

УДК 520.1, 520.8, 520.48, 528.08, 535.8

## Изучение астроклимата Байкальской астрофизической обсерватории оптическими методами

П.А. Коняев<sup>1</sup>, А.В. Боровик<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а

Поступила в редакцию 28.08.2013 г.

Предложена методика измерения астроклиматических характеристик Байкальской астрофизической обсерватории (БАО) по анализу качества изображений, получаемых на телескопе полного диска Солнца. Для оценки качества изображений используется модифицированный информационно-статистический алгоритм «оптимального окна». Обработка материала большого объема (тысячи кадров) осуществляется в автоматическом режиме на аппаратно-программном комплексе, разработанном в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН на основе технологий параллельного программирования NVIDIA® CUDA и библиотек Intel® IPP и MKL. Приведены результаты статистического анализа фильтрограмм солнечной хромосферы в линии Н-альфа, полученные на БАО в течение 2001–2002 гг. на цифровой камере Princeton Instruments 2048В.

**Ключевые слова:** астроклимат, оптические измерения, компьютерный анализ изображений, атмосферная турбулентность; *astronomic climate, optical measurements, image processing, atmospheric turbulence.*

Исследования астроклиматических характеристик Байкальской астрофизической обсерватории (БАО) проводились начиная с 60-х гг. XX в. [1–4]. В основном это были визуальные оценки дрожания края солнечного диска и качества изображения на снимках хромосферы в линии Н-альфа, полученных на телескопе полного диска Солнца. Однако использованная методика визуальных оценок качества изображений была субъективной, так как предполагала участие наблюдателя, являлась довольно трудоемкой и в значительной мере была подвержена субъективным ошибкам. Для определения качества изображений применялась визуальная система баллов от 5 до 2. Для фильтрограмм соответствующего балла проводились измерения наиболее мелких деталей. Их размер, выраженный в угловых секундах, принимался за диаметр турбулентного кружка размытия как меры качества изображения. В результате для балла 5 (отлично) размер турбулентного кружка составил 1"–2", для балла 4 (хорошо) – 2"–3", для балла 3 – 3"–4" и для балла 2 (плохо)  $\geq 4"$ . На рис. 1а показана гистограмма качества изображений, полученных за период 1980–1981 гг. «Отличные» и «хорошие» изображения составляли почти 45% всех наблюдений. На рис. 1б приведено распределение серий кадров хорошего качества изображений в течение дня (графики взяты из работы [4]).

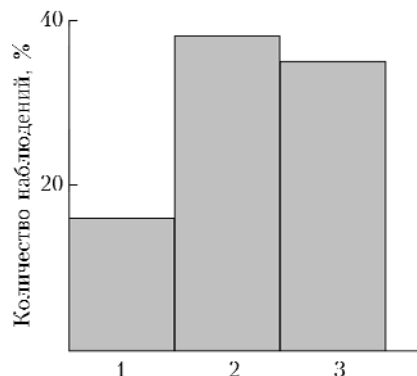


Рис. 1а. Гистограмма качества изображений солнечной хромосферы 1980–1981 гг.: 1 – угловое разрешение лучшее 2" («отличное» качество, 5 баллов); 2 – угловое разрешение от 2" до 3" («хорошее» качество, 4 балла); 3 – угловое разрешение хуже 3"

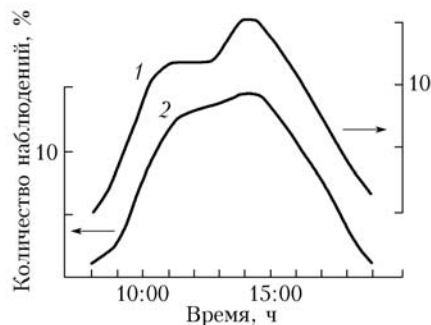


Рис. 1б. Распределение кадров «хорошего» качества по часам в течение дня (1); распределение всех наблюдений в течение дня (2)

\* Петр Алексеевич Коняев (peter@iao.ru); Александр Васильевич Боровик (aborovik@iszf.irk.ru).

В настоящей статье предложена методика измерения астроклиматических характеристик путем автоматизированного компьютерного анализа качества получаемых изображений. Приведены алгоритмы обработки и данные по исследованию астроклимата БАО, которые получили достоверное подтверждение путем статистического анализа большого числа кадров высокого разрешения.

### Измерение качества изображения

Компьютерная оценка качества изображения, искаженного турбулентной атмосферой, предполагает наличие алгоритма измерения размера турбулентного кружка размытия непосредственно по самому изображению. Для этой цели нами взят алгоритм «оптимального окна», предложенный для изображений типа солнечной грануляции [5]. В отличие от традиционных методов, таких как контрастный, градиентный или спектральный, данный алгоритм «измеряет» минимальный размер детали на изображении. Он является статистическим и основан на вычислении информационного критерия

$$S_p = -r_p \ln_2(r_p) - (1 - r_p) \ln_2(1 - r_p),$$

имеющего смысл вероятности того, что деталь изображения, разбитого на  $N_p$  элементов размера  $p \times p$ , содержит структуру, т.е. не является однородной. Здесь  $r_p = n_p / N_p$  — отношение числа «детализированных» клеток сетки к их общему числу.

Применяя «процедуру сгущения сетки» и строя график зависимости  $S_p$  от размера сетки  $p$ , находим «оптимальный» размер  $p_0$  детали, при котором критерий качества максимален. Чем меньше значение  $p_0$  (измеряемое в пикселях), тем выше качество изображения при прочих равных условиях.

Поскольку угловое разрешение пикселя в цифровом изображении солнечного диска известно, то, зная  $p_0$ , легко получить угловое разрешение минимальной детали на изображении. Для иллюстрации работы алгоритма «оптимального окна» на рис. 2 приведены два фрагмента изображения солнечной хромосферы с разрешением 3,81" и 1,77" соответственно, полученные на телескопе БАО в первой половине дня 25.09.2012 с интервалом 1 ч.

### Аппаратура, алгоритмы обработки и результаты

Институтом оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН создан аппаратно-программный комплекс (АПК) для цифровой обработки и анализа фильтрограмм солнечной хромосферы на телескопе полного диска Солнца Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН. Программное обеспечение АПК разработано по технологиям параллельного программирования с использованием библиотек NVIDIA® CUDA и Intel® IPP и MKL и позволяет проводить компьютерную обработку и статистический анализ огромного количества (десятки тысяч) цифровых изображений высокого разрешения за минимальное время. Исследование может проводиться как в ручном, так и автоматическом режиме. Как правило, оно состоит из предварительной обработки кадров, включающей медианную фильтрацию, автонормировку яркости, автоцентрирование по солнечному диску, высокоточное совмещение и обрезку изображений, а также выполнения заранее сформированных алгоритмов пакетной обработки.

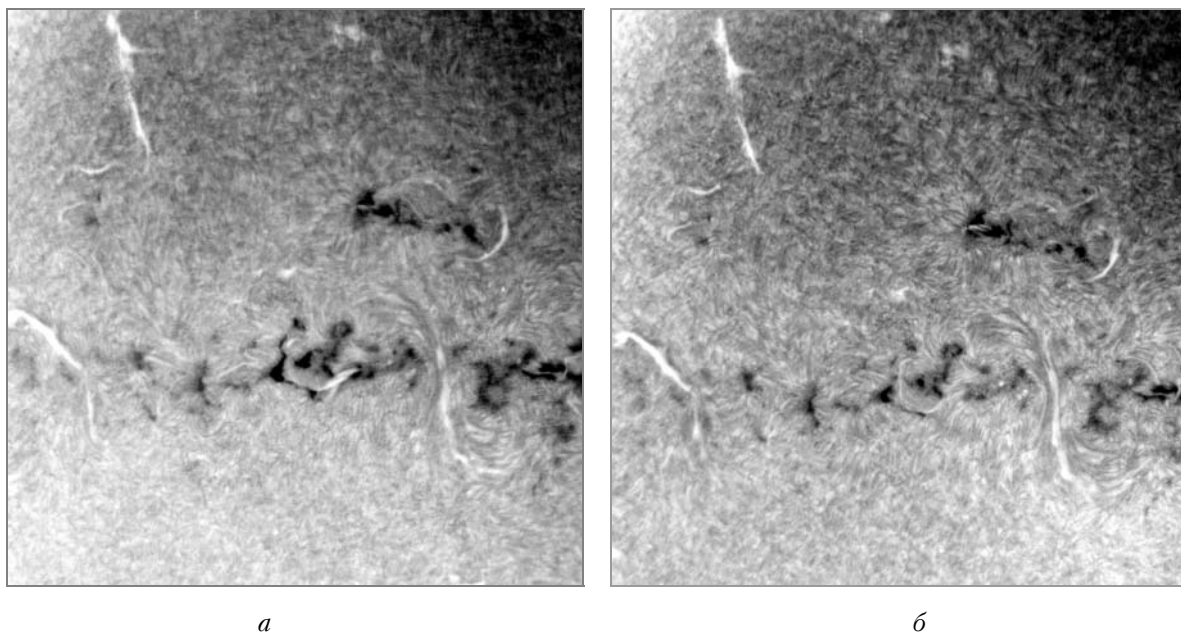


Рис. 2. Фрагмент изображения хромосферы Солнца с разрешением 3,81" (а), 1,77" (б)

Аппаратно-программный комплекс позволяет проводить исследования в широком диапазоне задач физики Солнца. Одной из первых нами была выбрана задача измерения характеристик астроклимата БАО оптическими методами. Был применен алгоритм автоматизированной оценки качества изображения методом «оптимального окна», модифицированным для изображений типа хромосферы Солнца. В качестве материала для анализа использовались цифровые изображения фильтрограмм хромосферы в линии Н-альфа, полученные на БАО в течение 2001–2002 гг. на цифровой камере Princeton Instruments 2048В. Было обработано 12479 кадров размером 2048×2048.

На рис. 3а приведены сравнительные данные гистограмм качества фильтрограмм за весь период наблюдений 2002 г. и только за летний период.

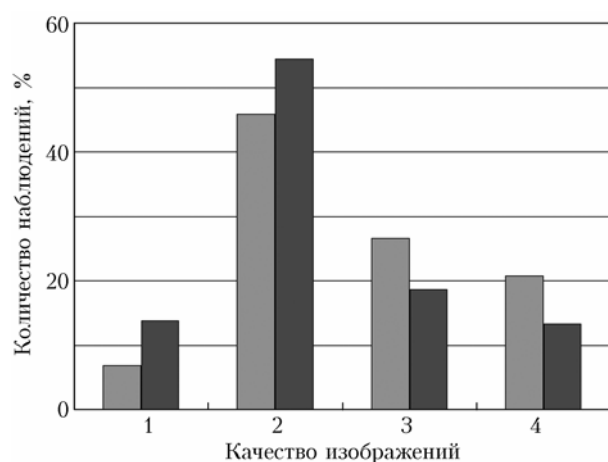


Рис. 3а. Гистограмма качества изображений солнечной хромосферы за май–ноябрь 2002 г. (первый столбец) и июнь–июль 2002 г. (второй столбец): 1 – угловое разрешение лучше 2" («отличное» качество); 2 – угловое разрешение от 2" до 3" («хорошее» качество); 3 – угловое разрешение от 3" до 4"; 4 – угловое разрешение хуже 4"

Если объединить данные 3-го и 4-го столбцов, то нетрудно видеть, что результаты находятся в хорошем согласии с данными рис. 1а, причем доля «отличных» (1) и «хороших» (2) изображений даже немного выше, чем в работе [4], и составляет около 50%. Гистограммы распределения кадров высокого качества по часам в течение дня (суточный ход с 10:00 до 18:00) с интервалом 1 ч показаны на рис. 3б.

Улучшение качества изображений в полуденные часы, с одной стороны, можно объяснить изменением зенитного угла, которое приводит к изменению оптической толщи атмосферы. С другой стороны, в работах [6, 7] авторами теоретически и экспериментально проведены исследования атмосферной турбулентности вблизи мест размещения наземных оптических телескопов. Полученные ими результаты позволили сделать следующий вывод: на телескопах БАО крупные когерентные структуры (когерентная турбулентность) наблюдаются как ночью, так и днем. Колмогоровская турбулентность проявляет себя в переходные периоды: с 9:00 до 11:00 и с 19:00 до 21:00, поэтому дневные наблюдения

предпочтительнее проводить во временном интервале между переходными периодами [6, 7].

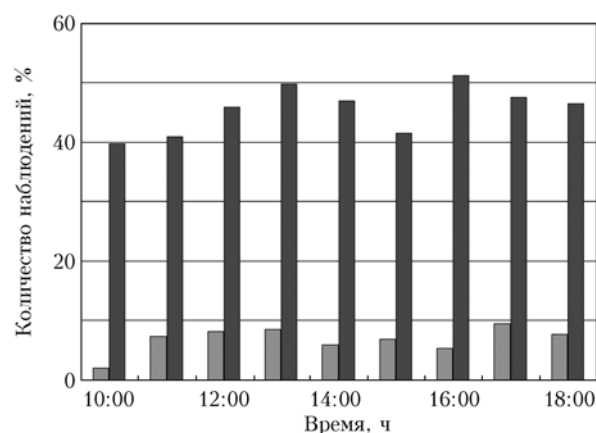


Рис. 3б. Гистограмма кадров «отличного» (первый столбец) и «хорошего» (второй столбец) качества по часам в течение дня до 18:00 (суточный ход)

Наши результаты, полученные независимым путем, полностью подтверждают сделанные ранее выводы. Большой процент изображений хорошего качества, относительно высокая стабильность качества изображения по сезонам, частая встречаемость отличных и хороших изображений в поздние дневные часы положительно характеризуют астроклимат БАО. Связано это со своеобразным характером атмосферных процессов в Байкальской котловине. Над Байкалом существует местная антициклональная зона, обеспечивающая высокую стабильность атмосферы в этом районе. В результате натекания на сушу холодного воздуха с поверхности озера в дневное время происходит эффективное подавление турбулентности в приземном слое.

## Заключение

Анализ фильтрограмм солнечной хромосферы 2001–2002 гг., проведенный на современной аппаратуре с использованием эффективного программного обеспечения в автоматическом режиме, сводящем к минимуму влияние субъективных факторов, подтвердил выводы, полученные ранее [4] при изучении астроклимата БАО по данным 1980–1981 гг. Можно констатировать, что астроклимат Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН по своим характеристикам относится к разряду уникальных и позволяет эффективно выполнять регулярные наблюдения солнечных вспышек и проводить исследования тонкой структуры хромосферных образований в дневные часы.

1. Аксимова М.П., Дарчия Ш.П., Иванов В.И., Нижицкий Г.В. Некоторые результаты исследования астроклимата Сибири // Исслед. по геомагнет., аэронам. и физ. Солнца. 1971. Вып. 6. С. 103–106.
2. Банин В.Г. Астроклиматические характеристики пункта Листвяничное на Байкале // Исслед. по геомагнет., аэронам. и физ. Солнца. 1971. Вып. 20. С. 302–309.
3. Дарчия Ш.П., Иванов В.И., Ковадло В.Г., Куклин Г.В. Дрожание края солнечного изображения и температурные неоднородности в приземном слое атмосферы

- // Исслед. по геомагнет., аэроном. и физ. Солнца. 1971. Вып. 20. С. 310–329.
4. Банин В.Г., Боровик А.В., Трифонов В.Д., Язев С.А. Об астроклимате Байкальской астрофизической обсерватории // Исслед. по геомагнет., аэроном. и физ. Солнца. 1982. Вып. 60. С. 28–34.
  5. *Giamanco C.* How to determine the quality of solar granulation images: the optimal window method // *Astronomy & Astrophys. Supplement Series*. 2000. V. 147. P. 1–4.
  6. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Рекомендации по выбору мест размещения наземных астрономических телескопов // *Оптика атмосф. и океана*. 2010. Т. 23, № 12. С. 1099–1110.
  7. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Практические рекомендации по выбору мест размещения наземных астрономических телескопов // *Солнечно-земная физика*. 2011. Вып. 18. С. 86–97.

***P.A. Konyaev, A.V. Borovik. Estimation of the astronomic climate in the vicinity of the Baykal astrophysical observatory by optical techniques.***

A methodology for measuring the astronomic climate characteristics of the Baykal astrophysical observatory (BAO) from the analysis of the digital image quality, obtained from a full disk solar telescope is proposed. The image quality is estimated by a modified information-statistical “optimal window” algorithm. A large body of data (several thousand frames) is processed automatically using a hardware-software system, developed at the Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS on the basis of NVIDIA® CUDA and Intel® IPP & MKL parallel programming technologies. The results of a statistical analysis of solar chromospheric H-alpha filter-grams, obtained on BAO in 2001–2002 by means of a Princeton Instruments 2048B digital camera, are presented.