

ОТЧЕТ ЗА 2007 ГОД ПО ПРОЕКТУ 06-02-16902-а
Изучение высотных распределений атмосферной оптической
турбулентности для оценки перспективы использования
адаптивных оптических систем

В.Г. Корнилов

Аннотация

В течении 2007 г продолжались измерения высотного распределения оптической турбулентности в атмосфере над г. Майданак с прибором MASS первого поколения. В дополнение к наблюдениям 2006 г. получены данные для ≈ 45 ночей. Завершены калибровочные измерения и начата окончательная обработка результатов измерений и анализ полученных данных.

Разработан и смонтирован стационарный астроклиматический пункт (монитор оптической турбулентности) на месте установки нового 2.5 м телескопа южнее г. Кисловодск на высоте 2100 м над уровнем моря.

Питающий комбинированный прибор MASS/DIMM телескоп RCX400 (диаметром 30 см) расположен на высоте 6 м над уровнем почвы. Все операции по проведению измерений оптической турбулентности автоматизированны и могут выполняться под удаленным управлением или автоматически. Налажен круглосуточный сбор метеоданных в этой точке вершины

Измерение оптической турбулентности ведется с сентября 2007 г в режиме удаленного управления через интернет. Получены данные в MASS канале (турбулентность в свободной атмосфере) для 48 ночей и в DIMM канале (интегральная турбулентность) для 55 ночей.

Предварительный анализ этих данных показывает, что по астроклиматическим параметрам исследуемая вершина может быть отнесена к хорошим пунктам (медианное качество изображений $0''.96$).

Abstract

Atmospheric optical turbulence measurements for characterization of adaptive optics efficiency.

During 2007, the measurement of the optical turbulence in the atmosphere above Mt. Maydanak were performed with a first-generation MASS device. In addition to 2006 the ≈ 45 night records were collected. The preliminary data processing confirms the high astronomical potential of the site.

Stand-alone stationary site testing tower with dome and equipment (Automatic Seeing Monitor — ASM) was developed and mounted at the place of the future build of the 2.5 m telescope to south from Kislovodsk at altitude 2100 m above sea level.

Feeding the MASS/DIMM instrument, 30 cm telescope RCX400 is placed at 6 m altitude above summit. All the ASM operation can be doing under remote control via Internet or automatically under local software control. The day-and-night meteo-data acquisition is implemented for this point.

The measurements of the optical turbulence was began in September under remote control via Internet from Moscow. MASS data (free atmosphere turbulence) are collected for 48 nights, DIMM data (whole atmosphere turbulence) — for 55 nights.

The preliminary study of these data shows that median seeing is equal to $0''.96$ and the examined site may be characterized as good astronomical site.

ЦЕЛИ ПРОЕКТА И СТЕПЕНЬ ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ

Объявленные ранее цели проекта на 2007 год: Известно, что данные о высотном распределении оптической турбулентности значимы как для этапа разработки, так и этапа применения адаптивных оптических систем [1]. В последнее время появились работы, оценивающие влияние этой характеристики турбулентности на точность фотометрических и астрометрических наблюдений [2]. Поэтому проект предполагает получение статистически значимого объема измерений оптической турбулентности в нескольких астропунктах, как на действующих обсерваториях, так и в перспективных местах.

Главная цель в 2007 г., поставленная в соответствующей заявке, это разработка и развертывание автоматического монитора оптической турбулентности на вершине г. Шатджатмаз и начало систематического сбора данных об высотном распределении оптической турбулентности (включая приземный слой) в этом месте. Этот монитор должен работать без присутствия оператора-наблюдателя. То, что для получения плотных и объемных рядов измерений действительно необходима полная автоматизация показывает и опыт наших коллег (например, [3]) и наш опыт исследований на г. Майданак. Заметим, что аналогичные роботизированные мониторы, работающие, например в Чили, не рассчитан на высокую влажность и низкие температуры как в большинстве мест на территории России.

Также планировалось завершение разработки и модификации различных компонент программного обеспечения, в частности: модифицированной программы ATMOS2 для более точного восстановления высотного профиля турбулентности с учетом данных DIMM-канала. Планировалось завершить анализ факторов, влияющих на точность измерений как в MASS, так и в DIMM каналах.

Целью 2007 г. было завершение измерений на г. Майданак, анализ полученных данных и выработка рекомендации для разработки систем адаптивной оптики. Планировалось решить организационные вопросы по установке прибора MASS в CAO. Для верификации получаемых данных планировалась взаимная калибровка DIMM-канала и его ПО на одной из ведущих зарубежных обсерваторий.

Степень выполнения поставленных в проекте задач: Главная задача этапа 2007 г. успешно выполнена, хотя и с некоторой задержкой: на вершине г. Шатджатмаз развернут стационарный автоматический монитор оптической турбулентности (астроклиматический пункт). Работа выполнена в полном объеме, дополнительно решены непредвиденные ранее проблемы.

Внешний вид астроклиматического пункта показан на Рис. 1. Его сооружение потребовало привлечение дополнительных средств ГАИШ на строительно-монтажные работы. Также один из основных компонентов — питающий телескоп, был приобретен вне средств гранта РФФИ.

Поскольку астроклиматический пункт расположен примерно в 1 км от ГАС ГАО РАН, его электропитание осуществляется от аккумуляторной батареи емкостью 200 Ач, подзаряжаемых от ветрогенератора мощностью 500 Вт (при ветре 10 м/с) и солнечной батареи



Рис. 1: Общий вид астроклиматического пункта на г. Шатджатмаз с юго-западного направления. Телескоп установлен на бетонном столбе, купол поддерживается металлической вышкой. Ветрогенератор установлен на 4.5 м мачте на крыше вагона, в котором смонтирована система электропитания. На этой же мачте расположены датчики температуры и влажности и анемометр. На переднем плане 10 м мачта грозозащиты.

мощностью 75 Вт. В принципе электроэнергетический баланс положителен, однако при продолжительной безветренной погоде наблюдается нехватка электричества, которую приходится компенсировать ограничением продолжительности измерений.

Структура всего комплекса такова: один компактный компьютер, работающий круглосуточно, осуществляет сбор метеоданных, открывание/закрывание купола, связь с расположенным на территории ГАС компьютером-шлюзом и спутниковым модемом и управление питанием собственно измерительной аппаратуры. К нему же подключены 2 обзорных видео-камеры для контроля подкупольного пространства и внешней территории. В состав измерительной аппаратуры входит второй, более мощный, компактный компьютер, телескоп, прибор MASS/DIMM. Постоянно включенная часть системы потребляет около 20 Вт, а измерительная часть — около 40 Вт.

Нужно признать, что не все научно-технические проблемы удалось решить полностью. Основная причина того, что монитор работает пока только под удаленным управлением, а не в полностью автоматическом режиме — проблема управления телескопом RCX400. Этот телескоп не совсем предназначен для полностью автоматической работы и имеет ошибки в его собственном программном обеспечении. Мировая практика использования подобных, любительского класса, малых телескопов при астроклиматических исследованиях заклю-

чается в смене родной монтировки на монтировку профессионального уровня (стоимостью порядка 1 млн руб).

Несмотря на эту проблему, а также проблему электропитания, возникшую из-за выходя из строя 2 компонент ветрогенератора, измерения производятся с сентября 2007 г в режиме удаленного управления через интернет и данные об оптической турбулентности накапливаются. В настоящее время мы имеем данные в MASS канале (турбулентность в свободной атмосфере) для 48 ночей и в DIMM канале (интегральная турбулентность) для 55 ночей. Локальная метеостанция работает с лета, а датчик ясного неба с прошлого года и соответственно, имеются метеоданные для более чем 150 суток.



Рис. 2: Внутри купола астроклиматического монитора. На заднем плане — ящик со всей электроникой включая точку доступа, сетевой хаб, два компьютера, управляемый блок питания и контроллер купола. Антенна связи с ГАС ГАО закреплена снаружи на северной стороне. Телескоп RCX400 используется в альт-азимутальной установке.

Для функционирования отдельных компонент комплекса были разработаны и отлажены дополнительные программы: **dome** — для контроля электропитанием измерительной аппаратуры и открывания/закрывания купола, **monitor** — для сбора метеоданных, **rcx400_sope** для управления телескопом. Также после начала реальных измерений были несколько модифицированы программы управления для DIMM – канала: **dim** [12] и для MASS – канала: **mass** [13]. В отличие от программ первого поколения — эти программы оптимизированы на удаленное использование и в роботизированных системах. Программа DIMM-канала **dim** в настоящее время используется в ESO и СТЮ. Канарский институт астрофизики также планирует использовать ее в своих DIMM измерениях.

Заметим, что поскольку такой параметр как "качество изображения" многое опреде-

ляет в стратегическом плане для астрономических обсерваторий, то становится понятной та тщательность, с которой подходят к верификации своих приборов астрономы, работающие в этой сфере. Сравнение нашего ПО с другими программами и приборами показывает хорошее совпадение с работающими приборами DIMM в разных астрономических обсерваториях.

Наблюдения на г. Майданак, начатые еще в 2005 г. как совместный проект астрономов Ташкентского астрономического института и нашей группы, и продолженные в рамках настоящего проекта в 2006 и 2007 г. успешно завершены. Полученный объемный материал — свыше 160 ночей — подготовлен к окончательной обработке. Такая вторичная обработка (в дополнение к обработке в реальном времени) связана с контролем параметров прибора в течение всего ряда измерений. Некоторые новые результаты приведены в следующем разделе.

В начале выполнения проекта нами был определен список астропунктов для исследований оптической турбулентности: 1) Майданакская обсерватория в Узбекистане, как одно из лучших мест для астрономических наблюдений по качеству изображений, 2) г. Шатджатмаз — проектируемое место установки 2.5 м телескопа ГАИШ МГУ, 3) САО РАН, г. Пастухова — как место установки самого крупного в восточном полушарии телескопа. Однако, начало работ на месте установки 2.5 м телескопа показало нам, что для параллельной работы в САО у нас не хватит ресурсов, поэтому мы были вынуждены исключить этот пункт исследований из плана работ по проекту на 2007 и 2008 гг.

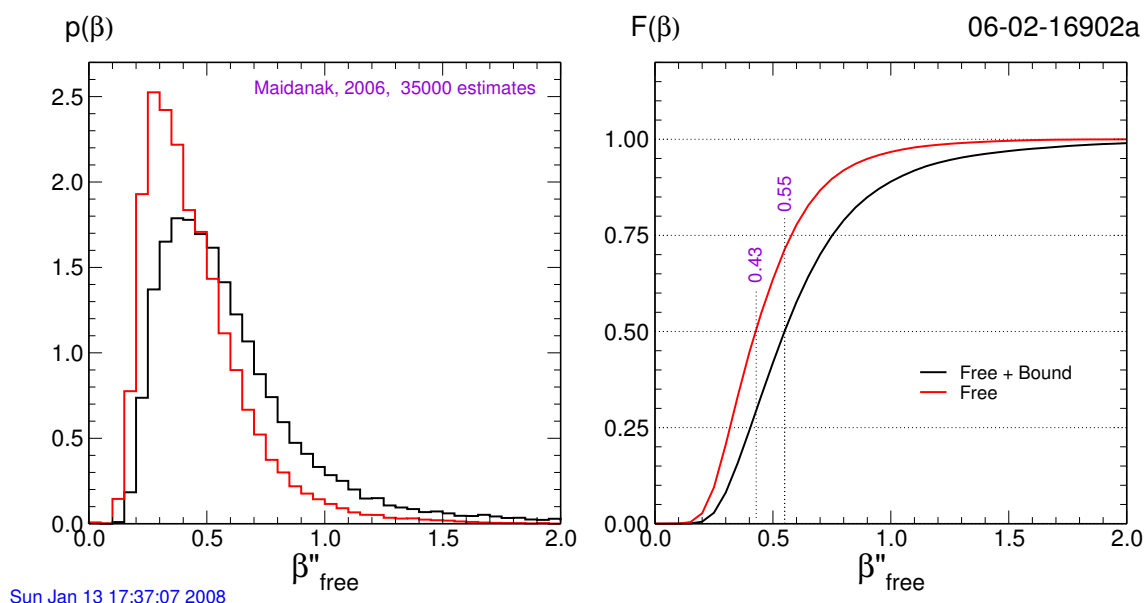


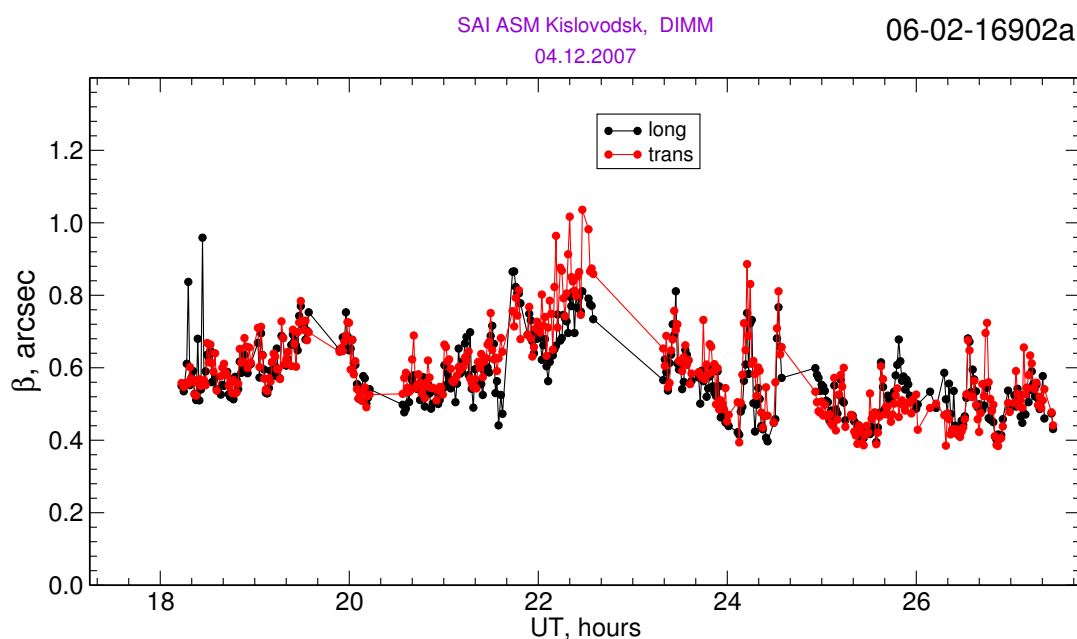
Рис. 3: Статистика качества изображений в свободной атмосфере — выше 1 км (красные линии) и с учетом пограничного слоя — выше 0.5 км (черные линии), построенная по данным измерений 2006 г. Слева — дифференциальное распределение, справа куммулятивное.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные за отчетный период важнейшие результаты: В результате измерений с прибором MASS первого поколения (оригинальный MASS), установленным на телескопе АФР в Майданакской обсерватории, получены данные о высотном распределении оптической турбулентности в течение около 130 ночей за период с 18 августа 2005 г по 10 ноября 2007 г.

На Рис. 3 приведена предварительная статистика мощности оптической турбулентности, пересчитанной для наглядности в соответствующее качество изображения, построенная по результатам измерений в 2006 г. График носит предварительный характер, поскольку построен по 20 с точкам а не по 1 мин, как это обычно принято. К тому же не проводилось никакой фильтрации данных по качеству, кроме самой примитивной. Но заметим, что качество данных достаточно высокое, несмотря на очень плохое часовое ведение телескопа АФР-3.

Предварительный статистический анализ данных показывает, что медианное значение качества изображений в свободной атмосфере (выше 1 км) равно $0''.43$, что свидетельствует о примерно равных вкладах приземного слоя и свободной атмосферы в итоговое качество изображений (медианное значение по литературным данным [4] — $0''.70$). Несколько неожиданным является значительный вклад пограничного слоя (высоты 0.2–1.0 км), медианное значение с учетом этого слоя составляет $0''.55$, оставляя на долю приземного слоя только треть интегральной турбулентности.

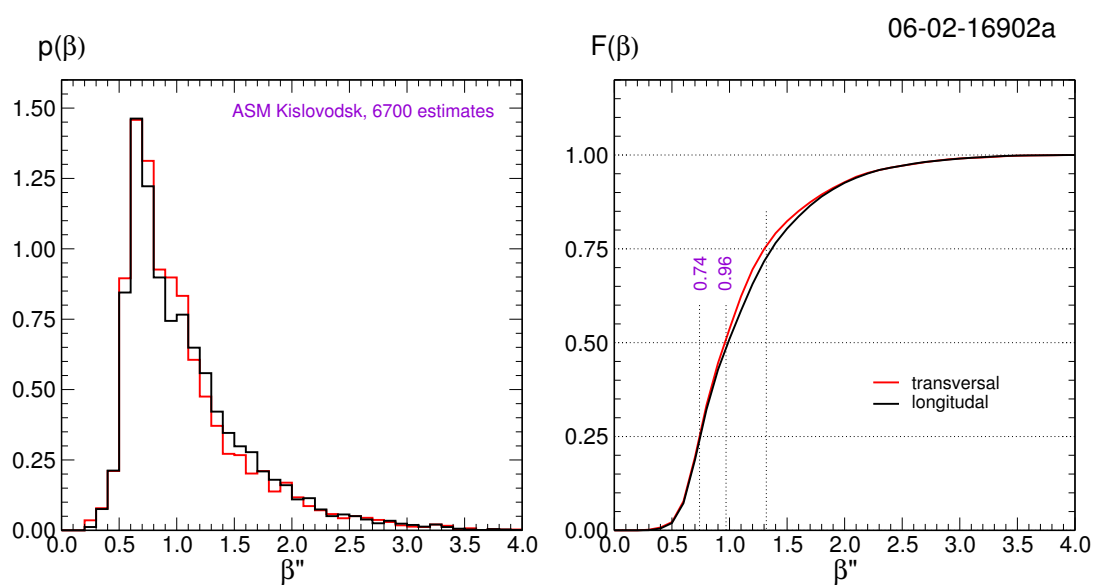


Mon Jan 14 00:42:11 2008

Рис. 4: Результаты измерения интегрального качества изображений в течение ночи 4 декабря. Черные точки — вычислены на основе продольных дрожаний, красные — результат, полученный по поперечным дрожаниям. Последовательно измерялись 4 ярких звезды.

Как уже отмечалось, с сентября 2007 г начались измерения оптической турбулентности над вершиной горы Шатджатмаз, расположенной примерно в 1 км от Горной астрономической станции ГАО РАН и в 30 км к югу от г. Кисловодск. В начальный период измерения проводились не каждую ночь из-за решенных к тому времени технических причин. Однако к концу 2007 г накопились данные в DIMM канале по 55 ночам, а в MASS канале — по 48 ночам. Это объясняется тем, что сначала запускался DIMM канал, а затем MASS. К тому же, до 15 ноября MASS был сильно разъюстирован и возможность получения правильных данных из предшествующих измерений проблематична. На Рис. 4 приведены результаты измерений в DIMM канале в течение хорошей ночи 4 декабря. Черные и красные точки относятся к двум величинам, получаемым в приборе DIMM — продольному и поперечному дрожанию. Эти величины не равны и приводят к одинаковой величине качества изображений если прибор правильно функционирует [6].

Как правило, из-за энергетических ограничений, это не полные ночи. Общее время измерений составляет в DIMM канале около 6000 минут. Тем не менее это достаточно представительный набор данных и на Рис. 5 приведены распределения измеренного интегрального качества изображений в этот период. Отметим, что медианное значение составляет $0''.96$, что в точности совпадает с медианным значением для обсерватории Серро Тололо ($0''.95$, см. [5]). Конечно, трехмесячная статистика не может составить полного и окончательного представления о качестве места, но эта величина весьма обнадеживает.

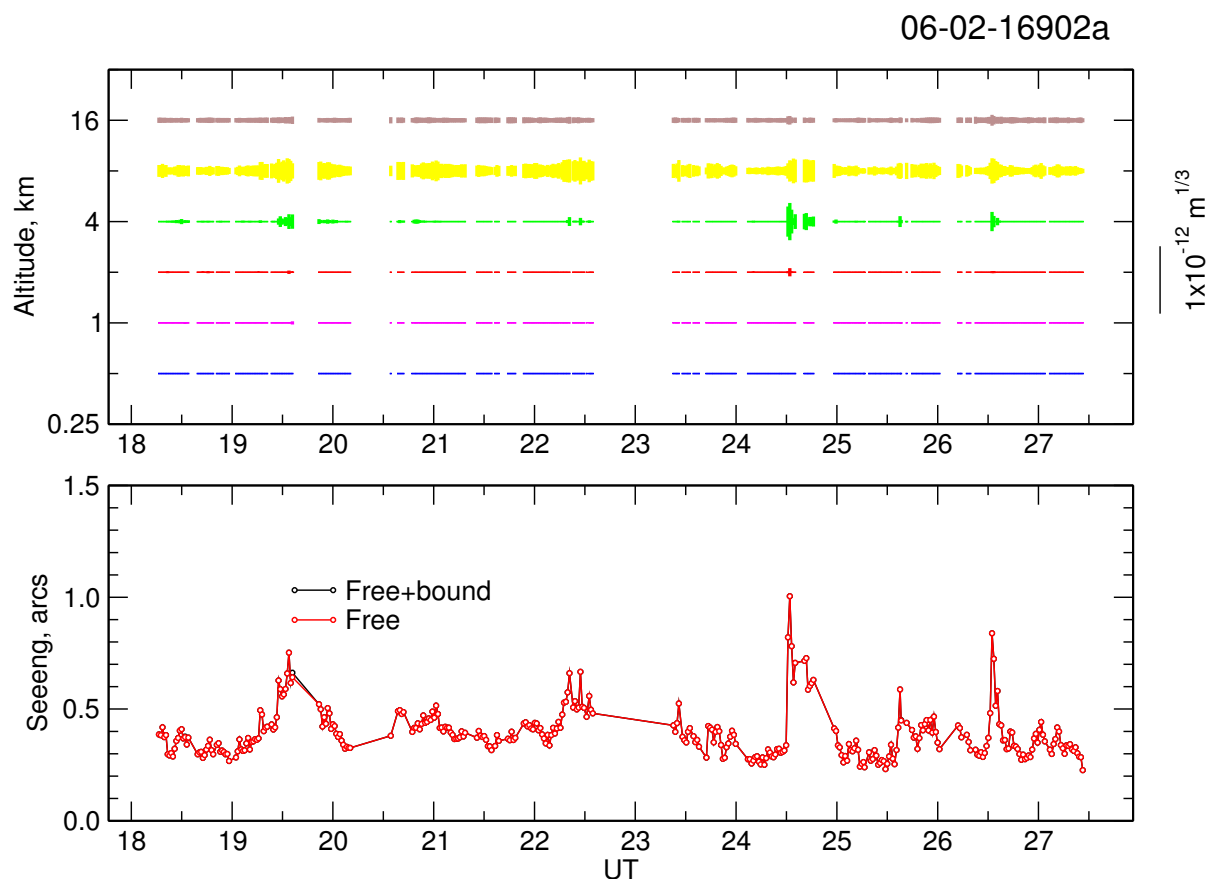


Sun Jan 13 20:22:13 2008

Рис. 5: Справа: дифференциальное распределение интегрального качества изображений по измерениям в период 27 сентября — 31 декабря. Слева: куммулятивное распределение, соответствующее дифференциальному. Черная линия — данные получены по продольным дрожаниям, красная линия — по поперечным.

Измерения турбулентности в свободной атмосфере показывают результаты похожие на те, что мы наблюдали на горе Майданак и в обсерваториях Чили. Как пример, на Рис. 6 показан результат измерений в ту же ночь 4 декабря. Заметим, что конечно, имеются но-

чи, кардинально отличающиеся от приведённой по мощности турбулентности в худшую сторону. В данную ночь в свободной атмосфере доминировала высокая турбулентность, по-видимому, в области тропопаузы. Видны характерные особенности атмосферной турбулентности — временные всплески мощности турбулентности на высотах 4 – 8 км продолжительностью около 10 – 15 минут.



Mon Jan 14 01:23:05 2008

Рис. 6: Результаты измерения высотного профиля мощности турбулентности в течение ночи 4 декабря, сверху. Внизу приведен рассчитанное качество изображения для свободной атмосферы (красные точки) и включая пограничный слой (черные точки). Они практически везде совпадают, поскольку в эту ночь пограничная турбулентность была подавлена. Последовательно измерялись 4 ярких звезды.

В заключение этого раздела рассмотрим статистику качества изображений для свободной атмосферы, аналогичную приведенной для измерений на Майданаке, но значительно более бедную. Она показана на Рис. 7. Несмотря на малый объем данных дифференциальное распределение имеет типичную для всех подобных статистик форму. Более удивительным является факт, что медианное значение в свободной атмосфере $0''.55$ совпадает с соответствующим значением и для Майданака и для Серро Тололо!

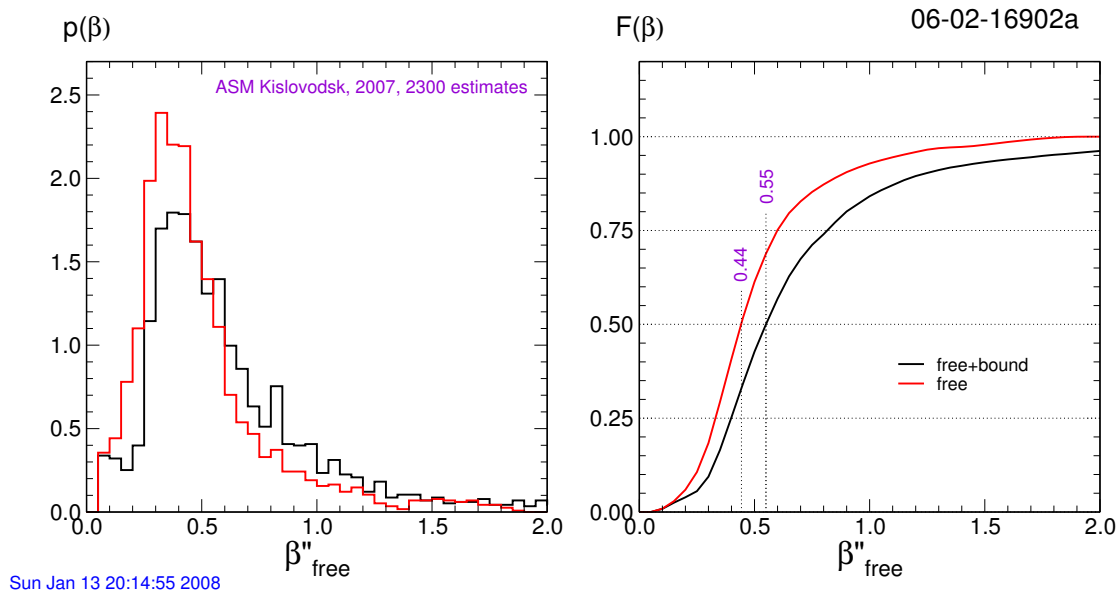


Рис. 7: Статистика качества изображений в свободной атмосфере над вершиной горы Шат-джатмаз. Обозначения те же, что и на Рис. 3.

Методы и подходы, использованные в ходе выполнения проекта: Напомним, что MASS (MultyApertures Scintillation Sensor) канал — это 4-канальный детектор, позволяющий одновременно получать 4 обычных индексов мерцаний звезд и 6 дифференциальных с временным разрешением 1 мс, соответствующих 4 входным апертурам разного размера [8, 7]. Из этих данных и восстанавливается высотное распределение оптической турбулентности в атмосфере Земли [9]. DIMM (Differential Image Motion Monitor) — монитор дифференциальных дрожаний звезд, измеряющий кривизну волнового фронта на базе 20–25 см [10, 6].

Метод DIMM признан базовым методом оценки качества астрономического места с 90-х годов, Метод MASS, разработанный нами в сотрудничестве с ESO и СТЮ, используется всего около 5 лет. Хотя эта методика уже стала классической, в мире работает около 25 таких приборов — все они сосредоточены в западном полушарии (см., например, [16]). На территории России и Средней Азии эта методика до нас не применялась.

В отличие от наших западных коллег, наша группа с самого начала работ по этой теме целенаправленно продвигалась к действительному объединению обоих методов, понимая, что включение в процедуру восстановления данных DIMM-канала существенно повысит обусловленность получаемого решения и уделяя особое внимание учету искажающих результаты факторов.

СТЕПЕНЬ НОВИЗНЫ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Степень новизны полученных результатов: Результаты измерений на г.Майданак безусловно оригинальны и получены впервые, если не считать наших же тестовых измерений с прототипом прибора MASS в 1998–1999 г [11]. Особенно интересны они тем, что

это единственные систематические данные для всего региона Средней Азии, перспективного с астроклиматической точки зрения. Статистика высотного распределения оптической турбулентности получена впервые как для горы Майданак, так и для всего западного полушария.

Оценки качества изображений, полученные современным объективным методом, для района Кавказа также выполнены впервые и представляют значительный интерес для российской астрономии.

Сопоставление полученных результатов с мировым уровнем: Все полученные результаты безусловно находятся на мировом уровне, поскольку мы работаем в тесном контакте с лидирующими группами по выбору мест для крупных телескопов (программа выбора места для 30-м телескопа TMT, программа ESO выбора места для ELT, антарктическая астроклиматическая программа и т.д.) помогая им в освоении методики MASS. Эти группы пользуются нашим программным обеспечением и методикой.

Большой интерес вызывают наша методика и результаты у групп, связанных с разработкой адаптивных оптических систем, например на телескопе WHT, телескопе SOAR.

Список литературы

- [1] Roddier, F. in AO in Astronomy, Cambridge U. Press, New York, ed. F. Roddier, 1990
- [2] S.Kenyon, J.Lawrence, M.Ashley, J.Storey, A.Tokovinin, E.Fossat, arXiv:astro-ph/0604538 v1 26 Apr 2006
- [3] Wang L., Schoeck M., Chanan G., Skidmore W., Bustos E., Seguel J., Blum R., 2006, in Stepp L.M., ed., Ground-based and Airborne Telescopes, Proc. SPIE, 6267, 62671S
- [4] Ильясов С.П., Байджуманов А.К., Саразен М. и др., Письма в Астрон. журн., Т.25. С.156, 1999
- [5] Tokovinin A., Baumont S., Vasquez J., MNRAS, 340, 52, 2003
- [6] Tokovinin A., Kornilov V., MNRAS, V.381, Issue 3, pp. 1179-1189, 2007
- [7] Kornilov V., Tokovinin A., Shatsky N., Voziakova O., Potanin S., Safonov B., MNRAS, V. 382, Issue 3, pp. 1268-1278, 2007
- [8] Kornilov V., Tokovinin A., Voziakova O., Zaitsev A., Shatsky N., Potanin S., Sarazin M., Proc. SPIE, V. 4839, p. 837-845, 2003
- [9] A.Tokovinin, V.Kornilov, N.Shatsky, O.Voziakova, MNRAS, V.343, P.891, 2003
- [10] Sarazin M., Roddier F., Astron. Astrophys. 227, 294, 1990
- [11] Корнилов В., Токовинин А., Астрон.Ж., т.45, с.459, 2001
- [12] V.Kornilov, Turbina-core(D) User Guide (Preliminary). December 24, 2006, http://dragon/mass/download/doc/dimm_soft_description.pdf

- [13] О.Возякова, В.Корнилов, Н.Шатский, Новое программное обеспечение прибора MASS/DIMM. Управляющее ядро Turbina-core(M). Сентябрь 21, 2006, <http://dragon/mass/download/doc/turbina-core.pdf>
- [14] Tokovinin A., PASP, **114**, 1156, 2002
- [15] В.Корнилов, Контроль фотометрической полосы детектора MASS. September 09, 2006, http://dragon/mass/download/doc/mass_spectral_band.pdf
- [16] <http://www.ctio.noao.edu/~atokovin/profiler/maidanak.html>