

## ИДЕЯ ТОЧНОГО МАГНИТОГРАФА,

## ОСНОВАННОГО НА СРАВНЕНИИ ШИРИН ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ ЦИРКОНИЯ

**Введение.**

Измерения полей в пятнах, сделанные на разных обсерваториях часто показывают систематическое различие. Это вызвано тем, что измерения полей связаны с применяемой методикой, зависят от многих допущений, которые различаются у разных исследователей.

В данной работе предлагается измерять абсолютное значение (не вектор) напряженности поля в пятнах сравнением ширин линий циркония мультиплета №2 Zr I  $\lambda\lambda$  6127, 6143 и 6134 Å. Эти линии близки по всем параметрам кроме фактора Ланде. В работе показано, что вариации условий в фотосфере тени заметно изменяют профили интенсивности линий, но мало воздействуют на соотношение их ширин.

Для измерений не нужна поляризационная оптика, что уменьшает аппаратные ошибки и повышает отношение сигнал/шум.

Связь между разницей ширин линий и напряженностью поля близка к линейной. При температурах невозмущенной фотосферы линии 2-го мультиплета циркония значительно ослабевают, что исключает влияние рассеянного света из фотосферы, а также позволяет измерять напряженность, относящуюся именно к холодной компоненте тени в случае, если атмосфера реально состоит из смеси компонент.

Таким образом, разместив в фокусе солнечного спектрографа три фотоприемных матрицы и обеспечив синхронную запись сигнала можно получить очень качественный магнитограф, предназначенный для измерения модуля напряженности поля в тени пятен. Сигнал такого магнитографа будет минимально зависеть от модельных допущений и вариаций физических условий в тени. Для обеспечений точности измерений 10 Гаусс и меньше требуется фиксировать уровень непрерывного спектра с точностью 14-битного АЦП.

**Материалы и методы.**

Чтобы доказать предложенную идею мы использовали два подхода:

1. Численный расчет образования профилей Стокса для заданных фотосферных моделей.
2. Анализ фотографических наблюдений спектра крупного солнечного пятна.

**Используемые линии.**

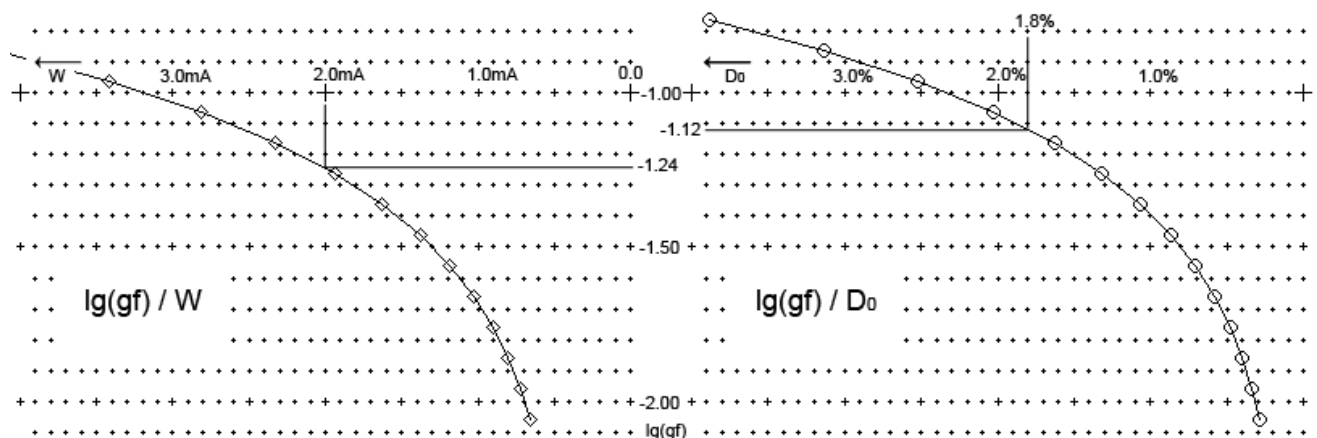
В расчетах и наблюдениях мы использовали линии циркония мультиплета №2, данные о которых сведены в следующей таблице:

линия	длина волны, Å	переход $J - J$	$E_{Low}$ , эВ	$G_{Low}$ (theor)	$G_{High}$ (theor)	$W$ , mÅ	$D_0$ , %	$\lg(gf)$ (G-K)	$\lg(gf)$ (calc)
ZR6127	6127.475	4 – 4	0.15	1.250	1.250	2.00	1.8	-1.06	-1.18
ZR6143	6143.183	3 – 3	0.07	1.083	1.083	1.70	1.6	-1.20	-1.24
ZR6134	6134.570	2 – 2	0.00	0.667	0.667	1.97	1.6	-1.24	-1.28

Отметим, что приведенные данные могут требовать уточнения, чтобы гарантировать точность в задаче измерения поля. Так, лабораторные факторы Ланде  $G_{Low/High}$  (labor) для мультиплета №2 циркония неизвестны, и могут отличаться от теоретических значений. Эквивалентные ширины  $W$  и центральные глубины  $D_0$  линий циркония в центре солнечного диска, а также силы осцилляторов  $\lg(gf)$  (G-K) взяты согласно данным, приведенным Гуртовенко, Костыком.

Чтобы проверить достоверность данных был сделан расчет  $W$  и  $D_0$  с помощью нашей программы для ряда значений  $\lg(gf)$ . Для вычислений взята модель Холвегер-Мюллер 1974, после расчета профили замывались профилем Гаусса, соответствующим макротурбулентной скорости 1.85 км/с, так же, как это указано в деталях расчета Гуртовенко-Костыка. Полученные усредненные для  $W$  и  $D_0$  значения приведены в таблице в колонке  $\lg(gf)_{(calc)}$ . Разница между расчетом Гуртовенко-Костыка и алгоритмом, используемым в настоящей работе, меньше, чем разница определения  $\lg(gf)$  по  $W$  и  $D_0$ . Тем не менее, для задачи измерения магнитных полей значения  $\lg(gf)$  требуют дальнейшего уточнения.

Как видно из рисунка определения  $\lg(gf)_{(calc)}$  для линии ZR6127, чтобы получить вариацию  $\lg(gf)$  на величину 0.1 необходимо менять эквивалентную ширину  $W$  достаточно существенно - от 1.8 до 2.2 мА. Это говорит о том, что отклонения полученных значений  $\lg(gf)$  на величину более 0.1 маловероятны.



## Наблюдения и фотометрия.

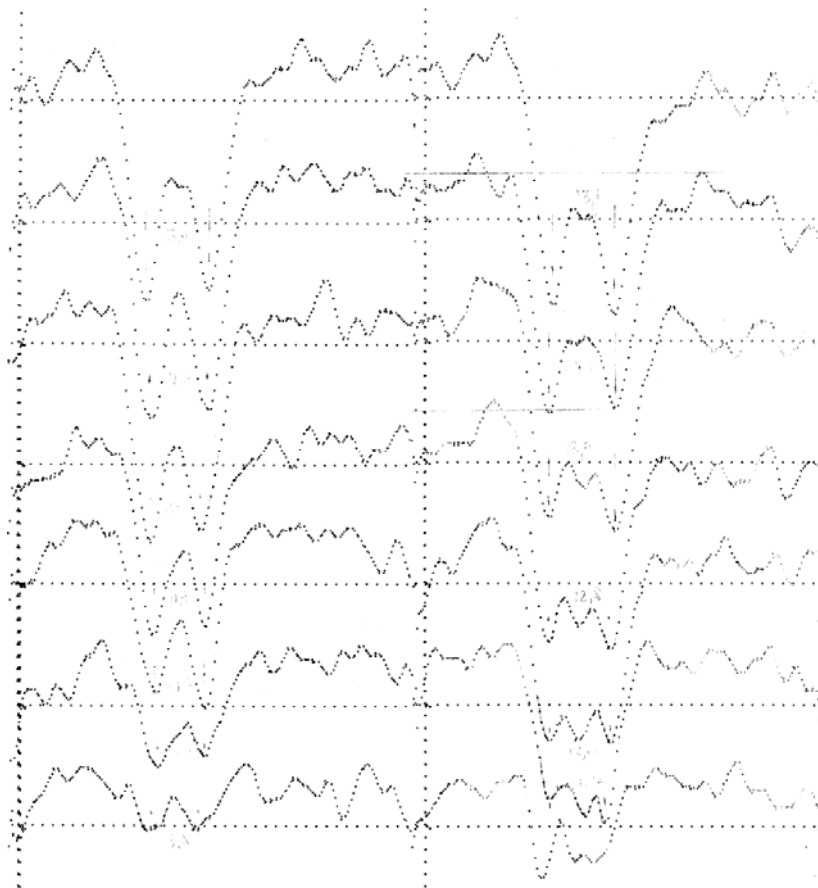
Для анализа выбрана серия наблюдений от 13.05.1985г UT 22h для пятна № 26 согласно бюллетеню "Солнечные данные". Площадь пятна  $S = 425$  м.д.п., напряженность поля 3100Гс, полярность S согласно патрульным наблюдениям в линии Fe I  $\lambda$  6302 А.

Наблюдения проводились на Уссурийской Астрофизической обсерватории (УАФО РАН) на телескопе АЦУ-5 со спектрографом АСП-20 в 4-м порядке дифракционной решетки с плотностью 600 штрихов/мм. Щель спектрографа составляла 0.040 мм, обратная дисперсия 2.5 мм/А. Размер изображения на щели 11.7 " / мм.

Теоретическая разрешающая способность  $R = \lambda / \Delta\lambda = 600 \cdot 150 \cdot 4 = 3600000$ , практическая  $R = 250000$  и, соответственно,  $\Delta\lambda$  для  $\lambda$  6130 А составляет около 25 мА.

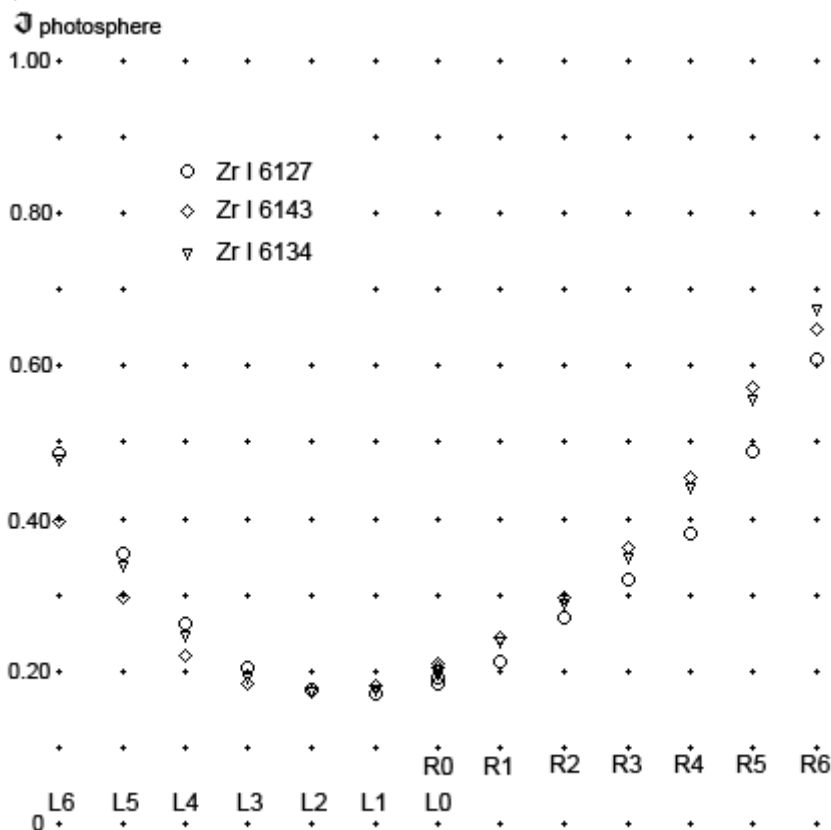
Наблюдения проводились фотографически без использования анализаторов поляризации. В серии 13.05.1985г получено 6 спектров в диапазоне  $\lambda\lambda$  6064-6173 АА., пленка Тип-17, экспозиция 1 с.

Фотометрия была проведена на микроденситометре АМД-1 [ин-та Солнечно-Земной физики, г.Иркутск](#) (СибИЗМИР) в 1986г. Для фотометрии использованы три спектрограммы с наилучшим изображением, результаты сохранены в виде нормированных графиков профилей линий.



На рисунке представлен пример фотометрической записи линии Zr I 6127. Верхние разрезы соответствуют центру пятна на спектрограмме, последующие – вверх и вниз с шагом 2" в сторону обеих полутеней. Шаг сетки осей соответствует 0.05 мм = 20 mÅ по горизонтали и 1% в шкале остаточных интенсивностей по вертикали.

Как видно из рисунка, проблему составляет корректное определение уровня непрерывного спектра, а также случайный шум.



На этом графике приведены уровни интенсивности непрерывного спектра разрезов L0-L6 (левая часть предыдущего рисунка сверху вниз) и R0-R6 (правая часть предыдущего рисунка).

Уровень непрерывного спектра достигает 0.18 интенсивности фотосферы, тогда как для модели SW75 интенсивность континуума равна 0.11, разность определяется светом, рассеянным в телескопе, спектрографе и фотоэмульсии. Типичная глубина расщепленных сигма-компонент триплета Zr I  $\lambda$  6127 Å составляет в наблюдениях 16%, тогда как в расчетах, как будет показано ниже, она равна 40% и заметно не меняется при изменениях

температуры модели. Это означает, что шкалу остаточных интенсивностей для наблюдаемых профилей надо растянуть примерно в  $40/16 = 2.5$  раза.

Для дальнейшей обработки для профилей находились ширины линий, которые затем сравнивались для пар ZR6127–ZR6134, ZR6143–ZR6134 и ZR6127–ZR6143.

## Численные расчеты.

Алгоритмы численного расчета профилей магнитоактивных линий разработаны давно и работают достаточно надежно. Если правильно задана модель фотосферы, то отклонения рассчитанных профилей от наблюдаемых составляют десятые доли процента в шкале относительных интенсивностей.

Исходные параметры расчета, задающие фотосферу и спектральную линию конкурируют. То есть, вариации разных параметров могут приводить к одинаковым изменениям профилей. Однако, зависимость вариаций профиля от вариаций одного выбранного параметра можно установить достаточно точно.

Используемые в работе уравнения переноса учитывают магнитное поле и аномальную дисперсию. На данный момент не учитывается рассеяние в линии и отклонения от ЛТР, не учитываются иные источники поглощения кроме отрицательного иона водорода. Расчет проводится методом Рунге-Кутты с переменным шагом.

Модели фотосферы используются однородные, плоско-параллельные. В них задаются распределение с глубиной температуры, газового и электронного давлений. Распределения газового и электронного давлений можно не задавать, в этом случае программа может их восстановить на основании уравнений ионизационного и гидростатического равновесий. Для моделей тени расчеты показывают практическое совпадение профилей, посчитанных по оригинальным и восстановленным значениям электронного и газового давлений. Могут быть также заданы распределения с глубиной микротурбулентной скорости, лучевой скорости и параметров магнитного поля.

## Результаты расчетов.

При первом взгляде на результаты численного расчета можно видеть хорошее соответствие результата предложенной идее. На рисунке приведены профили интенсивности  $RI$ , рассчитанные для следующих параметров:

модель фотосферы Stelmacher-Wiehr 1975, далее SW75

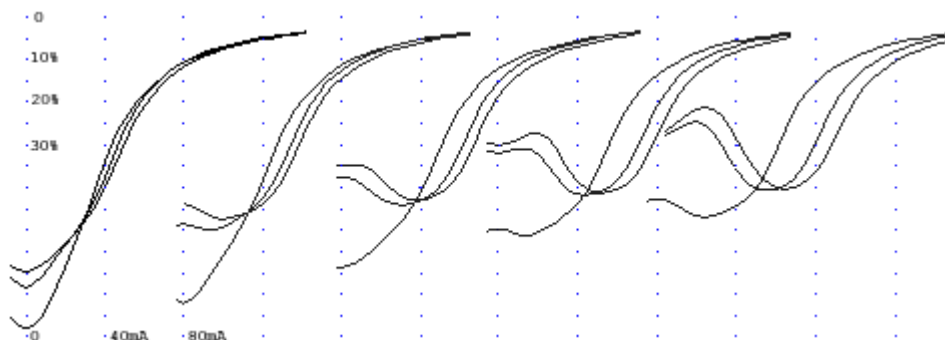
угла наклона поля к лучу зрения  $\gamma = 30^\circ$ ,

косинус гелиоцентрического угла  $\cos \vartheta = 1.0$ ,

поправка к затуханию Ван дер Ваальса  $E_{Wan-der-Waals} = 2.0$

микротурбулентные скорости  $\xi_t = 0.0$  км/с

напряженность поля  $H$  меняется от 1000 до 3000 Гс с шагом 500 Гс.



Из рисунка видно, что соотношение ширин линий примерно пропорционально напряженности поля. Остается выяснить численные значения и точность этого соответствия, а также его зависимость от разных физических параметров.

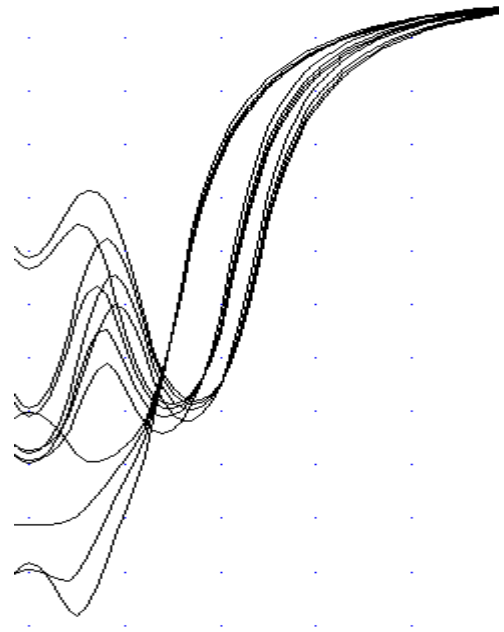
Микротурбулентные скорости в данном расчете выбраны  $\xi_r = 0.0$  км/с, а не 1.0 км/с как обычно принимается в таких случаях, чтобы обеспечить соответствие с наблюдательным материалом.

### Зависимость разности ширин линий от угла наклона силовых линий магнитного поля к лучу зрения $\gamma$

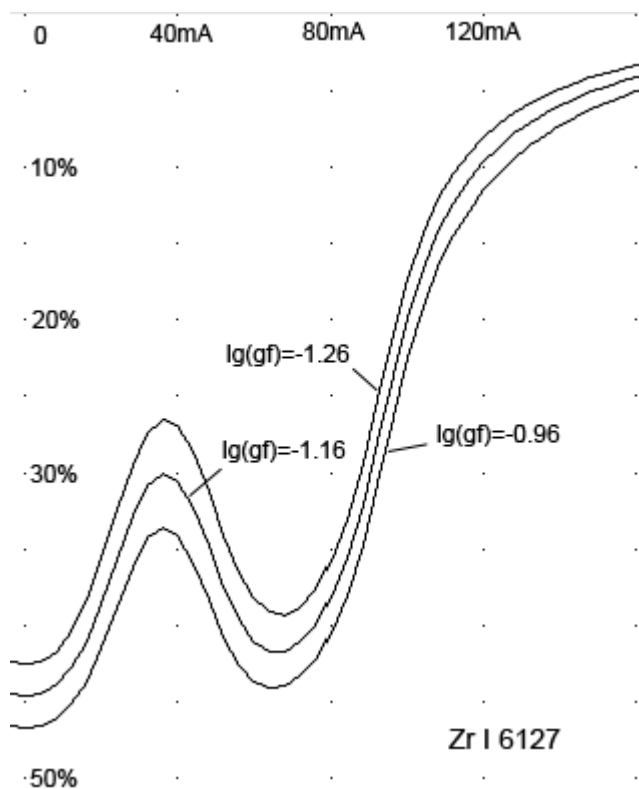
При попытке рассмотреть зависимость разностей ширин профилей от угла  $\gamma$  всё оказывается хорошо. Как видно, не только разности ширин, но и сами крылья профилей практически остаются на месте при вариациях  $\gamma$ .

На этом рисунке все параметры вычислений те же, что и на предыдущем, только напряженность поля имеет постоянное значение 3200 Гс, а угол  $\gamma$  меняется от  $15^\circ$  до  $75^\circ$ .

Сетка из точек на данном рисунке и всех других определяет масштаб графиков. Шаг сетки по горизонтали соответствует 40 мЕ, по вертикали соответствует 5%.



### Зависимость от точности определения сил осцилляторов $\lg(gf)$

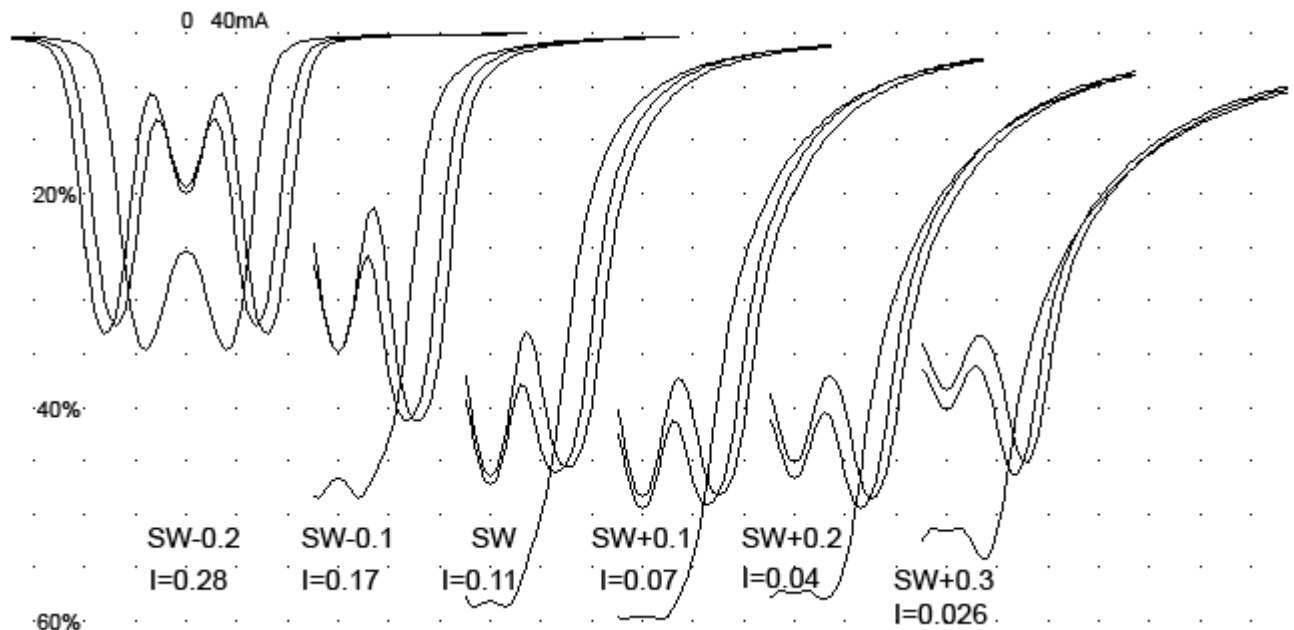


Заметим, что линии Zr I  $\lambda\lambda$  6127, 6143 и 6134 ЕЕ имеют определенный разброс в силах осцилляторов. Расчет для Zr I  $\lambda$  6127 Е зависимости этой линии от вариаций  $\lg(gf)$  показывает как изменение глубины линии около 2.5%, так и смещение крыла примерно на 3 мЕ при изменении  $\lg(gf)$  на величину 0.10, сопоставимую, с разностью  $\lg(gf)$  линий 2-го мультиплета циркония. На рисунке представлены профили для  $H=3200$  Гс и значений  $\lg(gf)$  -1.16, -1.06 и -0.96

Различие  $\lg(gf)$  в парах линий должно привести к постоянной составляющей в разнице между ширинами профилей интенсивности этих пар. Эту постоянную составляющую необходимо учитывать при обработке наблюдений.

## Зависимость от температуры фотосферной модели

Интересно посмотреть зависимость профилей от температуры. Для этого из модели Stelmaher-Wiehr 1975 (SW) был сделан набор моделей, для которых к температурному распределению на каждой оптической глубине была добавлена величина  $\Delta\Theta$  от -0.20 до +0.30 с шагом 0.10. Здесь  $\Theta = 5040/T$ . Газовое и электронное давления были пересчитаны для этих гипотетических моделей по формулам ионизационного и гидростатического равновесий. Температура первой модели из набора приближается к температуре полутени, третья модель – это собственно модель SW, а последующие – ещё более холодные. Модели  $\Delta\Theta +0.2$  и  $+0.3$  посчитаны для оценки тенденций, в реальных пятнах они невероятны.



Из рисунка видно, что профили циркония при температурах полутени не имеют протяженных крыльев, образованы из неискаженных профилей Гаусса, тогда как в холодных моделях примешивается профиль Лоренца. Если для первого на рисунке слева расчета пропорция ширины профилей сохраняется по всей глубине профилей, то для расчетов с присутствием явных лоренцевских крыльев, видны заметные отклонения.

Если представить профили линий, как наложение трех компонент, то сигма-компоненты в холодных моделях наложатся друг на друга своими крыльями. Перекрывание увеличит ширину профилей. Перекрывание больше в крыльях и больше для ZR6134, чем для ZR6127, т.к. компоненты ближе друг к другу. Поэтому различие ширины в крыльях (т.е. при остаточных интенсивностях  $R_r$  выше 90%) заметно уменьшится для моделей SW и SW+0.1.

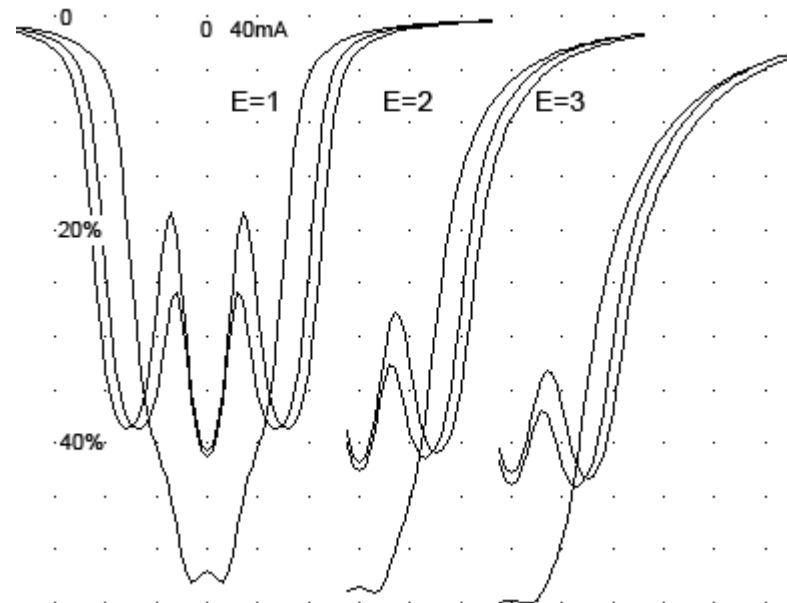
Таким образом:

- сравнивать ширины линий для определения напряженности поля следует в более глубоких частях профиля.
- сравнение ширины в крыльях позволит оценить коэффициент  $a$  в формуле, определяющий соотношение составляющих Лоренца и Гаусса в профиле Фойгта. Коэффициент  $a$  зависит от величины газового давления в модели, которое связано с температурой, а также от множителя-поправки к величине затухания Ван-дер-Ваальса.

В расчете для данного рисунка напряженность поля соответствовала 2900 Гс, остальные параметры расчета – как на предыдущих рисунках. Приведены интенсивности континуума в отношении к континууму невозмущенной фотосферы.

## Зависимость от поправки $E_{Wan-der-Waals}$

Для полноты рассмотрения приводим зависимость профилей от поправки  $E_{Wan-der-Waals}$ . Все параметры расчета – как на предыдущем графике, поправка равна 1.0, 2.0 и 3.0

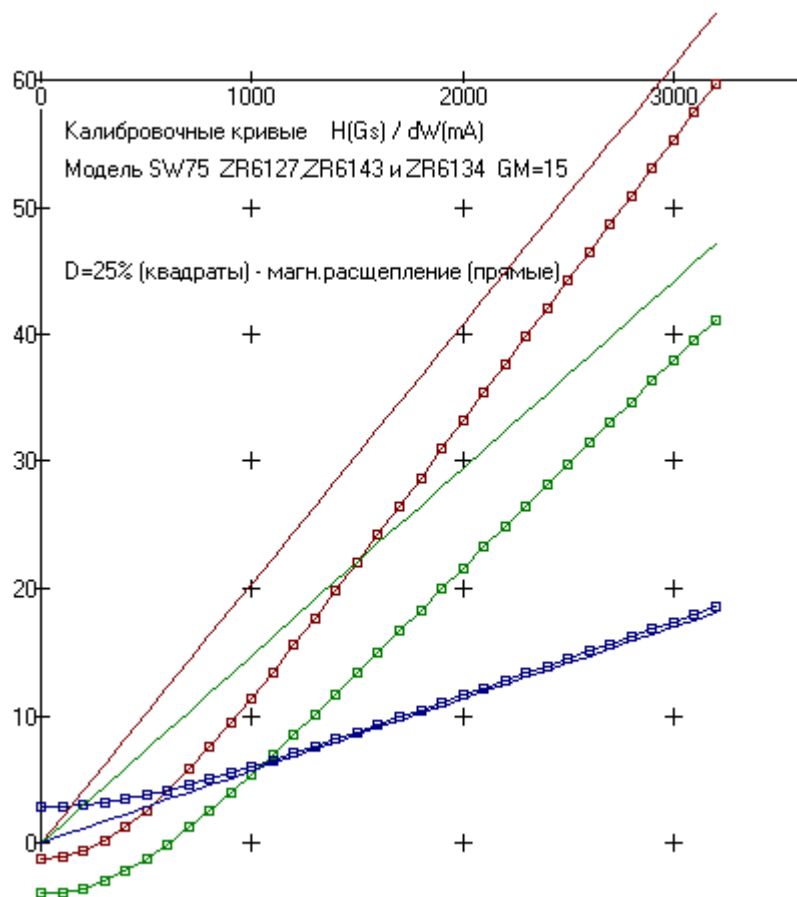


$$H = 2900 \text{ Гс}, \quad \gamma = 30^\circ, \quad E_{Wan-der-Waals} = 1, 2, 3$$

## Калибровочные кривые

Обратимся, наконец, к вычислениям разности ширин профилей. Можно предложить два способа сравнения ширин. В случае результатов, полученных из наблюдений, следует накладывать друг на друга профили целиком, добиваться совмещения левых крыльев и, затем, измеряя сдвиг, добиваться совмещения правых крыльев. Если же результаты получены из вычислений, то профили оказываются гладкими, не включающими шума измерений, поэтому достаточно просто измерить ширины на заданной глубине  $d = (1 - R)$  линий и найти разность  $\Delta W_d = W_{Lin1,d} - W_{Lin2,d}$ .

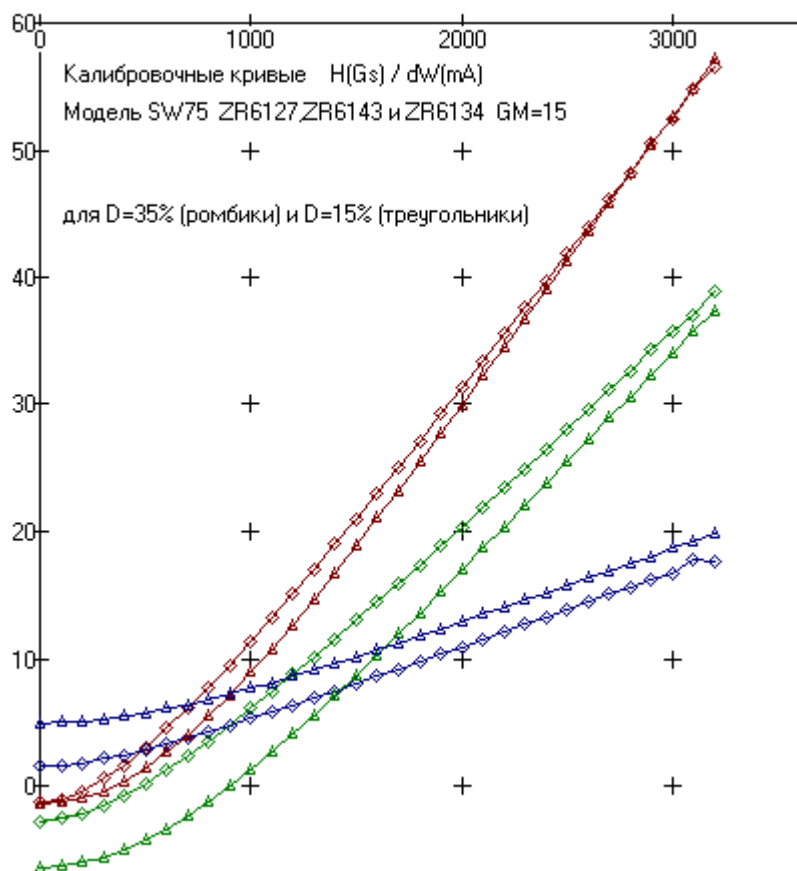
Такие "калибровочные кривые" приведены на следующем рисунке. В расчете использовалась модель Stellmacher-Wiehr 1975 (SW75), угол наклона силовых линий к лучу зрения 15 градусов (выбор угла не сильно сказывается на расчетах, как показано выше), микротурбулентные скорости соответствующие наблюдательному материалу 0 км/с, поправка к коэффициенту Ван-дер-Ваальса  $E_{Wan-der-Waals} = 2$ . Для сравнения приведены прямые, следующие из непосредственного расчета величины магнитного расщепления. Измерения ширин сделаны на уровне глубины линии 25% (остаточная интенсивность 75%). Это достаточно далеко и от крыльев, искаженных профилем Лоренца, и от искажений в верхушках линий. Как видно, в диапазоне свыше 1000 Гс "калибровочные кривые" приближаются к прямым линиям.



Прямолинейные части калибровочных кривых можно аппроксимировать функцией  $\Delta W = kH + b$ , где  $\Delta W$  - разность ширин в мА,  $H$  - напряженность поля в тыщячах Гаусс. Получается следующая табличка:

пара линий	k	b
6127-6134	22.14	-11.1
6143-6134	16.34	-11.1
6127-6143	5.8	0.0

Переход к измерению на других значениях глубины линий, например 15% и 35% умеренно смещает кривые не меняя их линейности



Для d = 15% :

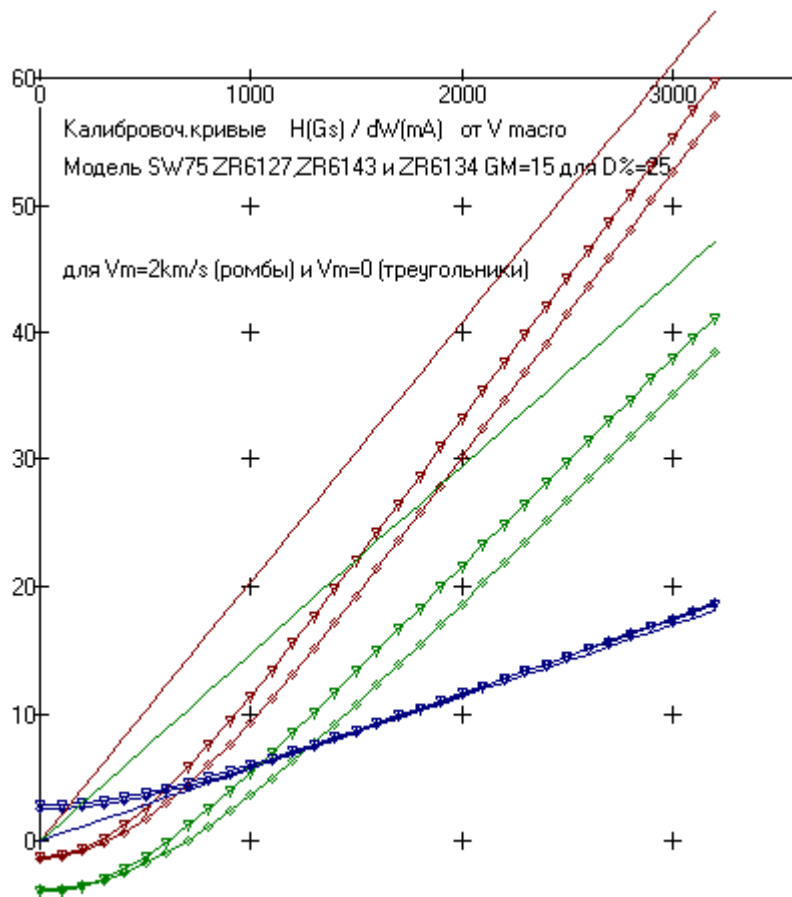
пара линий	k	b
6127-6134	22.67	-15.4
6143-6134	16.97	-16.9
6127-6143	5.70	1.6

И для d = 35% :

пара линий	k	b
6127-6134	21.13	-11.0
6143-6134	15.35	-10.3
6127-6143	5.78	-0.7

Как следует из расчетов с вариациями угла наклона силовых линий  $\gamma$ , поправки Ван-дер-Ваальса, температуры фотосферы, искажения зависимости  $\Delta W(H)$  невелики.





Покажем это ещё на примере размывание контуров линий профилем Гаусса, что возможно, например, за счет макротурбулентных скоростей или искажения инструментальным профилем спектрографа.

Для замывания, соответствующего макротурбулентной скорости 2 км/с получим табличку:

пара линий	k	b
6127-6134	22.42	-14.7
6143-6134	16.46	-14.3
6127-6143	5.96	-0.4

Чтобы найти поле по измеренной разности ширин линий надо перевернуть формулу для "калибровочных кривых", т.е. превратить  $\Delta W = kH + b$  в  $H = K \cdot \Delta W + B$ , где  $K = \frac{1}{k}$ ,  $B = -\frac{b}{k}$ .

Таким образом, при измерении ширин на глубине 25% для  $V_{Macro} = 2\text{km/s}$  напряженность поля  $H$  (Gs) будет

$$H = 44.60 * (W_{6127} - W_{6134}) + 656$$

$$H = 60.75 * (W_{6143} - W_{6134}) + 869$$

$$H = 167.8 * (W_{6127} - W_{6143}) + 67$$

а для  $V_{Macro} = 2\text{km/s}$  -

$$H = 45.17 * (W_{6127} - W_{6134}) + 502$$

$$H = 61.20 * (W_{6143} - W_{6134}) + 680$$

$$H = 172.41 * (W_{6127} - W_{6143})$$

Теоретические значения, полученные из магнитных расщеплений равны

$$H = 49.07 * (W_{6127} - W_{6134})$$

$$H = 67.93 * (W_{6143} - W_{6134})$$

$$H = 176.68 * (W_{6127} - W_{6143})$$

Результаты обработки наблюдений.

Сначала отметим особенности наблюдательного материала. Как было показано в предыдущей работе микротурбулентные скорости для данного наблюдательного материала отсутствуют  $V_{mi} = 0.0$  км/с.

Второй интересный момент заключается в том, что типичные глубины фотометрируемых линий в наиболее холодных частях тени составляют 16%, тогда как рассчитанные глубины – 40%, величины различаются в 2.5 раза. Это различие можно объяснить только изменением уровня континуума из-за рассеянного в телескопе, спектрографе и фотоэмульсии негатива света из невозмущенной фотосферы. Тогда истинный контраст тени должен быть равен наблюдаемому, деленному на 2.5, т.е. приблизительно  $0.20/2.5=0.08$  интенсивности фотосферы. А это требует использовать модель тени примерно на  $0.08 \Delta\Theta$  более холодную, чем модель SW75.

Причем учет в доле рассеянного света составляющей из полутени потребует ещё более холодной модели тени.

Сложности.

Абсолютное значение фактора Ланде мало, разность факторов Ланде ещё меньше, поэтому требуется высокая точность измерения ширин профилей.

Разность полей в 100 Гс приводит к разности ширин профилей в 1 миллиангстрем. При ширине инструментального профиля 25 и шаге оцифровки в 4 миллиангстрема измерение такой величины кажется проблематичным. Однако мы сравниваем не отдельные точки, а целиком крылья линий, что повышает точность до нужного уровня.

При небольших полях и даже при больших для линии Zr I 6134 зеemanовские компоненты перекрываются. При перекрытии крылья получают дополнительное смещение от центра. В результате разность ширин оказывается несколько меньше разности магнитных расщеплений. Величина этого отклонения зависит от отношения величин магнитного уширения и ширины профиля фойгта, который образуется из четырех составляющих:

1. доплеровской ширины теплового уширения
2. уширения микротурбулентностью
3. уширение макротурбулентностью
4. уширение инструментальным профилем.

Это подтверждается расчетами.

...