU)	lg(Tau)	h(SW75)	h(HOLMU)
-6.539	666.36	1026.16	-4.00	402.30	535.44
-6.279	639.32	929.56	-3.80	381.00	508.93
-5.868	596.57	828.57	-3.60	360.30	482.71
-5.588	567.45	773.07	-3.40	339.90	456.71
-5.334	541.04	728.76	-3.20	319.70	430.76

-5.001	506.40	675.92	-3.00	299.80	404.80
-4.747	479.99	638.22	-2.80	280.00	378.88
-4.486	452.84	601.31	-2.60	260.30	353.05
-4.131	415.92	552.95	-2.40	240.70	327.17
-3.856	386.89	516.33	-2.20	221.10	301.08
-3.577	357.94	479.71	-2.00	201.60	274.75
-3.200	319.70	430.76	-1.80	181.90	248.20
-2.912	291.08	393.39	-1.60	162.20	221.34
-2.621	262.36	355.76	-1.40	142.40	193.98
-2.233	224.33	305.40	-1.20	122.50	166.05
-1.939	195.61	266.68	-1.00	102.50	137.71
-1.645	166.64	227.42	-0.80	82.30	108.89
-1.256	128.08	173.92	-0.60	62.00	79.64
-0.961	98.58	132.14	-0.40	41.50	51.41
-0.571	59.05	75.43	-0.20	20.70	24.63
-0.371	38.49	47.50	0.00	0.00	-0.00
-0.133	13.76	15.85	0.20	-20.70	-21.30
0.019	-1.97	-2.12	0.40	-40.60	-39.78
0.191	-19.78	-20.39	0.60	-59.40	-55.17
0.312	-31.99	-32.10	0.80	-78.60	-69.93
0.597	-59.12	-54.95	1.00	-99.40	-86.68
0.761	-74.67	-66.97	1.20	-115.60	-106.22
0.877	-86.70	-75.99	1.40	-126.20	-128.05
0.967	-96.13	-83.67	1.60	-133.20	-151.53

### **Построение графиков физических параметров векторов моделей фотосферы**

Отдельная страница интерфейса предназначена для рисования векторов моделей фотосферы (см. рис. 8).

Два ряда управляющих элементов позволяют задать два одновременно отображаемых вектора. Управляющие элементы позволяют выбрать (см. рис. 8): 1 – модель, 2 – сетку глубин (0 – оригинальную, 1 – рабочую), 3 – вектор по его имени, 4 – параметры вектора. Отметка **Orig** позволяет выводить значения, привязанные к уровням глубин исходной модели фотосферы, тогда как без отметки выводятся значения, интерполированные сплайнами. Последние два параметра задают цвет графика и форму точек. Если необходимо, можно выводить графики, не стирая предыдущие, таким образом представляя их на экране в любом количестве.

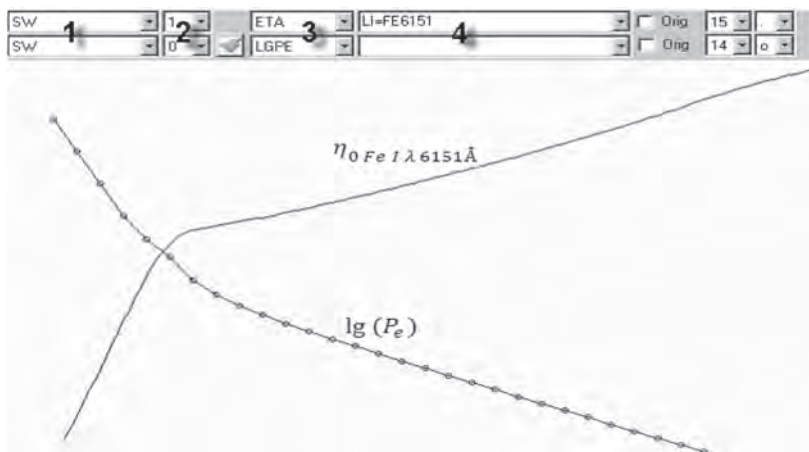


Рис. 8. Интерфейсная страница для отображения пары векторов моделей фотосфер. Пояснения см. в тексте

По оси X можно располагать не только вектор логарифма оптической плотности  $\lg(t)$ , но и вектор геометрических глубин  $h$ .

Представляет интерес сравнение графиков одного и того же параметра двух разных моделей. Например, на рис. 9 приведены графики зависимости  $\lg(t)$  от  $h$  для моделей фотосферы SW75 [14] и HOLMU [9].

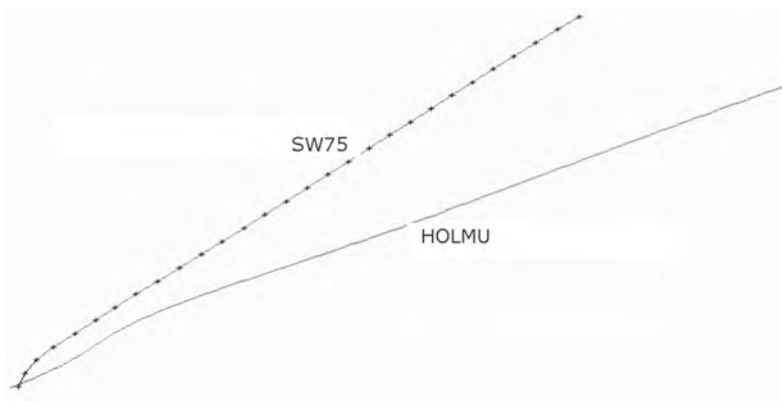


Рис. 9. Сравнение графиков зависимости  $\lg(\tau)$  от  $h$  для двух моделей фотосферы



Рис. 10. Пример модификации вектора логарифма электронного давления

Запрограммирована возможность накладывать возмущения на векторы (см. рис. 10) и пересчитывать после этого профили линий. В планах дальнейшего развития SunWorld объединение интерфейсных страниц, где возмущения будут накладываться прямо в графическом диалоге и отображаться на одном экране вместе с измененными графиками профилей Стокса.

### Страница диалогового подбора параметров расчета

Одной из типовых задач для программ, подобных SunWorld, является подбор таких физических параметров расчета, которые позволят наилучшим образом описать наблюдаемые профили Стокса. Обычная методика SunWorld заключается в том, чтобы рассчитать, а затем отобразить множество профилей Стокса для матрицы значений входных параметров, чтобы были видны области соответствия (которых может быть много) набора входных параметров экспериментальным профилям. Однако для типовых задач, где область соответствия уже определена, требуется только делать тонкий подбор наилучших параметров. В этом случае более оперативной оказывается работа в диалоге.

На рис. 11 приведена страница диалогового подбора параметров расчета. Она позволяет изменять ряд параметров с помощью ползунков на шкалах и менять масштаб этих шкал. В задании на расчет задаются параметры, которые будут варьироваться. Профили сравнения

VMI	1.380	<>	2.0	<<	>>	0	<>	3
DABLND	-0.06800	<>	2.0	<<	>>	-0.2	<>	0.2
EWAN	0.995	<>	2.0	<<	>>	0.5	<>	2.0
VMA	3.700	<>	2.0	<<	>>	1.0	<>	6.0

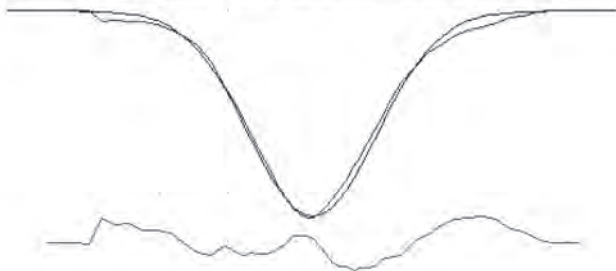


Рис. 11. Пример диалогового подбора параметров расчета, при котором разность наблюдаемого и расчетного профилей (нижняя кривая) минимизируется для всего участка длин волн исследуемой линии

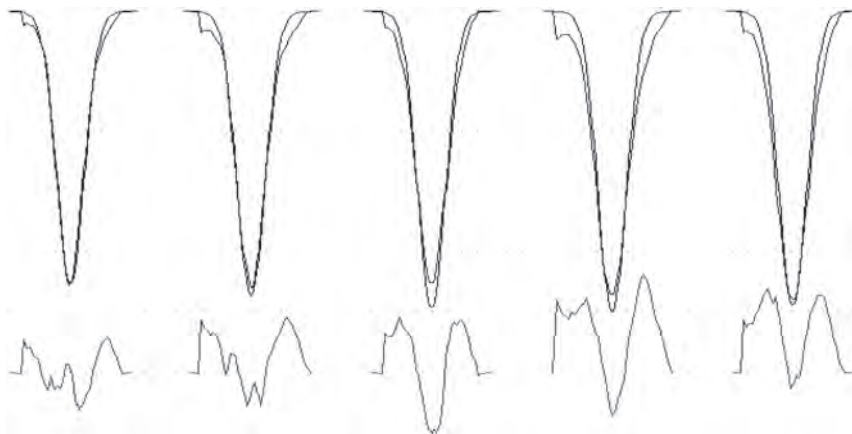
загружаются с помощью ранее запущенного или вложенного задания – Quest (именованного расчета).

На рис. 11 приведен профиль линии FeI  $5757.26 \text{ \AA}$  мультиплета 1184 из книги Гуртовенко с соавт. [2], параметры расчета для модели HOLMU [9] и алгоритма Рунге–Кутты, которые позволяют наилучшим образом совместить расчетный профиль с наблюдаемым. Верхние перекрывающиеся графики – это наблюдаемый и расчетный профили, нижний график – их разность.

Параметры могут быть общими для ряда профилей, например для профилей одной и той же линии при разных значениях гелиоцентрического угла. В этом случае можно подбирать одновременно ряд профилей (рис. 12):

На рис. 12 профили той же линии FeI  $5757.26 \text{ \AA}$  даны для пяти значений косинуса гелиоцентрического угла: 1,0; 0,8; 0,6; 0,44; 0,28.

Режим диалогового расчета отличается от всех рассмотренных ранее тем, что его профили не запоминаются в списке рассчитанных профилей Lunno, его профиль (или набор профилей в случае их одновременного расчета) каждый раз меняется при смещении ползунков регуляторов.



*Рис. 12.* Пример одновременного подбора параметров расчета для совокупности профилей, заданных на разных расстояниях от центра солнечного диска

### *ТИПОВЫЕ ПРИМЕРЫ ЗАДАЧ, ВЫПОЛНЯЕМЫХ SUNWORLD*

Среди характерных задач, выполняемых с помощью SunWorld, опишем следующие:

- расчет профилей Стокса отдельно взятых спектральных линий для построения набора графиков и (или) интегральных параметров профилей для сетки (матрицы) значений параметров фотосферы, параметров расчета;
- расчет для участка длин волн, включающего все возможные в этом диапазоне атомные линии;
- расчет для списка линий, выбранных из БД;
- расчет физических величин для разных глубин фотосферы;
- восстановление газового и электронного давлений по известному температурному распределению;
- вычисление глубин образования интенсивностей, лучевых скоростей, напряженности поля в линиях;
- режим расчета профилей слой за слоем.



## Расчет профилей Стокса для сетки значений параметров фотосферы

Расчет профилей Стокса для отдельных линий для сетки значений параметров фотосферы – это наиболее частый, наиболее обычный способ работы SunWorld. Предполагается, что имеется профиль или набор профилей, полученных экспериментально. Требуется исследовать множество физических параметров, чтобы выяснить ту их комбинацию, которая соответствует условиям в фотосфере, при которых возник этот наблюдаемый профиль или профили. Например, на рис. 13 показан подбор угла наклона силовых линий к лучу зрения (значения 15, 30, 45 и 75°) для двух линий циркония  $Zr\text{I } l\ 6127\ \text{\AA}$  и  $l\ 6143\ \text{\AA}$  для модели тени SW75 [14].

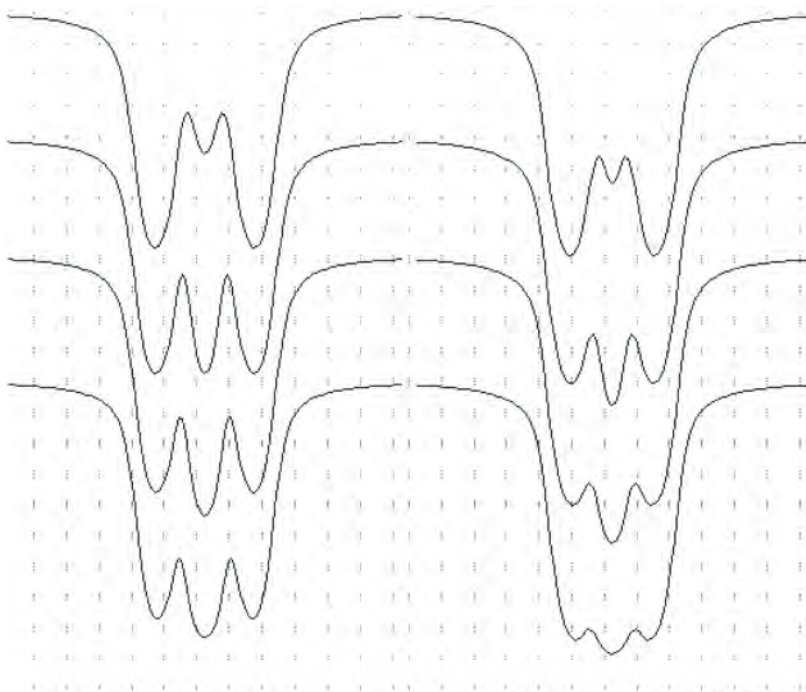


Рис. 13. Основной типовой режим работы SunWorld – расчет профилей Стокса для матрицы (сетки) значений варьируемых параметров

В этом же примере расчета варьируются также и напряженность поля от 1000 до 3200 Гс – всего 23 значения с шагом 100 Гс. Этого не видно на рис. 13. Просмотр такого количества профилей делается по «третьему измерению» – анимированной (мультиплицированной) последовательности, которую можно увидеть в самой программе SunWorld или вывести в анимированный gif-файл.

### Расчет для участка длин волн

Если моделируется участок спектра, особенно для фотосферы, относящейся к тени пятна, то линии часто перекрываются, блендируя друг друга. Наличие базы данных атомных линий и специальный режим расчета позволяют учесть взаимные наложения и рассчитать спектр с учетом бленд.

Например, если в задание на расчет вместо обычного задания единичной линии (пример 7а) включить строки (пример 7б), то программа автоматически включит в расчет все линии списка из примера 8 и в результате расчета получится рис. 14а. Здесь профили рассчитаны для модели невозмущенной фотосферы HOLMU – RI и модели тени SW75 – RI и RV профили для поля с напряженностью 3000 Гс. На рис. 14б представлен тот же участок спектра для невозмущенной фотосферы и для тени крупного пятна.

#### Пример 7а

```
#LIN CA6102 # ! идентификатор линии (ЭЛ-Т + дл.волны)
#DLK 240. # ! DLK : ДЕЛЬТА_ЛЯМБДА_КОНЕЧНОЕ
#NLAM 61 # ! NLAM : число точек на половине профиля
```

#### Пример 7б

```
#LAM_L 6102.000 # ! в расчет входят все линии,
#LAM_U 6103.440 # ! какие есть в БД на данном отрезке
#LAMB 6102.720 # ! дл.волны, для к-рой рассчит-ся
! уровень непрерывного спектра
#NLAM 361 # ! число точек профиля = 1.040/0.004(шаг) + 1
```

#### Пример 8

```
LAMB E_low lg(gf) J_l J_u g_l g_u
SI I 6102.136 5.984 -2.120 3 3 0.000 0.000
```

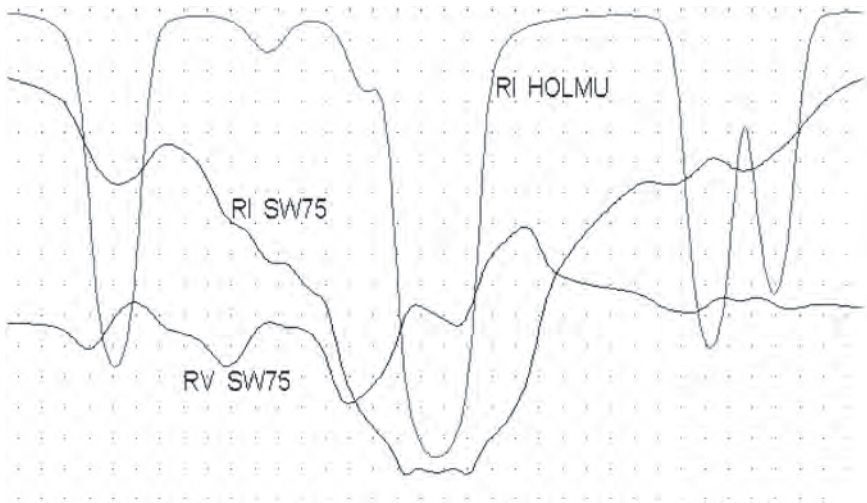


Рис. 14а. Расчет профилей Стокса I и V для участка спектра, включающего ряд линий для моделей тени HOLMU 1974 и SW75



Рис. 14б. Фотография того же участка спектра, что на рис. 14а, в области тени (внизу) и невозмущенной фотосферы (вверху)

```

FE I 6102.180 4.830 -0.657 0 1 0.493 0.676
CR II 6102.262 6.285 -2.877 5/2 3/2 0.857 0.819
FE I 6102.268 5.348 -3.962 3 3 0.905 1.644
SI I 6102.408 5.984 -2.800 3 2 0.000 0.000
CA I 6102.439 2.523 -2.805 2 1 1.162 1.010
TI II 6102.542 8.116 0.178 7/2 9/2 1.294 1.007
FE I 6102.599 4.584 -2.249 3 3 1.083 1.109
V I 6102.706 3.245 -0.751 9/2 9/2 1.230 1.610
RH I 6102.706 1.578 -1.170 9/2 11/2 0.000 0.000
CA I 6102.723 1.879 -0.890 0 1 0.000 2.002
TI I 6102.808 1.873 -2.317 3 4 0.740 1.050
CR I 6102.914 4.416 -3.006 1 0 1.501 0.000
FE I 6103.185 4.835 -0.764 1 1 0.493 1.459
FE I 6103.293 4.733 -1.117 3 4 1.324 0.871
SM I 6103.395 1.624 -0.216 6 5 0.000 0.000

```

### Расчет для списка линий, выбранных из БД

В ряде задач возникает необходимость расчета большого числа линий, например, в задаче расчета всех линий в заданном диапазоне длин волн или в задаче сравнения температурной чувствительности линий двух элементов и т.п. Для таких задач предусмотрен автоматический выбор линий для расчета из базы данных по нескольким критериям отбора.

Например, если включить в задание на расчет строки из примера 9а, то будут посчитаны профили для списка линий (пример 9б).

#### Пример 9а

```

#$LINLIST 1 # ! включить список линий с фильтром и сортировкой
#LINLIST_FILTER (LAMB>6100) AND =
                (LAMB<6200) AND =
                (Atom = 'FE') AND (NIon = 2) AND(WHM>1) #
#LINLIST_SORT ELow ASC = #

```

#### Пример 9б

AT	LAMB	mult	Elow	J_lo	J_up	W_ph	D_ph	W_HM	W_SW	lg(gf)
FE2	6129.700	46	3.20	0	1	5.50	4.4	5.01	0.03	-4.655
FE2	6113.329	46	3.22	7/2	5/2	12.00	11.1	13.35	0.09	-4.211
FE2	6150.098	.	3.22	7/2	7/2	.	.	3.88	0.02	-4.754
FE2	6116.057	.	3.23	5/2	3/2	.	.	4.36	0.03	-4.691
FE2	6141.033	.	3.23	5/2	5/2	.	.	1.75	0.01	-5.104

FE2	6147.741	.	3.89	3/2	1/2	.	.	45.94	0.41	-2.721
FE2	6149.249	74	3.89	1/2	1/2	40.30	34.7	45.74	0.41	-2.789
FE2	6199.181	.	5.57	7/2	5/2	.	.	1.33	0.00	-3.191
FE2	6179.380	163	5.57	0	1	5.10	3.4	4.84	0.01	-2.769
FE2	6103.496	.	6.22	5/2	5/2	.	.	3.79	0.00	-2.171
FE2	6175.146	.	6.22	7/2	7/2	.	.	5.56	0.00	-1.983

### Расчет физических величин для разных глубин фотосферы

При расчете профилей линий автоматически вычисляются как промежуточные данные многие физические параметры для набора (вектора) глубин в фотосфере. Если необходим анализ какого-то дополнительно параметра, который не нужен для процесса расчета линий, то он может быть отдельно специально вычислен. Так, например, для загруженной модели фотосферы можно вычислить геометрические глубины в километрах  $h$ . Тогда при построении графиков зависимостей параметров фотосферы от глубины в качестве оси абсцисс можно использовать геометрическую глубину  $h$  вместо  $\lg(t)$ , что физически более наглядно. Другой физический параметр, который не вычисляется в процессе расчета профилей линий, – это важный для понимания процесса формирования излучения в линии параметр  $dS/dt$ .

На рис. 15 в качестве иллюстрации приведем графики зависимостей  $T(h)$  и  $dS/dt(h)$  для модели HOLMU [9].

### Восстановление газового и электронного давлений по известному температурному распределению

Специальный случай расчета физических величин в фотосфере – это восстановление зависимостей  $P_g(t)$  и  $P_e(t)$  по известному распределению  $T(t)$  по формулам гидростатического и ионизационного равновесий. Такой расчет необходим в двух случаях: когда для модели известно только температурное распределение, когда модель построена как производная от известной модели путем изменения величины  $\Theta = 5040/T$  на  $D \Theta$  на всех оптических глубинах.

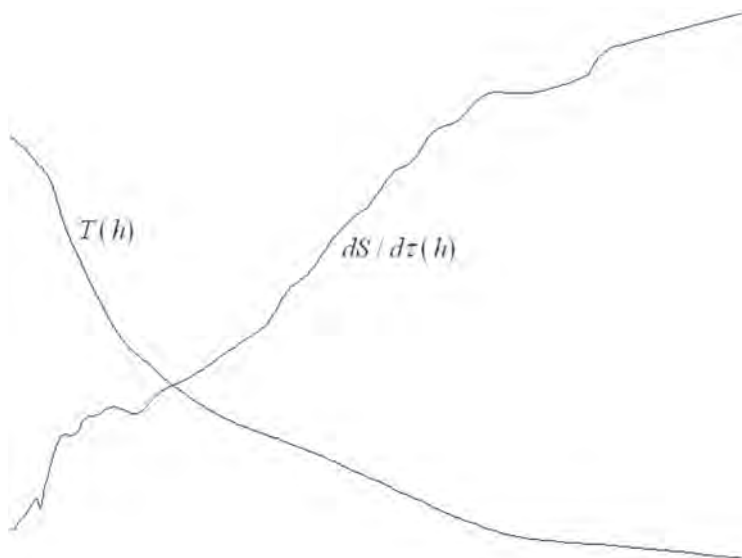


Рис. 15. Пример использования шкалы геометрических глубин  $h$  для шкалы  $X$  вместо обычного  $\lg(\tau)$  и расчет физической величины  $dS/d\tau$ , не требуемой при обычном расчете профилей Стокса

Проверочный расчет для модели HOLMU показывает, что восстановленные значения  $P_g(t)$  и  $P_c(t)$  практически совпадают с исходными.

### **Вычисление глубин образования интенсивностей, лучевых скоростей, напряженности поля в линиях**

Комплекс SunWorld не включает в себя аналитических формул для вычисления функций вклада в интенсивность, в лучевые скорости и т.п. Тем не менее расчет эффективных глубин образования тех или иных свойств излучения возможен. Для этого используется идея «пробного слоя» [4]. В узком слое от  $t$  до  $t + Dt$  мы меняем существенным образом свойства фотосферы и смотрим, какой эффект это произведет на профиль линии: сравниваем исходный профиль, полученный для невозмущенной фотосферы, с новым, измеряя величину изменения профиля в процентах. Прогоняем «пробный слой» по всем

глубинам и строим распределение вкладов по глубине. Так как вклад пробного слоя пропорционален его ширине, то для пробных слоев с постоянной шириной в шкалах  $t$ ,  $\lg(t)$  и  $h$  (км) кривые распределения вкладов и положения их максимумов на шкале глубин будут отличаться. Однако глубина, на которой суммарное возмущение от нижней половины фотосферы  $S_1$  равняется суммарному возмущению от верхней половины  $S_2$ , будет одной и той же для всех шкал, поэтому ее можно принять за эффективную глубину образования  $[\lg(t)]_{eff}$  тестируемого физического параметра.

Для расчета пробного слоя алгоритм расчета пришлось модифицировать: на границах пробного слоя шаг интегрирования должен обязательно останавливаться, чтобы до и после границы не возникало за счет интерполяции промежуточных относительно скачка значений.

На рис. 16 представлено изменение (%) эквивалентной ширины линии NiII  $16767.768 \text{ \AA}$  при последовательном прохождении по всем

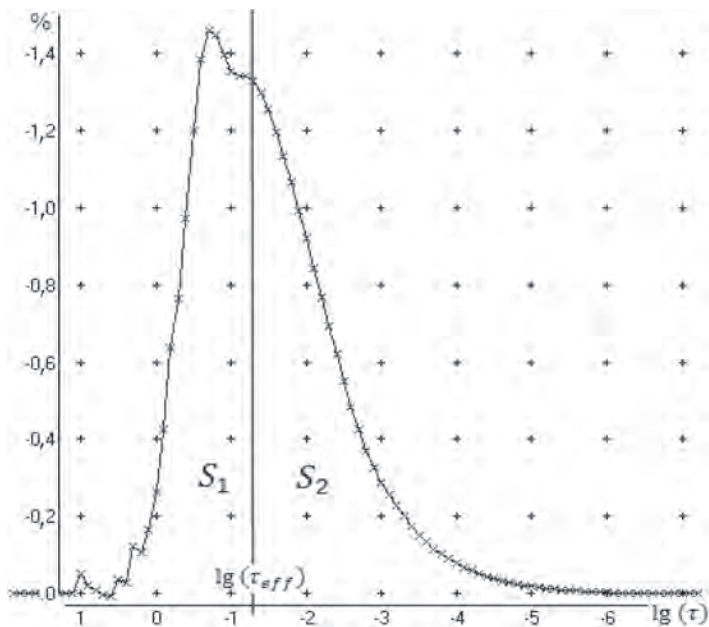


Рис. 16. Изменение эквивалентной ширины % при перемещении «пробного» слоя шириной  $0,1 \cdot \lg(\tau)$ , в котором обнуляется значение  $\eta_0$  для линии NiII  $\lambda 6767.8 \text{ \AA}$

глубинам пробного слоя шириной  $0,1 \cdot \lg(t)$ , в котором значение  $h_0$  линии заменялось на нулевое значение.

Как видно, данный метод показывает даже такие детали (см. зубцы на графике рис. 16), как ошибки из-за интерполяции температуры исходной модели HOLMU 1974 [9].

Для определения глубины образования лучевых скоростей пробному слою приписываем постоянное значение лучевой скорости, например 3 км/с, тогда как на всех остальных участках оставляем лучевую скорость равной нулю. Эффект воздействия можно оценивать разными способами: по смещению центра тяжести всего профиля, по поведению бисектора, по рассчитанному сигналу лучевой скорости, который бы выдал магнитограф, если бы излучение поступило на его вход и т.п.

Для определения функции вклада в интенсивность удобно приписывать пробному слою нулевое значение  $h_0$  – отношения коэффициента поглощения в центре линии к поглощению в континууме. Эффект воздействия можно оценивать разными способами – сравнивая эквивалентные ширины, центральные глубины или относительные глубины точек профиля в произвольных его частях.

### **Режим расчета профилей слой за слоем**

Обычно в алгоритме Рунге–Кутта профили считаются по точкам. Сначала вычисляется центральная точка из самых глубин до поверхности, затем следующая и так до крыла линии. Это экономит время расчета, так как в центре линии поглощение велико, и начинать интегрирование можно от достаточно высоко расположенных слоев, но с мелким шагом, а в крыле, напротив, начинать нужно из глубин, но шаг интегрирования выбирается (это делается автоматически) намного реже.

В алгоритмах SunWorld есть вариант, когда расчет ведется для всего профиля сразу и принудительно останавливается после каждого элементарного шага по  $t$ . В момент остановки можно имитировать рассеяние – перераспределение энергии по частотам. Если вести расчет не для одного направления распространения излучения, а для набора значений углов, то можно имитировать перераспределение энергии по направлениям.



Таким образом, достаточно установить коэффициенты таких перераспределений, чтобы учесть рассеяние, не применяя громоздких и сложных формул.

### *ВОЗМОЖНЫЕ УСОБЕРШЕНСТВОВАНИЯ SUNWORLD*

Программный комплекс SunWorld – это универсальная лаборатория, которая воспроизводит большинство деталей процесса формирования солнечного излучения.

Результаты будут более полными, если решить следующие проблемы или приложить к SunWorld следующие данные, которых мы пока не имеем:

- идентификация атомных линий;
- учет линий молекул;
- учет рассеяния в линиях;
- учет отклонений от ЛТР;
- анизотропные модели турбулентных скоростей;
- сшивка с программами расчета многокомпонентных моделей.

Рассмотрим их.

*Идентификация атомных линий.* Существующая в SunWorld база данных могла бы автоматически накопить описание всех атомных линий, которые играют хоть какую-то роль в солнечном излучении. Этому мешает отсутствие единого описания всех уровней каждого из атомов, из-за чего линии, введенные из разных источников, могут дублироваться.

*Учет линий молекул.* В комплекс SunWorld необходимо добавить алгоритм расчета профилей молекулярных линий, а также новый тип записей для БД, описывающий свойства молекулярных линий. Также необходимо заполнить в БД список молекулярных линий. Это особенно существенно для воспроизводства спектров тени пятен.

*Учет рассеяния в линиях.* Расчет профилей для моделей невозмущенной фотосферы при различных гелиоцентрических углах показывает систематические различия расчетных и наблюдаемых профилей. Очевидно, что причина различий делится на две части: анизотропия турбулентных движений и пренебрежение рассеянием в линиях.

Корректно смоделировать турбулентные скорости в фотосфере невозможно до тех пор, пока не решен вопрос о рассеянии.

*Учет отклонений от ЛТР.* Действующий вариант уравнений переноса излучения в параметрах Стокса комплекса SunWorld находится в близком соответствии с формулами E. Landi Degl'Innocenti [12]. В этих формулах есть множители, задающие отклонения от ЛТР. Но отсутствуют формулы или таблицы данных для расчета самих множителей. По этой причине SunWorld пока не может рассчитывать линии, образующиеся в хромосфере, подобные линиям H и K Ca II.

*Анизотропные модели турбулентных скоростей.* Фотосфера состоит из совокупности ячеек с газом, движущимся внутри них с неравномерными скоростями в разных направлениях. Очевидно, что, прежде чем моделировать сложную многокомпонентную фотосферу, на очередном шаге нужно сначала построить однородную модель с анизотропными турбулентными скоростями.

*Сшивка с программами расчета многокомпонентных моделей.* Комплекс SunWorld может рассчитывать профили линий для многих наборов параметров, например для моделей разных компонент (гранулы, межгранульные промежутки и т.п.), а затем складывать рассчитанные профили. Однако эти разные компоненты нужно сначала смоделировать. Данную задачу SunWorld не решает.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гадун А.С., Шеминова В.А. SPANSAT: Программа расчета профилей спектральных линий поглощения в звездных атмосферах в ЛТР приближении // Препр. ИТФ АН УССР. 1988. ИТФ-88–87Р 37 с.
2. Гуртовенко Э.А., Костык Р.И., Орлова Т.В., Троян В.И., Федорченко Г.Л. Профили избранных фраунгоферовых линий для разных положений центр–край на диске Солнца // Киев: Наук. думка, 1975. 222 с.
3. Кац И.М. Методика численного интегрирования уравнений переноса для магнитоактивных линий нерассеивающих сред // Исслед. по геомаг. аэронамии и физике Солнца. 1973. Вып. 28. С. 67–76.
4. Можаровский С.Г. Метод пробного слоя в расчете функций вклада и отклика. // «Солнечная и солнечно-земная физика 2012». Тр. Всерос. ежегодной конф. по физике Солнца. СПб., 24–28 сентября 2012.
5. Можаровский С.Г. Расчет профилей Стокса для моделей тени и фотосферы Солнца – структуры данных и виды расчетов программы SunWorld // «Солнечная

и солнечно-земная физика 2012». Тр. Всерос. ежегодной конф. по физике Солнца. СПб., 24–28 сентября 2012.

6. Рачковский Д.Н. Эффекты магнитного вращения в спектральной линии // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. 1962. Т. 28. С. 259–270.

7. Фоли Дж., Вэн Дэм А. Основы интерактивной машинной графики. В 2 кн. / под ред. Ю.М. Бояковского. М.: Мир, 1985. 368 с.

8. Auer L.H., Heasley J.N., Milkey R.W. A computational program for the solution of non-LTE transfer problems by the complete linearization method // Kitt Peak Natl. Obs. Contr. 1972. № 555.

9. Holweger H., Müller E.A. The photospheric barium spectrum: solar abundance and collision broadening of Ba II lines by hydrogen // Solar Phys. 1974. Vol. 39. P. 19–30.

10. Kupka F., Piskunov N., Ryabchikova T.A., Stempels H.C., Weiss W.W. VALD-2: Progress of the Vienna Atomic Line Data Base // Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 1999. Vol. 138. P. 119–133.

11. Kurucz R.L. Kurucz's Linelists. – <http://kurucz.harvard.edu/LINELISTS/GFHYP100/>

12. Landi Degl'Immacenti E. MALIP – a programme to calculate the Stokes parameter of magnetoactive Fraunhofer lines // Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 1976. Vol. 25. № 2. P. 379–390. Moore C.E., Minnaert M.G.J., Houtgast J. The solar spectrum from 2935 Å to 8770 Å // Second revision of Rowland's preliminary table of Solar spectrum wavelengths. Washington, 1966. 349 p.

13. Stellmacher G., Wiehr E. The Deep Layers of Sunspot Umbrae // Astron. Astrophys. 1975. Vol. 45. P. 69–76.