

Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 120, № 2, 21–29 (2024)

УДК 520.85

## Эксперимент по получению карт магнитного поля с помощью спектрографа БСТ-2 КрАО РАН

*А.А. Плотников, А.С. Куценко, Д.Г. Семёнов, Г.А. Суннца*

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым  
*plotnikov.andrey.alex@yandex.ru*

Поступила в редакцию 17 апреля 2024 г.

**Аннотация.** В работе описывается получение спектрополяриметрических данных на башенном солнечном телескопе Крымской астрофизической обсерватории (БСТ-2 КрАО РАН) с помощью ПЗС-матрицы и последующий их анализ. В приближении модели атмосферы Милна–Эддингтона получены магнитограммы модуля и продольной компоненты магнитного поля, карты распределения лучевой скорости, доплеровской ширины и силы линии. Существенным недостатком описанной оптической схемы является невозможность одновременной регистрации двух ортогонально поляризованных компонент излучения. Вместо этого проводится последовательное сканирование выбранного участка солнечной поверхности в разных положениях анализатора поляризации. Тем не менее, результаты хорошо согласуются с данными космических наблюдений. В то же время использование описанного подхода требует аккуратного учета эффектов инструментальной поляризации телескопа.

**Ключевые слова:** магнитное поле, спектрополяриметрия, Солнце

### 1 Введение

Физические условия атмосферы влияют на поглощение атомами проходящего света, и, как следствие, образуют уникальную в каждом случае зависимость интенсивности излучения от длины волны (т.н. профиль спектральной линии). Очевидно, что анализ формы такого профиля позволяет получить информацию о физических параметрах в соответствующей области атмосферы.

Значительный интерес в физике Солнца представляет измерение вектора магнитного поля в солнечной атмосфере. Одним из наблюдаемых проявлений магнитного поля является эффект Зеемана – расщепление магниточувствительных спектральных линий в присутствии магнитного поля. Величина расщепления оказывается пропорциональной величине модуля магнитного поля, а анализ степени поляризации расщепленных компонент позволяет получить информацию также и об ориентации вектора магнитного поля.

Систематические измерения солнечных магнитных полей проводятся достаточно давно – визуальные наблюдения начаты еще в 1908 г. на обсерватории Маунт-Вилсон (Hale et al., 1919). В данном случае наблюдатель визуально оценивает расщепление между спектральными компонентами, которое впоследствии пересчитывается в величину магнитного поля. Получение четкого пространственного распределения величины оказывается затруднено, поэтому на практике измеряются лишь максимальные магнитные поля в отдельных солнечных пятнах. В КрАО подобные измерения проводятся с 1957 года и по сей день на телескопе БСТ-2 (Северный, Степанов, 1956).

Применение фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) и электрооптических модуляторов поляризации позволило автоматизировать процесс измерения. Схема магнитографа была предложена в работе Babcock (1953), и впоследствии она была реализована в КрАО (Никулин и др., 1958). Установка щели ФЭУ на одном из крыльев магнитоактивной линии и последовательное пропускание анализатором той или иной круговой поляризации приводит к тому, что амплитуда выходного сигнала ФЭУ становится пропорциональна продольной компоненте магнитного поля. Применение второго ФЭУ в симметричном положении на другом крыле линии позволяет повысить отношение “сигнал-шум” (а следовательно, и точность измерения). Для точного позиционирования щелей ФЭУ относительно

центра линии используется плоскопараллельная пластинка, компенсирующая доплеровское смещение линии. Измеренная лучевая скорость принимается пропорциональной наклону пластинки. Введение третьего ФЭУ позволяет одновременно получать карты с пространственным распределением яркости и с измерением продольной компоненты магнитного поля (далее  $B_z$ ).

Упомянутые методы являются попытками ограниченного анализа формы профиля спектральных линий в пределах технических возможностей того времени. Полноценный анализ требует получения т. н. “куба данных” – распределения интенсивности и по двум пространственным, и по спектральной координатам. Регистрация подобного объема данных с помощью ФЭУ заняла бы неприемлемо долгое время, и на практике такие измерения стали возможны только с появлением двумерных электронных приемников (ПЗС- и КМОП-матриц).

Сложности не ограничиваются процессом регистрации данных. Отдельную трудность представляет и процесс извлечения величин интересующих параметров. Для полноценного их вычисления требуется решение т. н. обратной задачи (или “инверсия”). Суть ее состоит в следующем: с помощью модели для предполагаемого набора параметров строится теоретический спектральный профиль, который сравнивается с реально наблюдаемым. Набор параметров, при котором теоретический профиль будет меньше всего отличаться от наблюдаемого, и принимается за измеренные значения.

В описанном подходе присутствует три варьируемых фактора: модель для построения теоретического профиля, функция разности между двумя профилями (“функция потерь”) и метод подбора оптимального набора данных. Увеличение пространственного и спектрального разрешений приводит к многократному росту вычислительной сложности. Инверсия спектрального профиля в каждом пикселе является отдельной и независимой задачей. Даже для карты  $100 \times 100$  пикселей (что является достаточно малым размером по меркам современных инструментов) потребуются решить  $10^4$  отдельных задач. Развитие техники позволило обрабатывать такие объемы данных только 20–30 лет назад, но и сегодня эти задачи все еще требуют значительных вычислительных ресурсов.

Как упоминалось ранее, в настоящее время на телескопе БСТ-2 КрАО РАН солнечные магнитные поля измеряются только визуальным методом. Этот подход весьма интересен в контексте наличия длинного ряда наблюдений, однако предоставляет весьма скудный по современным меркам набор данных. В то же время существующее оборудование позволяет значительно расширить объем получаемой из наблюдений информации, не прибегая при этом к серьезной перестройке имеющегося телескопа. В данной работе мы описываем эксперимент по регистрации спектров БСТ-2 в разных поляризационных состояниях с помощью ПЗС-матрицы. Также приводятся результаты их последующей обработки путем инверсии профилей в рамках модели атмосферы Милна–Эддингтона (МЕ-инверсии) для получения пространственных карт магнитного поля и других параметров солнечной атмосферы.

## 2 Оборудование и методы

Наблюдения были проведены на телескопе БСТ-2 КрАО РАН. Оптическая схема телескопа, подробно описанная в работе [Степанян и др. \(2014\)](#), включает в себя главное зеркало диаметром 200 мм и фокусным расстоянием 8 м. В комбинации с касегреновским зеркалом диаметром 180 мм на щели спектрографа строится изображение Солнца диаметром 140 мм. Спектрограф состоит из коллиматорного зеркала с фокусным расстоянием 7.5 м, дифракционной решетки с плотностью штрихов  $600 \text{ мм}^{-1}$  и камерных зеркал.

Для проведения эксперимента схема спектрографа была изменена. В плоскости дисперсии в качестве камеры был установлен объектив МТО-11 с фокусным расстоянием 1000 мм. Детектором служил ПЗС-приемник Atik Titan с сенсором Sony ICX424 ( $658 \times 492$  пикселей) с размером пикселя  $7.4 \times 7.4$  мкм.

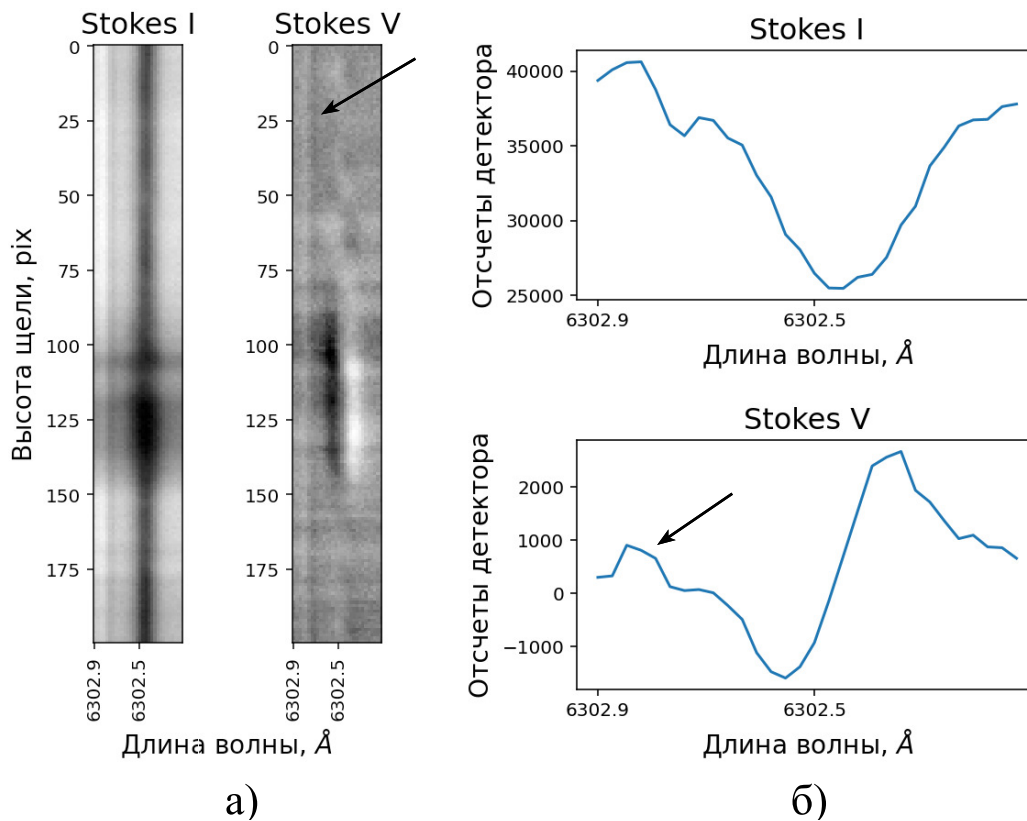
Для наблюдений использовалась спектральная линия Fe I 6302.5 Å с эффективным фактором Ланде 2.5. Спектр регистрировался в четвертом спектральном порядке решетки. Для изолирования спектральной области применялся широкополосный фильтр ОСТ-12.

В данной работе мы решили ограничиться регистрацией только круговой поляризации (компоненты I и V вектора Стокса). Во-первых, линейная поляризация подвержена большим шумам измерения и требует значительно большей точности калибровки инструментальной поляризации. Во-вторых, как было показано ранее ([Плотников, Куценко, 2018](#)), круговой поляризации достаточ-

но для измерения не только продольной компоненты, но и величины модуля вектора магнитного поля.

Для получения компонент  $I$  и  $V$  вектора Стокса требуется регистрация спектра в двух поляризациях: левой круговой ( $I - V$ ) и правой круговой ( $I + V$ ). В идеальном случае изображения в обеих поляризациях должны регистрироваться одновременно, что достигается, например, с помощью поляризационного лучерасщепителя (призмы Волластона, призмы Глана и т. п.). Последовательная регистрация при пропускании пучка через анализатор той или иной поляризации будет давать менее точный результат – из-за колебаний атмосферы соответствующие положения щели на солнечном диске не будут в точности совпадать. Однако в данной работе мы решили оценить, насколько вообще применим такой подход. Для выделения круговой поляризации перед щелью спектрографа устанавливалась четвертьволновая пластинка и линейный поляризатор.

Для получения “куба данных” изображение солнечного диска смещается поперек щели спектрографа, и спектр регистрируется последовательно в каждом положении (щель спектрографа “сканирует” изображение солнечного диска). Таким образом, выполнялась следующая последовательность: в начале анализатор выставлялся для пропускания левой круговой поляризации, для чего быстрая ось пластинки  $\lambda/4$  ориентировалась под углом  $45^\circ$  относительно оси линейного поляризатора, проводилось сканирование интересующей области, после чего пропускаемая поляризация менялась на правую круговую путем поворота оси поляризатора на  $90$  градусов, и проводилось повторное сканирование той же области. Электронная схема, обеспечивающая сканирование, описана в статье Семёнов и др. (2021).



**Рис. 1.** Пример параметров Стокса  $I$  и  $V$ , полученных на БСТ-2. (а) – срез “кубов данных” в одном из положений сканирования. Щель спектрографа наведена на небольшие пятна. (б) – срез изображения на панели (а) на уровне  $y = 125$ . Черной стрелкой выделена паразитная интенсивность  $V$  в атмосферной линии

После такой процедуры мы получаем два “куба данных”, в первом приближении соответствующих поляризационным состояниям  $(I - V)$  и  $(I + V)$ . Сложением или вычитанием они могут быть преобразованы в “кубы” параметров Стокса  $I$  и  $V$ . Из-за неточности часового ведения пространственные координаты в двух “кубах” могли не совпадать. Чтобы устранить вызываемые таким сдвигом

ошибки, нужно совместить соответствующие изображения, воспользовавшись каким-либо контрастным объектом, к примеру солнечным пятном. Для этого перед выполнением операций сложения и вычитания “кубы” были обрезаны так, чтобы центр масс изображения солнечного пятна имел в них одинаковые пространственные координаты.

На рис. 1 показан пример полученных параметров Стокса I и V для одного из положений щели спектрографа. Щель наведена на небольшие пятна, поэтому можно наблюдать уменьшение интенсивности в тени и полутени и сопутствующее магнитным полям возрастание амплитуды параметра V. В левой части спектра видна также теллурическая линия 6302.8 Å. На компоненте V для нее заметно наличие постоянной круговой поляризации (выделено черной стрелкой), что выглядит физически необоснованным. По всей видимости, причиной появления сигнала V могут служить мелкие дрожания элементов спектрографа, из-за которых при последовательных сканированиях положение спектра на детекторе может смещаться. При вычислении разности интенсивностей в двух поляризациях это будет приводить к появлению паразитного сигнала. Таким образом, при использовании последовательных сканирований нужно обращать особое внимание на совмещение полученных изображений по пространственным и по спектральной координатам.

Как упоминалось во Введении, для полноценного анализа спектральных профилей требуется решить обратную задачу относительно их формирования в солнечной атмосфере.

В качестве модели атмосферы применялась модель Милна–Эддингтона. Она состоит из следующих предположений:

1. Локальное термодинамическое равновесие.
2. Функция источников линейно возрастает с оптической глубиной.
3. Остальные параметры атмосферы не меняются вдоль оптической глубины.

Для фотосферы, где линии образуются в достаточно узком диапазоне по высоте, такие предположения можно считать оправданными.

Основным преимуществом данной модели является наличие аналитического решения для уравнения переноса излучения (решение Унно–Рачковского (Unno, 1956; Рачковский, 1962)). Данный факт существенно повышает скорость построения модельных профилей и, как следствие, скорость решения обратной задачи.

В качестве функции для сравнения наблюдаемого и теоретического профилей (“функции потерь”) использовалась сумма квадратов поточечных разностей (MSE). Для поиска оптимального набора параметров использовался метод Левенберга–Марквардта. Подобное сочетание широко используется для решения обратных задач (см. Table 1 в del Toro Iniesta, Ruiz Cobo, 2016).

В качестве начального приближения использовались следующие значения параметров:

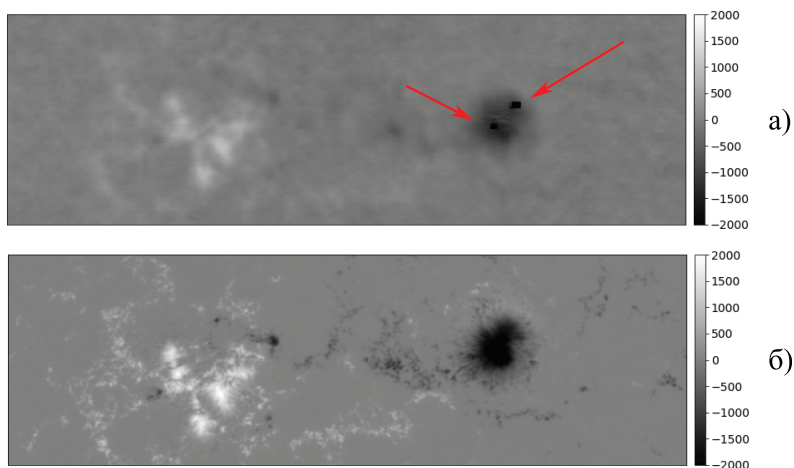
1. Напряженность магнитного поля: 1000 Гс.
2. Угол между вектором магнитного поля и лучом зрения (наклон): 45 deg.
3. Доплеровская ширина линии: 20 мÅ.
4. Сила линии: 10.
5. Функция источников на нулевой оптической глубине: 0.5 от интенсивности континуума.
6. Градиент функции источников: 0.5 от интенсивности континуума на единицу оптической толщины.
7. Доплеровский сдвиг (лучевая скорость): 0 км/с.

Азимут магнитного поля (направление проекции вектора на плоскость, перпендикулярной лучу зрения) не влияет на форму профилей I и V и поэтому не может быть вычислен с получаемым набором данных. Затухание линии (лоренцево уширение) слабо меняет окончательный профиль линии и в целях упрощения задачи может не подбираться (Borrero et al., 2011). Для него было принято значение в 0.5 доплеровской ширины профиля.

Программа обработки была написана на языке программирования Python с применением библиотек Astropy (Astropy Collaboration et al., 2022), Sunpy (The SunPy Community et al., 2020), Numpy (Harris et al., 2020) и Scipy (Virtanen et al., 2020). Изображения сформированы с помощью библиотеки Matplotlib (Hunter, 2007).

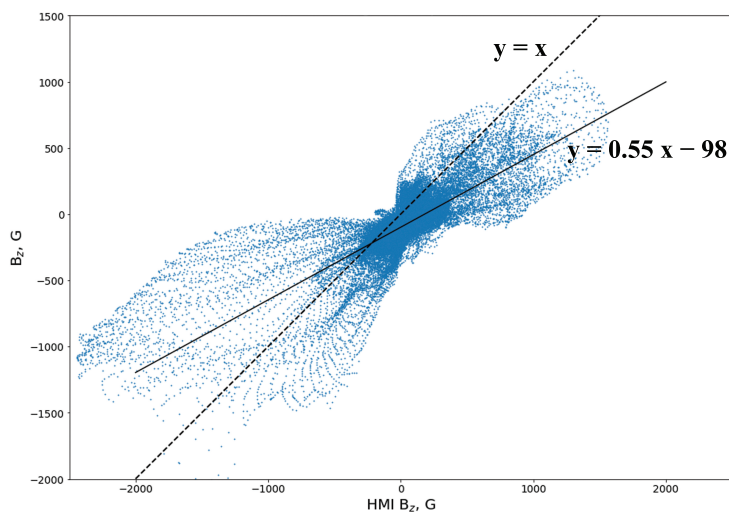
### 3 Результаты

Наблюдения проводились 18 июля 2023 года около 16:00. Изучалась активная область NOAA 13372, располагавшаяся в координатах N23W13.



**Рис. 2.** Магнитограммы продольной компоненты магнитного поля для NOAA 13372, полученные по наблюдениям БСТ-2 (а) и SDO/HMI (б). Красными стрелками выделены пиксели с выбросами

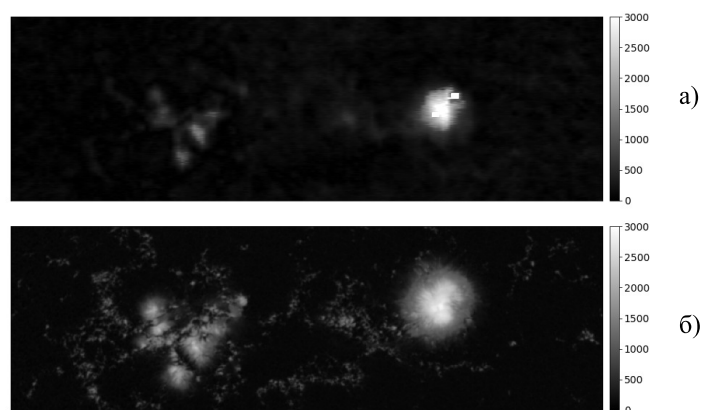
На рис. 2а изображена полученная карта  $B_z$ . Несмотря на невысокое пространственное разрешение изображения, видны основные детали активной области, просматривается супергрануляционная сетка. Для сравнения на рис. 2б приведена соответствующая карта  $B_z$ , полученная Solar Dynamics Observatory/Helioseismic Magnetic Imager (SDO/HMI; [Pesnell et al., 2012](#); [Scherrer et al., 2012](#)).



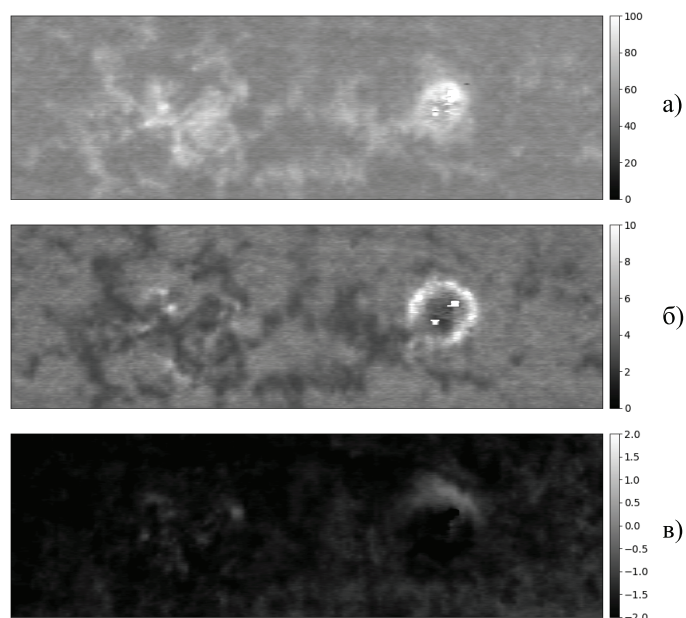
**Рис. 3.** Диаграмма рассеяния для значений продольной компоненты магнитного поля, полученных в этой работе и по данным инструмента SDO/HMI. К данным SDO/HMI применено гауссово сглаживание с  $\sigma = 3''$

На рис. 3 показана диаграмма рассеяния между величинами  $B_z$ , полученными в этой работе и по данным инструмента SDO/HMI. Для соответствия пространственных разрешений к данным SDO/HMI было применено гауссово сглаживание с  $\sigma = 3''$ . Заметна хорошая корреляция между данными ( $R = 0.68$ ). Более того, из-за неидеального пространственного совмещения изображений, полученных двумя инструментами, вычисленная корреляция между картами может быть несколько ниже реальной величины.

Видно, что значения, полученные в этой работе, оказываются заниженными примерно в 1.8 раз по сравнению с аналогичными данными SDO/HMI (наклон линейной аппроксимации составляет 0.55). В тени пятна ME-инверсия дает наклон поля к лучу зрения около 60–70 градусов, что не соответствует моделям пятен и другим наблюдениям. Оба этих факта в совокупности наводят на мысль, что параметр Стокса  $V$  при измерениях на БСТ-2 оказывается занижен по сравнению с реальными значениями, например, из-за эффектов инструментальной поляризации. Недостаточная амплитуда параметра  $V$  приводит, в свою очередь, к заниженным значениям величины  $B_z$ .



**Рис. 4.** Магнитограммы модуля магнитного поля для NOAA 13372, полученные по наблюдениям БСТ-2 (а) и SDO/HMI (б)



**Рис. 5.** Карты параметров, полученные по наблюдениям на БСТ-2: доплеровской ширины (а), силы линии (б), лучевой скорости (в)

На рис. 4 показано сравнение карт для модуля вектора магнитного поля. Наблюдается совпадение данных для зоны сильных полей и спокойного Солнца, однако в зоне полутени значения отличаются даже визуально. Предположительно из-за занижения параметра Стокса  $V$  в наклонном поле полутени искажается соотношение между смещенными  $\sigma$ - и несмещенной  $\pi$ -компонентами, что приводит

к неверному вычислению модуля поля. В продольном поле в центре пятен, где присутствуют только  $\sigma$ -компоненты, данная проблема отсутствует.

Как было упомянуто ранее, МЕ-инверсия позволяет получать карты не только вектора магнитного поля, но и других параметров. Некоторые из этих карт (доплеровская ширина, сила линии и лучевая скорость) приведены на рис. 5.

В ряде пикселей видны выбросы параметров, и их положение совпадает на всех картах (выделены красными стрелками на рис. 2). Это говорит о проблемах инверсии в этих точках и, по всей видимости, требуется более тщательный подбор начального приближения.

## 4 Выводы

В этой работе представлены результаты регистрации данных спектрографа БСТ-2 с помощью ПЗС-матрицы в различных поляризациях и последующей их инверсии в приближении атмосферы Милна–Эддингтона. Несмотря на упрощенную схему поляриметра (последовательное сканирование в двух поляризационных состояниях вместо использования поляризационного лучерасщепителя), результаты можно считать удовлетворительными. Карты продольной компоненты магнитного поля демонстрируют хорошее визуальное согласие и корреляцию с данными космического инструмента SDO/HMI.

В то же время замечено статистическое занижение величины  $B_z$ . Мы склоняемся к тому, что это связано с эффектами инструментальной поляризации. Каждое зеркало в системе телескопа может вносить свой вклад в искажение поляризационной картины, а зеркала целостатной системы, в которой зачастую отражения происходят под углами, сильно отличающимися от нормали, требуют особого внимания (Beck et al., 2005).

В качестве дополнительного фактора может рассматриваться также влияние рассеянного света. Оценка рассеяния около лимба дает величину около  $1 \div 2\%$  от интенсивности в центре диска, что в зоне солнечных пятен (где интенсивность падает в  $10 \div 20$  раз по сравнению с зоной спокойного Солнца) может вносить существенный вклад в искажение степени поляризации.

Фиксированные начальные приближения для обратной задачи оказываются достаточными в большинстве точек, однако в некоторых случаях приводят к физически неадекватному решению. Особое внимание требуется в зоне тени, где снижена интенсивность излучения и соотношение “сигнал-шум” значительно падает. Для более тщательного подбора начальных параметров могут применяться упрощенные методы оценки параметров либо методы машинного обучения.

Работа выполнена при поддержке Государственного задания № 122022400224-7.

## Литература

- Никулин Н., Северный А., Степанов В., 1958. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 19. С. 3–19. [Nikulín N., Severny A., 1958. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 19, pp. 3–19. (In Russ.)].
- Плотников А., Куценко А., 2018. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 114. № 2. С. 87–96. [Plotnikov A., Kutsenko A., 2018. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 114, no. 2, pp. 87–96. (In Russ.)].
- Рачковский Д., 1962. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 28. С. 259–270. [Rachkovsky D., 1962. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 28, pp. 259–270. (In Russ.)].
- Северный А., Степанов В., 1956. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 16. С. 3–12. [Severny A., Stepanov V., 1956. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 16, pp. 3–12. (In Russ.)].
- Семёнов Д., Суница Г., Куценко А., 2021. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 117. № 1. С. 15–21. [Semyonov D., Sunitsa G., Kutsenko A., 2021. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 117, no. 1, pp. 15–21. (In Russ.)].
- Степанян Н., Суница Г., Малащук В., 2014. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 110. № 1. С. 107–122. [Stepanian N.N., Sunitsa G.A., Malashchuk V.M., 2014. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 110, no. 1, pp. 107–122. (In Russ.)].
- Astropy Collaboration, Price-Whelan A.M., Lim P.L., et al., 2022. *Astrophys. J.*, vol. 935, no. 2, p. 167.
- Babcock H.W., 1953. *Astrophys. J.*, vol. 118, p. 387.
- Beck C., Schlichenmaier R., Collados M., Bellot Rubio L., Kentischer T., 2005. *Astron. Astrophys.*, vol. 443, no. 3, pp. 1047–1053.

- Borrero J.M., Tomczyk S., Kubo M., et al., 2011. *Solar. Phys.*, vol. 273, no. 1, pp. 267–293.
- del Toro Iniesta J.C., Ruiz Cobo B., 2016. *Liv. Rev. Sol. Phys.*, vol. 13, no. 1, p. 4.
- Hale G.E., Ellerman F., Nicholson S.B., Joy A.H., 1919. *Astrophys. J.*, vol. 49, p. 153.
- Harris C.R., Millman K.J., van der Walt S.J., et al., 2020. *Nature*, vol. 585, no. 7825, pp. 357–362.
- Hunter J.D., 2007. *Comp. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 90–95.
- Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C., 2012. *Solar. Phys.*, vol. 275, no. 1-2, pp. 3–15.
- Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I., et al., 2012. *Solar. Phys.*, vol. 275, no. 1-2, pp. 207–227.
- The SunPy Community, Barnes W.T., Bobra M.G., et al., 2020. *Astrophys. J.*, vol. 890, p. 68.
- Unno W., 1956. *Publ. Astron. Soc. Japan*, vol. 8, p. 108.
- Virtanen P., Gommers R., Oliphant T.E., et al., 2020. *Nature Methods*, vol. 17, pp. 261–272.



## Experiment on deriving solar magnetic fields with the spectrograph of the Solar Tower Telescope – 2 at CrAO

*A.A. Plotnikov, A.S. Kutsenko, D.G. Semyonov, G.A. Sunitsa*

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409  
*plotnikov.andrey.alex@yandex.ru*

**Abstract.** The paper describes the experiment on the solar magnetic field measurements with the spectrograph of the Solar Tower Telescope – 2 (STT-2). Using a charge-coupled device (CCD), the data on solar spectra in two polarization states were collected by two consecutive scans of the solar surface. The polarization of the light beam was decoded by a quarter-wave plate and a linear polarizer. The recorded spectra were processed to derive I and V Stokes profiles, which were further inverted under the Milne-Eddington atmosphere model. The method provides spatial maps of the longitudinal magnetic field and magnetic field strength. The shortcoming of the method is the necessity to carry out two consecutive scans of the solar surface in different polarization states rather than simultaneous capturing of orthogonal polarization states using a beam splitter unit. However, the approach yielded acceptable results and showed satisfactory agreement with the data provided by the Helioseismic and Magnetic Imager instrument on board the Solar Dynamics Observatory. We found that the polarization crosstalk of the telescope may produce false polarization signals and requires special attention.

**Key words:** magnetic field, spectropolarimetry, Sun