



УДК 520.1, 520.8, 520.48, 528.08, 535.8

Астроклимат Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН

А. В. Боровик (aborovik@iszf.irk.ru)

П. А. Коняев (peter@iao.ru)

Аннотация. Рассматриваются особенности астроклимата Байкальской астрофизической обсерватории (БАО), приведена краткая история его изучения. Предложена методика оценки астроклиматических характеристик БАО путем компьютерного анализа изображений, получаемых на хромосферном телескопе полного диска Солнца. Для измерения качества изображений применен модифицированный информационно-статистический алгоритм «оптимального окна». Обработка материала большого объема осуществлялась в автоматическом режиме на аппаратно-программном комплексе, разработанном в Институте оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН. Приведены результаты статистического анализа фильтрограмм солнечной хромосферы в линии H α , полученные в БАО в течение 2001–2002 гг.

Ключевые слова: астроклимат, оптические измерения, компьютерный анализ изображений, атмосферная турбулентность.

Введение

Астрофизики все больше приходят к выводу, что многие важнейшие физические процессы на Солнце, как в спокойных, так и в активных областях, происходят в элементах тонкой структуры солнечной атмосферы с размерами от 1 до 0,2 угл. с. Поэтому для проведения эффективных исследований солнечных вспышек и других нестационарных явлений необходимо, чтобы астроклиматические характеристики обсерваторий позволяли максимально использовать возможности телескопа.

Из практики наблюдений хорошо известно, что изображения высокого разрешения (~1 угл. с) из-за влияния земной атмосферы приходятся всего на 1 % от общего времени наблюдений [5]. Это объясняется тем, что атмосферная турбулентность, воздействуя на волновой фронт, искажает дифракционное изображение, и, если деформации превышают критерий Релея ($1/4\lambda$), то разрешение ухудшается. Изображения с высоким пространственным разрешением обычно устанавливаются только на короткое время. В такие периоды, используя мониторы качества изображения, можно получать достаточно хороший наблюдательный материал с разрешением 1,0 угл. с и лучше (при условии выполнения определенных требований к телескопу). Основным и необходимым условием систематического получения хороших

изображений является устойчивость атмосферы над данным регионом. Чаще такая ситуация складывается в районах господства антициклонов [3].

Байкальская астрофизическая обсерватория Института солнечно-земной физики СО РАН расположена на южном побережье оз. Байкал (долгота – $104^{\circ}53'35''$; широта – $51^{\circ}50'50''$). Как показали многолетние наблюдения, астроклимат БАО по своим характеристикам относится к разряду уникальных. Большая акватория озера, наличие локальной антициклональной зоны, географические особенности района обеспечивают продолжительные периоды стабильного, высокого качества изображения в течение дня и особенно в отдельные сезоны года.

История изучения астроклимата Байкальской астрофизической обсерватории. Первые инструменты

Работы по выбору места под строительство Байкальской астрофизической обсерватории начались в 60-е гг. прошлого столетия в рамках уникального по тем временам проекта «Экспериментальный макет большого солнечного вакуумного телескопа». Телескоп предназначался для исследования тонкой структуры солнечных образований, должен был отвечать самым высоким требованиям и по отдельным характеристикам превосходить существующие аналоги. Работой руководил директор института член-корреспондент АН СССР Владимир Евгеньевич Степанов.

Мировой опыт астроклиматических исследований показывал, что на интенсивность турбулентности влияют как внешние факторы, обусловленные циркуляцией атмосферы, так и локальные, зависящие от особенностей рельефа. Очень хорошие астроклиматические условия могут оказаться на равнине с однородной подстилающей поверхностью. Еще более привлекательной в этом смысле выглядит водная поверхность. Эти и другие практические соображения привели к тому, что программа астроклиматических исследований была направлена прежде всего на изучение котловины оз. Байкал, которая из-за значительной массы холодной воды отличалась малыми изменениями температуры в течение года. В котловине удерживалась инверсия температуры воздуха, эффективно подавляющая конвекцию [10].

В институте была создана лаборатория оптической нестабильности атмосферы, которую возглавил д-р физ.-мат. наук Шота Петрович Дарчия. За три года было исследовано семь пунктов: Листвянка, Большое Голоустное, Торей, Большой и Малый Ушканьи острова, Монды, пункт на льду в 15 км от берега пос. Листвянка. Дополнительные исследования проводились в 2 км от пос. Листвянка на вершине 908 м над уровнем моря. В основном это были визуальные оценки дрожания края солнечного диска и измерения флуктуаций температуры в приземном слое до высоты 20 м [1–2; 6–12].

Результаты исследований показали, что наименьшее дрожание имело место в пункте Малый Ушканьи остров, несколько большее – в пункте Листвянка. Однако, поскольку на Ушканьих островах часто отмечались сильные и ураганные ветры, а в период ледостава и схода ледяного покрова ост-

рова становились малодоступными, предпочтение было отдано пункту Листвянка. Выбор конкретной площадки для строительства обсерватории и большого солнечного вакуумного телескопа был сделан после микроастроклиматического обследования особенностей пункта.

В июле 1968 г. в пос. Листвянка на гребне горы на высоте 70 м над уровнем Байкала началось строительство павильона для первого телескопа Байкальской астрофизической обсерватории АЦУ-24. Место для телескопа выбрал д-р физ.-мат. наук Валерий Гаврилович Банин. Телескоп состоял из целостатной установки (диаметр зеркала – 24 см) на бетонном фундаменте и деревянного павильона, в котором параболическое зеркало ($F = 6$ м) и диагональное строили изображение Солнца диаметром 57 мм. Перед изображением устанавливался интерференционно-поляризационный фильтр фирмы Halle на линию водорода H α . Осенью 1968 г. начались регулярные наблюдения хромосферы Солнца с помощью кинокамеры РФК-5, и уже 5 ноября 1970 г В. Д. Трифоновым была зафиксирована мощная солнечная вспышка.

Опыт, полученный на телескопе АЦУ-24, позволил разработать и построить серию новых хромосферных телескопов. Первый из них – хромосферный телескоп полного диска, спроектированный по оригинальной оптической схеме (Авт. св-во № 800946 Банин В. Г., Трифонов В. Д. и Авт. св-во № 1018092 Банин В. Г., Клевцов Ю. А., Скоморовский В. И.), был установлен в БАО в апреле 1980 г. в башне с куполом на высоте 12 м в 150 м от берега Байкала (75 м над уровнем озера). Диаметр изображения телескопа составлял 50 мм, расчетное разрешение в центре поля зрения – 0,92 угл. с, на краю – 1,3 угл. с. Телескоп, изготовленный в оптической группе под руководством д-ра физ.-мат. наук Валерия Иосифовича Скоморовского, не уступал по основным характеристикам американскому телескопу фирмы «Локхид» и превосходил германский телескоп фирмы «Оптон». По заказу обсерваторий СССР институтом была изготовлена серия подобных телескопов для Ташкентского астрономического института, Львовской астрономической обсерватории, Ашхабадского физико-технического института, Саянской астрофизической обсерватории. Для Байкальской астрофизической обсерватории были изготовлены еще два хромосферных телескопа: телескоп крупномасштабного изображения для наблюдений отдельных активных областей и телескоп для наблюдения полного диска Солнца в линии KCaII.

Данные первых лет наблюдений на хромосферном телескопе полного диска показали его высокие характеристики. Чтобы правильно планировать режим наблюдений и научные задачи, необходимо было выяснить, на какое пространственное разрешение в действительности можно рассчитывать. Были проанализированы фильтрограммы, полученные на телескопе в 1980–1981 гг. [4, 15]. Для определения качества изображений была определена визуальная система баллов (5, 4, 3, 2). Размер наиболее мелких деталей структуры хромосферы, выраженный в угловых секундах (σ''), был принят за диаметр турбулентного кружка размытия как меры качества изображения. Пользуясь только видом хромосферной структуры, можно было довольно уверенно оценить качество фильтрограмм. При балле 5 хромосферная

структура была хорошо различима, четко выделялись узелки, кустообразная структура ярких флоккулов, вихревая структура волоконцев около пятен. На фильтрограммах балла 4 четко выделялись только крупные узелки. Кустообразные структуры флоккулов и вихреобразная структура около пятен только угадывались и различались. При балле 3 эти признаки переходили в разряд угадываемых или неразличимых. Изображения балла 4 еще могли быть использованы для изучения тонкой структуры, балла 3 и 2 были непригодны для этого. Для балла 5 разрешение составляло 1–2 угл. с, для балла 4 – 2–3 угл. с, для балла 3 – 3–4 угл. с и для балла 2 ≥ 4 угл. с. Соотношение изображений разных баллов показано на рис. 1. Встречаемость отличных изображений составила 10,3 %, хороших – 34,5 %, плохих – 21,7 %. Таким образом, отличные и хорошие изображения составляли почти 45 %.

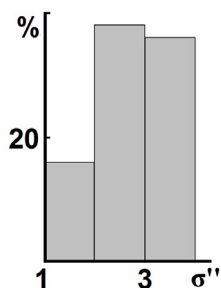


Рис. 1. Гистограмма качества изображений (1980–1981 гг.) [4]

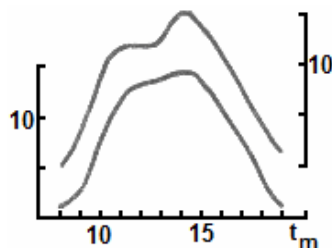


Рис. 2. Распределение хорошего качества изображений в течение дня (в %) [4]

Для 1981 г. на рис. 2 приведено распределение серий кадров хорошего качества изображений в течение дня: нижняя кривая – относительное количество наблюдений, верхняя кривая – относительная частота серий хорошего качества изображений. Серией считалась непрерывная последовательность кадров (не менее 12) с баллом 4 и 5 и единичными плохими и посредственными кадрами. За 1981 г. суммарная продолжительность периодов хорошего и отличного качества составила около 30 % от полного времени наблюдений. Встречались случаи, когда на фильмах с частотой съемки ~ 1 кадр в минуту на протяжении 1–3 ч стабильно сохранялось отличное качество изображений.

По сравнению с результатами исследований 1969–1970 гг. [2; 7], период 1980–1981 гг. по относительному количеству изображений высокого качества был в три раза лучше. Это, по-видимому, было связано с установкой инструмента в башне на высоте 12 м над землей.

Результаты исследования качества изображений в 1980–1981 гг. выявили ряд особенностей, положительно характеризующих астроклимат обсерватории. Это прежде всего относительно высокая стабильность качества изображений по сезонам, высокий процент изображений хорошего качества, частая встречаемость отличных и хороших изображений в поздние дневные часы. До полудня обнаружено постоянство отношения количества «хоро-

ших» периодов к полному количеству наблюдений на данный час и тенденция к возрастанию этого параметра с 13–14 ч местного времени.

Измерение качества изображения

Визуальные оценки астроклиматических характеристик обсерватории, выполненные в 1980–1981 гг., носили оценочный характер и являлись довольно трудоемкими. Из-за малой статистики наблюдений не был определен ход качества изображения в утренние часы. Целью настоящей работы было определить астроклиматические характеристики БАО, используя новейшую методику автоматизированного статистического анализа изображений по большому числу кадров, полученных на хромосферном телескопе полного диска.

Оценка качества изображения, искаженного атмосферной турбулентностью, предполагает наличие алгоритма измерения кружка размытия непосредственно по самому изображению. Для этой цели был взят алгоритм «оптимального окна», предложенный для изображений солнечной грануляции [16]. В отличие от традиционных методов – контрастного, градиентного или спектрального, данный алгоритм «измеряет» минимальный размер детали на изображении. Он является статистическим и основан на вычислении информационного критерия

$$S_p = -r_p \cdot \log_2(r_p) - (1 - r_p) \cdot \log_2(1 - r_p),$$

который имеет 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 пикселах), тем выше качество изображения при прочих равных условиях. Поскольку угловое разрешение пиксела в цифровом изображении солнечного диска известно, то, зная p_0 , легко получить угловое разрешение минимальной детали на изображении.

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, в котором применен алгоритм автоматизированной оценки качества изображения методом «оптимального окна», модифицированным для изображений хромосферы Солнца. 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 большого количества (десятки тысяч) цифровых изображений за минимальное время. Исследование может проводиться как в ручном, так и автоматическом режиме. Как правило, оно состоит из нескольких этапов:

предварительная обработка кадров, включающая медианную фильтрацию, автонормировку яркости, автоцентрирование по солнечному диску; высокоточное совмещение и обрезка изображений, а также выполнение заранее сформированных алгоритмов пакетной обработки.

В качестве демонстрации работы АПК на рис. 3, 4 приведены фрагменты изображений солнечной хромосферы и полученные для них значения пространственного разрешения. Разница во времени между снимками составляет примерно один час.

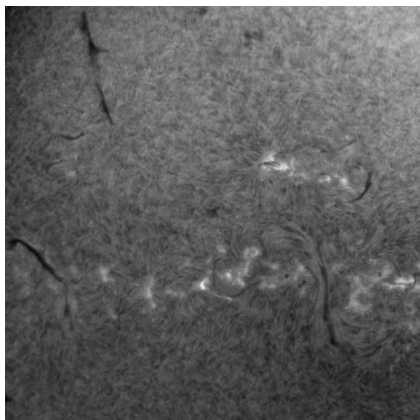


Рис. 3. Фрагмент изображения хромосферы Солнца с разрешением 1,77 угл. с

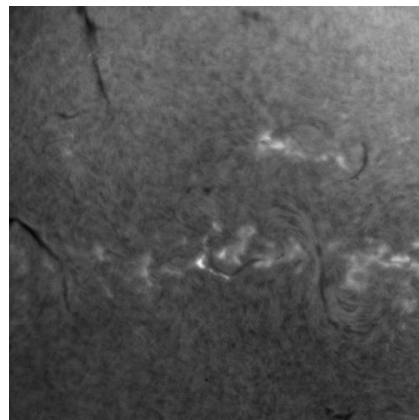


Рис. 4. Фрагмент изображения хромосферы Солнца с разрешением 3,81 угл. с

Для исследования астроклиматических характеристик БАО были использованы цифровые изображения хромосферы Солнца в линии $H\alpha$ размером 2048×2048 , полученные в БАО в течение 20010–2002 гг. на цифровой камере Princeton Instruments 2048 В. Всего обработано 12 479 кадров. На рисунке 5 приведены гистограммы распределения качества изображений за весь период наблюдений 2002 г. и за летний период. На рисунке 6 представлены результаты обработки данных за май-июнь 2002 г.

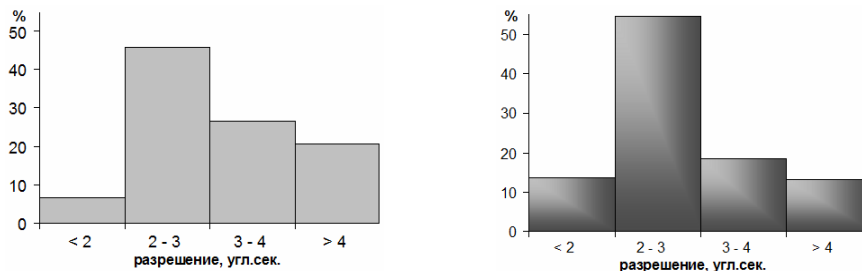
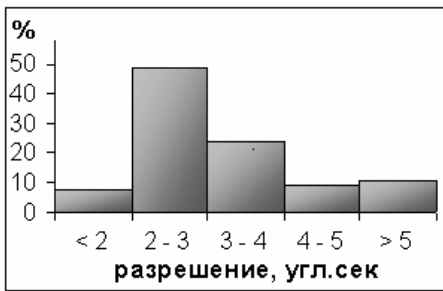
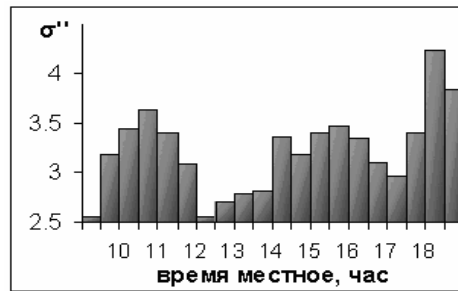


Рис. 5. Распределение качества фильтрограмм за 2002 г.: первый график – май-ноябрь; второй – июнь-июль

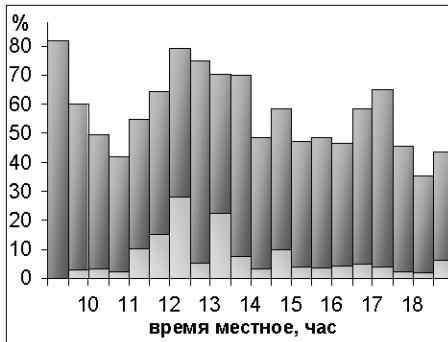
Результаты находятся в хорошем соответствии с данными рис. 1 [4]. Причем доля отличных и хороших изображений даже выше, чем в работе [4], и составляет около 50 % (в летний период более 60 %). За май-июнь (наилучший период наблюдений) встречаемость хороших и отличных изображений составляла 56 %. Распределение качества изображений в течение дня с интервалом в 30 мин (рис. 6, a, b, c) также демонстрирует выявленную ранее в работе [4] закономерность: качество изображений растет с утра до полудня и затем снижается к вечеру. Эта тенденция наиболее заметно проявляется для фильтрограмм отличного качества изображения. Наилучшее время наблюдений – примерно с 11 до 14 ч местного времени. Вместе с тем надо сказать, что при прочих равных условиях возмущения воздушных течений в верхних слоях атмосферы в любой момент могут привести к нарушению общей закономерности. В качестве примера на рис. 7 приведен дневной ход качества изображений 13 августа 2013 г.



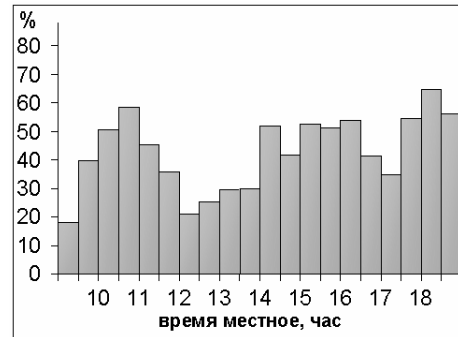
a Гистограмма распределения качества изображения



b Распределение среднего качества изображения в течение дня



c Распределение изображений хорошего и отличного качества в течение дня



d Распределение изображения плохого качества в течение дня

Рис. 6. Распределение качества изображения в мае-июне 2002 г. и с интервалом 30 мин в течение дня (b, c, d)

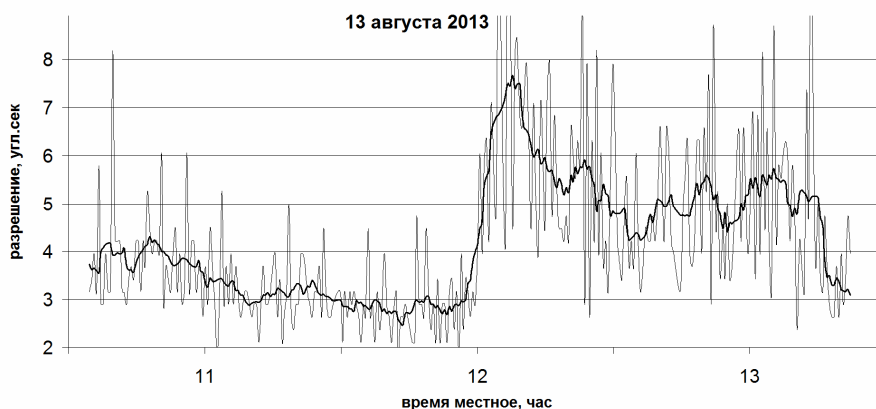


Рис. 7. Изменение качества изображения 13 августа 2013 г. (жирная линия — усредненные данные)

Заключение

Анализ фильтрограмм солнечной хромосферы за 2001–2002 гг., проведенный на современном аппаратно-программном комплексе с использованием эффективного программного обеспечения в автоматическом режиме, сводящим к минимуму влияние субъективных факторов, подтвердил выводы, полученные ранее [4], и дополнил их новыми фактами. Большая доля изображений хорошего качества, относительно высокая стабильность качества изображения по сезонам, частая встречаемость отличных и хороших изображений в поздние дневные часы весьма положительно характеризуют астроклимат БАО. Максимум качества изображений достигается в полуденные часы, а затем падает. Это можно объяснить несколькими причинами. Над Байкалом существует местная антициклональная зона, обеспечивающая высокую стабильность атмосферы в этом районе. В результате натекания на сушу холодного воздуха из озера в дневное время происходит эффективное подавление турбулентности в приземном слое [2]. Изменение оптической толщи атмосферы также может давать улучшение качества в полуденные часы. Авторами работ [13; 14] теоретически и экспериментально было показано, что вблизи мест размещения оптических телескопов Байкальской астрофизической обсерватории 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.

Суммируя вышеизложенное, можно констатировать, что астроклимат БАО сохраняет свои уникальные свойства и позволяет эффективно выполнять исследования тонкой структуры хромосферных образований, проводить регулярные наблюдения солнечных вспышек.

Список литературы

1. Некоторые результаты исследования астроклимата Сибири / М. П. Аксиментова, Ш. П. Дарчия, В. И. Иванов, Г. В. Нижицкий // Исслед. по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца. – 1971. – Вып. 6. – С. 103–106.
2. Банин В. Г. Астроклиматические характеристики пункта Листвяничное на Байкале // Исслед. по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца. – 1971. – Вып. 20. – С. 302–309.
3. Банин В. Г. Требования к современным наземным солнечным телескопам / В. Г. Банин. – Иркутск : СибИЗМИР СО АН СССР, 1977. – 22 с.
4. Об астроклимате Байкальской астрофизической обсерватории / В. Г. Банин, А. В. Боровик, В. Д. Трифонов, С. А. Язев // Исслед. по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца. – 1982. – Вып. 60. – С. 28–34.
5. Брей Р. Солнечные пятна / Р. Брей, Р. Лоухед. – М. : Мир, 1967. – 383 с.
6. Дарчия Ш. П. Особенности изменения амплитуды дрожания при дневных наблюдениях // Атмосферная оптика. – М. : Наука, 1970. – С. 35–42.
7. Дрожание края солнечного изображения и температурные неоднородности в приземном слое атмосферы / Ш. П. Дарчия, В. И. Иванов, П. Г. Ковадло, Г. В. Кукулин // Исслед. по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца. – 1971. – Вып. 20. – С. 310–329.
8. Дарчия Ш. П. Об астрономическом климате СССР / Ш. П. Дарчия. – М. : Наука, 1985. – 176 с.
9. Иванов В. И. О влиянии направления ветра на величину дрожания края солнечного изображения // Атмосферная оптика. – М. : Наука, 1970. – С. 45–54.
10. Ковадло П. Г. Результаты астроклиматических исследований по наблюдениям Солнца и оптическая нестабильность земной атмосферы : дис. ... д-ра физ.-мат. наук / П. Г. Ковадло. – Иркутск, 2003. – 279 с.
11. Ковадло П. Г. Особенности астроклимата на Байкале / П. Г. Ковадло, В. И. Иванов, Ш. П. Дарчия // Астрон. циркуляр. – 1972. – № 706. – С. 3–6.
12. Ковадло П. Г. Исследование структуры турбулентности в приземном слое над озером Байкал / П. Г. Ковадло, В. И. Иванов, Ш. П. Дарчия // Метеорология и гидрология. – 1973. – № 8. – С. 89–92.
13. Рекомендации по выбору мест размещения наземных астрономических телескопов / В. В. Носов, В. М. Григорьев, П. Г. Ковадло, В. П. Лукин, Е. В. Носов, А. В. Торгаев // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 23. – С. 1099–1110.
14. Практические рекомендации по выбору мест размещения наземных астрономических телескопов / В. В. Носов, В. М. Григорьев, П. Г. Ковадло, В. П. Лукин, Е. В. Носов, А. В. Торгаев // Солнечно-земная физика. – 2011. – Вып. 18. – С. 86–97.
15. Язев С. А. О температурном режиме башни хромосферного телескопа Байкальской астрофизической обсерватории / С. А. Язев, П. Г. Ковадло // Исслед. по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца. – 1985. – Вып. 73. – С. 18–22.
16. Giammanco C. How to determine the quality of solar granulation images: the optimal window method // Astronomy & Astrophysics Supplement Series. – 2000. – Vol. 147. – P. 1–4.

The Astronomical Climate of the ISTP SB RAS Baikal Astrophysical Observatory

A. V. Borovik, P. A. Konyaev

Abstract. We propose for method the evaluating astronomical climate characteristics the Baikal Astrophysical Observatory (BAO) by computer analysis of images obtained by the chromospheric telescope for solar full-disk. The modified file computer algorithm of the «optimal window» for the measure the image quality was applied. The processing was made of a large body data was made in automatic mode on hardware-in-the-loop complex which developed in V. E. Zuev Atmospheric Optical Institute of the Siberian Branch RAS on the basis of the parallel programming technology. The results of statistical analysis of solar chromospheric H – alpha filtergrams, which obtained in BAO in 2001–2002 by Princeton Instruments 2048B digital camera, are presented.

Keywords: astronomic climate, optical measurements, image processing, atmospheric turbulence.

Боровик Александр Васильевич
кандидат физико-математических наук,
заведующий обсерваторией
Институт солнечно-земной физики
СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а
тел.: (3952) 79–27–40

Borovik Alexandr Vasil'evich
Candidate of Sciences (Physics and
Mathematics), Head of Observatory
Institute of Solar-Terrestrial Physics
SB RAS
126a, Lermontova st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952) 79–27–40

Коняев Петр Алексеевич
кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник
Институт оптики атмосферы
им. В. Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, Академический пр-т, 1
тел.: (3822) 49–10–60

Konyaev Petr Alekseevich
Candidate of Sciences (Physics and
Mathematics), Research Scientist
Institute of Atmospheric Optics SB RAS
1, Akademicheskii pr., Tomsk, 634021
tel.: (3822) 49–10–60