

УДК 520

Эксперименты по наблюдению Солнца с высоким пространственным разрешением на Башенном солнечном телескопе им. А.Б. Северного КрАО РАН

А.С. Куценко¹, Shangbin Yang^{2,3}, В.И. Абраменко¹, Д.Г. Семёнов¹

¹ ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым
alex.s.kutsenko@gmail.com

² Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories of China, Beijing 100101, China

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Поступила в редакцию 26 ноября 2021 г.

Аннотация. В работе описываются результаты наблюдений Солнца с высоким временным и пространственным разрешением на Башенном солнечном телескопе им. А.Б. Северного КрАО РАН (БСТ-1), которые проводились в октябре и ноябре 2021 г. При наблюдениях с Земли пространственное разрешение оптических телескопов ограничено атмосферой, которое можно увеличить путем математической обработки сотен изображений объекта, сделанных с короткой экспозицией. Для получения данных оптическая схема БСТ-1 была дополнена камерой и быстрым детектором, позволяющим получать десятки изображений поверхности Солнца в секунду, а также воспользоваться программными пакетами для спекл-реконструкции астрономических наблюдений. Детальное визуальное изучение полученных изображений и их сравнение с данными космической обсерватории SDO/HMI показали обнадеживающие результаты. На восстановленных кадрах надежно разрешаются гранулы и видна тонкая структура солнечных пятен. Наблюдения с высоким пространственным разрешением на БСТ-1 открывают новые возможности для исследования Солнца.

Ключевые слова: Солнце, солнечные пятна, грануляция, инструменты

1 Введение

В последние десятилетия исследования в области физики Солнца смещаются в сторону изучения динамики и структуры мелкомасштабных образований: грануляция спокойной фотосферы, магнитные элементы, фибриллы полутени солнечных пятен, бомбы Эллера (усы Северного) и т. д. Интерес к этому обусловлен тем, что явления, приводящие к нестационарным процессам в активных и спокойных областях, происходят на масштабах порядка десятков километров.

Подобные исследования стали возможны благодаря появлению новых инструментов с недоступными ранее возможностями. Целый ряд крупных телескопов находятся сейчас в стадии построения или уже начали выполнять научные программы. В этот список можно включить крупнейший на сегодняшний день инструмент Daniel K. Inouye Solar Telescope (DKIST, [Rimmele et al., 2020](#)) с диаметром главного зеркала 4 м (США), телескоп Goode Solar Telescope (GST, [Goode et al., 2010](#)) обсерватории Big Bear Solar Observatory (BBSO, США) с чистой апертурой главного зеркала 1.6 м, New Vacuum Solar Telescope (NVST, [Liu et al., 2014](#)) Юннаньской обсерватории (КНР) с главным зеркалом диаметром 1 м, европейские солнечные телескопы на Канарских островах. Крупные солнечные телескопы сейчас создаются в Индии, Китае, Европе. В России Институтом солнечно-земной физики в Иркутске строится оптический солнечный телескоп с апертурой 3 м.

Максимально достижимое пространственное разрешение телескопа определяется его дифракционным пределом (критерий Рэлея)

$$\alpha = 1.22\lambda/D, \quad (1)$$

где λ – длина волны, D – диаметр главного зеркала. Так, для длины волны $\lambda = 500$ нм и диаметра главного зеркала $D = 1.6$ м максимальное разрешение телескопа может достигать $\alpha \approx 0.08''$. Однако

при реальных наблюдениях разрешение ограничивается атмосферной рефракцией: волновой фронт падающей волны искажается неоднородными турбулентными слоями воздуха. Теория искажения волнового фронта светового пучка при прохождении через турбулентную среду была разработана [Fried \(1966\)](#), “качество” атмосферы оценивается параметром Фрида. В лучшем случае разрешение, ограниченное влиянием атмосферы, может достигать $0.5''$.

Для преодоления этого ограничения современные инструменты используют системы адаптивной оптики. Датчики измеряют волновой фронт падающей волны и корректирует форму одного или нескольких зеркал, пытаясь компенсировать искажения, вызванные его прохождением через атмосферу. Разработка, изготовление и установка эффективной системы адаптивной оптики представляют крайне трудные технические и затратные задачи. Кроме того, работа адаптивной оптики возможна только при хороших атмосферных условиях, когда удается восстановить фронт волны. Для дальнейшего увеличения пространственного разрешения обычно применяется математическая обработка получаемых изображений. Все это позволяет приблизиться к дифракционному пределу телескопа и достичь пространственного разрешения порядка сотых долей угловой секунды, что соответствует десяткам километров на поверхности Солнца.

Башенный солнечный телескоп им. А.Б. Северного (БСТ-1), сделанный по схеме Несмита, после модернизации в 1972 году имеет главное зеркало диаметром 90 см. Несложно оценить с помощью (1), что дифракционный предел телескопа с таким размером главного зеркала равен $\alpha \approx 0.14''$ при $\lambda = 500$ нм. Из-за внеосевого исполнения БСТ-1 на модельных диаграммах рассеяния инструмента наблюдается кома, поэтому теоретический предел разрешения телескопа равен приблизительно $0.3''$ (Теребиж В.Ю., 2021, частное сообщение). Тем не менее, это значительно меньше предела, определяемого атмосферой в месте расположения КраО РАН при проведении дневных наблюдений (около $1.5-2''$ согласно работе [Газе, 1948](#)).

Методы математической обработки, улучшающие угловое разрешение, могут быть применены к результатам наблюдений любого телескопа. Для успешной работы методов необходимо выполнение двух условий: 1) пространственное разрешение, определяемое атмосферой, должно быть достаточно высоким, чтобы на получаемых изображениях наблюдались контрастные детали; 2) экспозиция одиночного кадра не должна превышать нескольких миллисекунд. Последнее требование определяется тем, что характерное время изменения параметров атмосферы составляет порядка 10–20 мс (например, [von der Luehe, 1984](#)). При экспозициях, которые на порядок меньше этой величины, атмосферу можно считать неподвижной. Имея несколько сотен кадров, сделанных с короткой экспозицией, возможно восстановить изображение объекта при условии, что сам объект за все время наблюдений не меняется. Программное обеспечение для такой обработки сейчас хорошо развито даже для любительских приложений.

Цель представленной работы – исследовать возможность использования наблюдений на БСТ-1 для получения данных с высоким пространственным разрешением. В следующем разделе 2 приведено описание эксперимента. Получаемые на телескопе в результате обработки изображения Солнца показаны в разделе 3. Основные выводы эксперимента и описание новых возможностей, которые открываются перед исследователями, представлены в разделе 4.

2 Детали эксперимента

Для проведения эксперимента была дополнена оптическая схема БСТ-1. В фокальной плоскости телескопа было установлено плоское зеркало. Отраженный пучок направлялся в камеру, которая строила изображения выбранного участка Солнца на детекторе. В качестве камеры использовался объектив Гранит-11М с фокусным расстоянием 200 мм. Для регистрации изображений в белом свете применялся КМОП-детектор ZWO ASI120MM-S с прямоугольным сенсором формата 1280×960 пикселей и размером пикселя 3.75×3.75 мкм². Детектор позволял проводить запись со скоростью 29 кадров в секунду при полном разрешении. Для устранения насыщения детектора между плоским зеркалом и камерой устанавливался нейтральный светофильтр. Наблюдения велись при минимально возможных экспозициях 100–200 мкс. К недостаткам системы можно отнести неоптимальный выбор фокусного расстояния камеры: при фокусе 200 мм освещалась не вся площадь детектора. С другой стороны, использование промышленного объектива позволяло сфокусировать изображение на детекторе, не изменяя расстояние между оптическими элементами.

Общее время наблюдения выбранного участка Солнца обычно составляло несколько десятков секунд. За этот интервал накапливалось до нескольких тысяч кадров. Данные записывались в видеоформате с глубиной 16 бит. Перед каждой серией наблюдений проводилась калибровка системы – во время записи изображение Солнца в фокальной плоскости непрерывно смещалось целостатным и дополнительным зеркалами. Все полученные кадры накладывались и усреднялись. Финальное изображение использовалось как “плоское поле” при обработке наблюдений, т. е. каждый кадр перед обработкой делился на “плоское поле”.

Математическая обработка кадров с короткой экспозицией осуществлялась в любительском пакете AutoStakkert¹, который позволяет проводить реконструкцию методом shift-and-add. Вкратце этот процесс выглядит следующим образом: каждый кадр разделяется на небольшие пересекающиеся прямоугольные фрагменты, затем соответствующие фрагменты на всех кадрах сдвигаются до наилучшего совпадения, после чего из отдельных фрагментов формируется конечное изображение. AutoStakkert также использует метод lucky imaging, позволяя проводить обработку только наиболее резких кадров. На практике, в зависимости от качества исходных данных, в обработке использовалось от 50 до 80 % наилучших кадров. Вейвлет-фильтрация получаемых изображений проводилась в любительском пакете RegiStax².

Обработка также проводилась пакетом Kiepenheuer-Institut Speckle Interferometry Package (KISIP, Wöger et al., 2008). Этот алгоритм использует метод спекл-интерферометрии и предназначен для обработки наблюдений, полученных на солнечных телескопах, оснащенных адаптивной оптикой. Примечательно, что в применении к нашим данным оба способа обработки изображений восстанавливали совершенно одинаковые структуры на поверхности Солнца. Следовательно, эти образования действительно существуют на Солнце, а не являются артефактами обработки или наблюдений.

В зависимости от качества исходных изображений и используемого программного пакета, для восстановления использовалось от нескольких десятков до нескольких сотен кадров. Такое количество входных данных соответствует наблюдениям в течение не более 30 сек. За это время структуры на Солнце, разрешаемые на изображениях, меняются крайне незначительно.

3 Результаты

Эксперимент проводился в течение октября и ноября 2021 года. Наилучшие изображения Солнца получались в утренние часы при температуре воздуха около 15 градусов по Цельсию и легкой дымке. В определенные дни достаточно хорошие изображения могли наблюдаться в течение всего дня. Субъективная оценка качества проводилась по грануляции в центре диска Солнца: при хороших условиях грануляция отчетливо различалась уже при одиночной экспозиции на большей части кадра.

Пример восстановленного изображения активной области NOAA 12893, наблюдавшейся на БСТ-1 6 ноября 2021 года, показан на левой панели рис. 1. Активная область к моменту наблюдений находилась близко к центру диска и представляла собой небольшое униполярное пятно с четким ярким мостом, разделяющим тень пятна на несколько частей. На правой панели для сравнения показано изображение активной области, полученное инструментом Helioseismic and Magnetic Imager (HMI, Schou et al., 2012) орбитальной обсерватории Solar Dynamics Observatory (SDO, Pesnell et al., 2012). Инструмент SDO/HMI представляет собой телескоп-рефрактор с диаметром объектива 140 мм (Schou et al., 2012). Используя формулу 1, несложно получить, что максимально возможное разрешение SDO/HMI составляет приблизительно 1.1" на рабочей длине волны 617 нм. Видно, что изображение БСТ-1 показывает намного больше деталей как в полутени, так и в тени пятна. Напомним, что пространственное разрешение, ограниченное атмосферными искажениями для места расположения КраО РАН, редко бывает лучше 2". Следовательно, методы восстановления изображения применительно к данным БСТ-1 позволяют повысить пространственное разрешение как минимум в несколько раз.

Еще один пример восстановления изображений Солнца, а именно небольшой поры, наблюдавшейся 23.10.2021, показан на рис. 2 на панелях (a)–(c). Изображение на панели (a) получено с помощью пакета KISIP на компьютерах обсерватории VBSO проф. В.Б. Юрчиным. Изображение

¹ <https://www.autostakkert.com/>

² <https://www.astronomie.be/registax/>

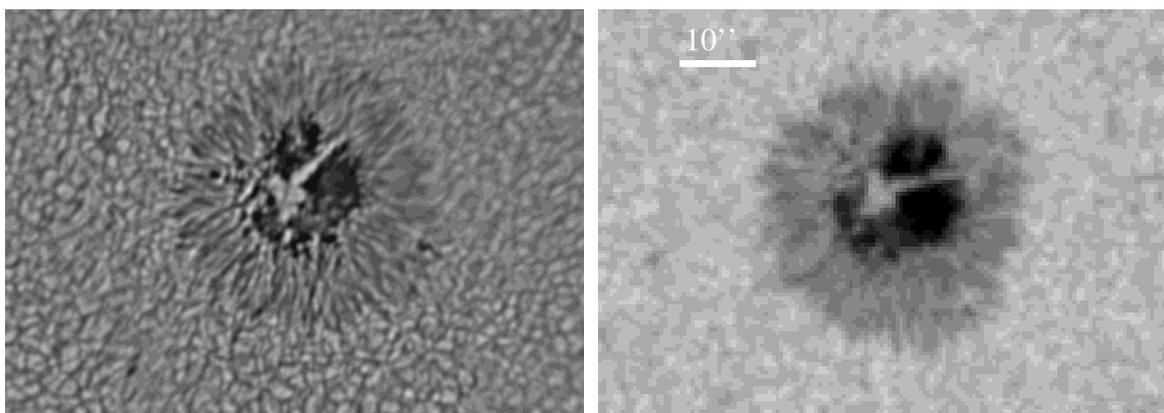


Рис. 1. Изображения активной области NOAA 12893, полученные 06.11.2021 в 06:37 UT на БСТ-1 (слева) и SDO/HMI (справа). Белая горизонтальная линия на правой панели соответствует $10''$. Изображение на левой панели восстановлено с помощью любительских пакетов AutoStakkert и RegiStax

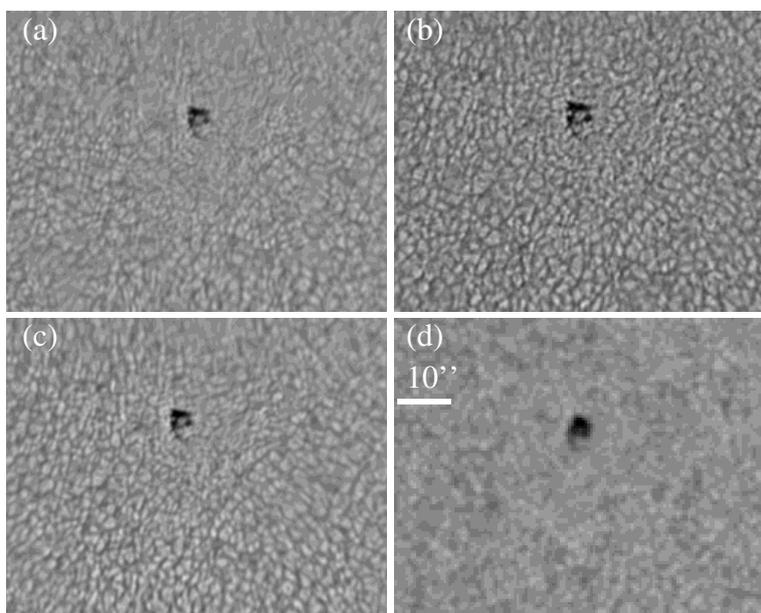


Рис. 2. Изображения поры, наблюдавшейся 23.10.2021 в 07:07 UT на БСТ-1 (панели а–с) и SDO/HMI (панель d). Восстановленное изображение на верхних панелях получено с помощью пакета KISIP в BBSO (а) и НАОК (b), изображение на панели (с) – с помощью любительского пакета AutoStakkert с вейвлет-фильтрацией в программе RegiStax. Видно хорошее соответствие между деталями на изображениях. Белая горизонтальная линия на панели (d) соответствует $10''$

на панели (b) также восстановлено пакетом KISIP, работающим в Национальной астрономической обсерватории Китая (КНР). Разную контрастность изображений мы связываем с различными настройками пакета и разным количеством исходных кадров, использованных для обработки. Тем не менее на обеих панелях видны совершенно одинаковые детали как в самой поре, так и на участках спокойного Солнца. Изображение на панели (c) получено любительским пакетом AutoStakkert с последующей обработкой программой RegiStax. Видно прекрасное соответствие с изображениями на панелях (a)–(b). На панели (d) для сравнения приведено изображение того же участка Солнца, полученное инструментом SDO/HMI.

Наконец, на рис. 3 показана эволюция грануляции небольшого участка спокойного Солнца, наблюдавшегося на БСТ-1 14 октября 2021 года с 12:12 UT в течение 9 минут. Хорошо различается

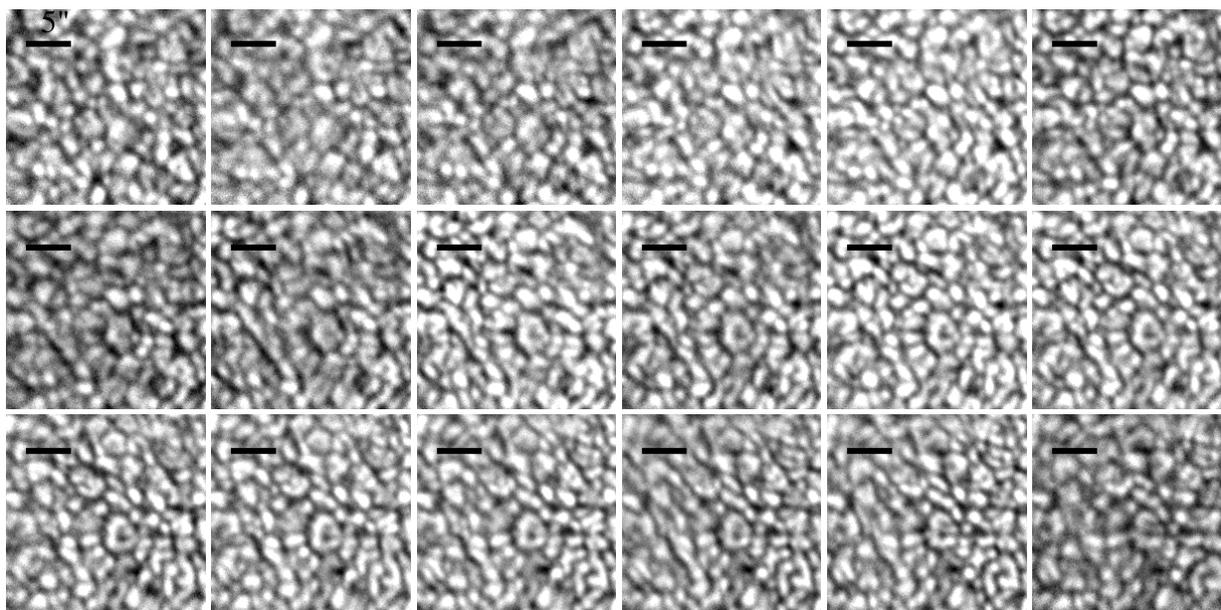


Рис. 3. Участок спокойного Солнца около центра диска, наблюдавшийся на БСТ-1 14.10.2021 с 12:12 UT до 12:21 UT. Черная горизонтальная линия на каждой панели соответствует $5''$. Серия показывает эволюцию гранул в течение 9 минут

кольцеобразная гранула относительно большого размера на нижних панелях в центре изображений. По серии кадров можно проследить этапы ее формирования и начала распада.

4 Выводы и обсуждение

Проведенный эксперимент свидетельствует о возможности использования БСТ-1 для наблюдений Солнца с высоким пространственным разрешением. Можно сделать вывод, что качество оптических поверхностей телескопа достаточно хорошее. Визуальный анализ получаемых данных позволяет предположить, что с помощью обработки серии кадров с короткой экспозицией возможно достичь предела разрешения телескопа порядка $0.3''$. Для надежного восстановления деталей на Солнце необходимо около сотни кадров, что требует несколько секунд записи при использовании современных скоростных детекторов. Следовательно, временное разрешение обработанных наблюдений может достигать 1–2 с.

Важным фактором, безусловно, является качество атмосферы. В течение более месяца наблюдений, по субъективным оценкам, приблизительно $2/3$ ясных дней были пригодными для получения достаточно хороших данных хотя бы в утренние часы. Согласно информации, представленной в работе Газе (1948), в летние месяцы атмосфера дает лучшее качество изображений по сравнению с осенью. Исходя из этого можно ожидать, что наблюдения с высоким разрешением на БСТ-1 возможны как минимум в течение 5–6 месяцев в году.

В целом эксперимент показал перспективность разработки и внедрения на БСТ-1 оптической системы для регистрации изображений Солнца в континууме. Вместо плоского зеркала, использованного в эксперименте, может быть установлена зеркальная щель, что даст еще ряд преимуществ. Во-первых, в таком случае возможны одновременные спектрополяриметрические наблюдения и наблюдения в континууме выбранного участка Солнца. Во-вторых, на регистрируемых изображениях в континууме будет видно текущее положение щели. В-третьих, изображения могут использоваться для быстрой подстройки диагонального зеркала и удержания на щели нужного участка поверхности Солнца, а также для гидирования телескопа.

Эксперимент помог сформулировать основные требования к системе регистрации изображений в белом свете. Кроме согласования всех параметров системы, необходимо использовать узкополосный фильтр с полосой пропускания порядка 10 \AA . Различные спектральные линии формируются в

разных слоях атмосферы Солнца. Возможно подобрать такие спектральные участки, в которых преобладают линии с максимальной температурной чувствительностью, например молекулярная серия TiO около 7057 Å. В этом случае удастся повысить как контраст, так и качество исходных изображений. Кроме того, необходимо применять детектор с минимальным шумом считывания: шум детектора отчетливо проявляется при обработке пакетом KISIP, что можно видеть на панели (b) рис. 2.

В случае изготовления оптической системы и запуска регулярных наблюдений появятся возможности для развития новых для КРАО научных направлений. Данные с высоким пространственным и временным разрешением могут использоваться при изучении тонкой структуры пятен, пор, факелов, гранул, а также их динамики, что подтверждается рис. 3. В случае использования фильтра определенных спектральных линий, например H_{α} или Na D, такие исследования могут быть расширены не только на фотосферу, но и на хромосферу.

Мы глубоко благодарны проф. В.Б. Юрчишину (BBSO, США) за спекл-реконструкцию наблюдений БСТ-1 программным пакетом KISIP на компьютерах обсерватории BBSO. SDO является частью миссии NASA “Жизнь со звездой”. Данные HMI любезно предоставлены ресурсом JSOC³.

Литература

- Газе В.Ф., 1948. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 3. С. 99–108. [Gaze V.F., 1948. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 3, pp. 99–108. (In Russ.)]
- Fried D.L., 1966. *Journal of the Optical Society of America* (1917–1983), vol. 56, p. 1372.
- Goode P.R., Coulter R., Gorceix N., Yurchyshyn V., and Cao W., 2010. *Astron. Nachr.*, vol. 331, p. 620.
- Liu Z., Xu J., Gu B.-Z., Wang S., You J.-Q., Shen L.-X., et al., 2014. *Res. Astron. Astrophys.*, vol. 14, pp. 705–718.
- Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C., 2012. *Solar Phys.*, vol. 275, p. 3.
- Rimmele T.R., Warner M., Keil S.L., Goode P.R., Knölker M., Kuhn J.R., et al., 2020. *Solar Phys.*, vol. 295, p. 172.
- Schou J., Scherrer P.H., Bush R.I., Wachter R., Couvidat S., Rabello-Soares M.C., Bogart R.S., et al., 2012. *Solar Phys.*, vol. 275, p. 229.
- von der Luehe O., 1984. *Optical Society of America, Journal, A: Optics and Image Science*, vol. 1, p. 510.
- Wöger F., von der Luehe O., Reardon K., 2008. *Astron. Astrophys.*, vol. 488, p. 375.

³ <https://jsoc.stanford.edu/>

Experiments on high-resolution observations of the Sun at the A.B. Severny Solar Tower Telescope of CrAO

A.S. Kutsenko¹, Shangbin Yang^{2,3}, V.I. Abramenko¹, D.G. Semyonov¹

¹ Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409
alex.s.kutsenko@gmail.com

² Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories of China, Beijing 100101, China

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract. The paper describes the experiments on high-resolution observations of the Sun, which were carried out during October and November 2021 at the A.B. Severny Solar Tower Telescope (STT-1). The spatial resolution of optical telescopes is usually limited by the seeing. Meanwhile, mathematical methods of speckle imaging allow one to achieve the diffraction-limited resolution. Our goal is to reveal whether STT-1 is capable of producing high-resolution images. We complemented the optical layout of STT-1 by a high-speed imaging unit. The unit made it possible to acquire dozens of short-exposure solar surface images per second. Then the data were processed and compared with the images taken by a space-borne instrument. We found that this technique allows one to substantially increase the spatial resolution of the telescope. Tiny solar features as small as solar granules or penumbra filaments are clearly seen in the reconstructed images. Hence, the data acquired by STT-1 can be used to study the structure and evolution of small-scale features on the Sun in detail.

Key words: Sun, sunspots, granulation, instrumentation