

ИТОГОВЫЙ ОТЧЕТ ПО ПРОЕКТУ 06-02-16902-а

Изучение высотных распределений атмосферной оптической турбулентности для оценки перспектив использования адаптивных оптических систем

В.Г. Корнилов

Аннотация

В 2007 г. были завершены трехгодичные измерения высотного распределения оптической турбулентности в атмосфере над Майданакской обсерваторией с прибором MASS (Много-апертурный датчик звездных мерцаний) первого поколения, разработанным и изготовленным в ГАИШ. При участии астрономов Ташкентского астрономического института получены данные для 280 ночей в период с августа 2005 г по ноябрь 2007 г. Суммарное время измерений составляет более 1000 часов.

Анализ результатов измерений показывает, что медианное качество изображений в свободной атмосфере (500 м и выше над поверхностью горы) составляет $0''.46$, а угла изопланатизма - $2''.47$. С учетом большого значения атмосферной постоянной времени (свыше 7 мс) условия Майданакской обсерватории благоприятны для проведения интерферометрических наблюдений. Вклад приземного слоя атмосферы в полную оптическую турбулентность оценен в 60%, что в перспективе позволяет использовать адаптивные оптические системы, сопряженные с низкими атмосферными слоями.

В ходе выполнения проекта разработан (в 2006 г) и развернут (в 2007 г) автоматический астроклиматический монитор на горе Шатджатмас (30 км к югу от Кисловодска). В качестве измерительной аппаратуры в нем используется комбинированный прибор MASS/DIMM, позволяющий получать высотное распределение оптической турбулентности в $7 \div 9$ слоях, включая приземный слой. С февраля 2008 г, по завершении процесса отладки, монитор работает в автоматическом режиме.

На 1 января 2009 г получены измерения для 240 ночей в течение 900 часов. Наши данные позволяют сделать вывод о том, что наилучшие условия для астрономических наблюдений реализуются в период с августа по март и оценить полное ясное ночное время в 1300 часов в год. Медианное качество изображений в период измерений составило $1''.03$ в летний период и $0''.91$ в зимний, качество изображений в свободной атмосфере $0''.49$. Эти характеристики близки к аналогичным для обсерватории Серро Тололо, несколько уступая в количестве ясного ночного времени.

Abstract

Atmospheric optical turbulence measurements for characterization of adaptive optics efficiency.

The measurements of the optical turbulence altitude profiles have been carried out at Maidanak observatory in 2005–2007 with original MASS device (Multi Aperture Scintillation Sensor) together with Tashkent astronomical institute staff. The device was developed and manufactured in SAI in 2000–2002. Total data collection covers 280 nights (about 1000 hours of the measurements) from August 2005 to November 2007.

Data processing and optical turbulence distribution examination show that median value of the free atmosphere (500 m and higher) seeing is $0''.46$ and median value of the isoplanatic

angle is $2''47$. Taking into account large enough atmospheric coherence time (above 7 ms), the condition of Maidanak observatory is advantageous for interferometric observation programs. Ground layer fraction in whole turbulence, was estimated as large as 60%, that leads to perspective use a ground layers adaptive optics in this place.

New automatic seeing monitor was developed in 2006 and installed in 2007 at mount Shatzhatmaz (30 km to south from Kislovodsk, 2100 m above sea level). The monitor contains the combined MASS/DIMM device as optical turbulence sensor. The device permits to determine altitude profile of the optical turbulence for $7 \div 9$ layers, including ground layer too. After adjustment and debugging in September 2007 – February 2008, the seeing monitor works quite automatically. To this moment, the data for 240 nights (about 900 hours) have been collected.

The data permit to conclude that best for astronomical observations season is August – March with yearly clear night time about 1300 hours. In the period of the turbulence monitoring, the median seeing was $1''03$ in summer days and $0''91$ in winter time. Free atmospheric seeing is equal to $0''49$. These values are close to corresponding for Cerro Tololo observatory, for example.

ЦЕЛИ ПРОЕКТА И СТЕПЕНЬ ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ

Объявленные ранее цели проекта на 2008 год: Известно, что данные о высотном распределении оптической турбулентности необходимы для объективной оценки потенциала оптической обсерватории, особенно с точки зрения таких перспективных методов, как адаптивные оптические системы, интерференционные измерения [1, 2, 3, 4, 5]. Эта характеристика турбулентности позволяет также оценить предельную точность фотометрических и астрометрических наблюдений [6, 7, 8]. Поэтому наш проект предполагал получение статистически значимого объема измерений оптической турбулентности в нескольких астропунктах, как на действующих обсерваториях, так и в перспективных местах, а именно:

1. Майданакская обсерватория в Узбекистане, как одно из лучших мест для астрономических наблюдений по качеству изображений,
2. гора Шатджатмаз — место установки 2.5 м телескопа ГАИШ МГУ,
3. гора Пастухова, САО РАН — как место установки самого крупного в восточном полушарии телескопа.

К сожалению, планируемые нами ранее измерения турбулентности в САО пришлось исключить из проекта из-за нехватки для этого ресурсов.

Трехлетний цикл измерений на горе Майданак был завершен в ноябре 2007 г и для завершения этой части проекта планировалась финальная переобработка данных с целью получения однородного и качественного статистического материала, анализ этих данных и подготовка соответствующей публикации.

Для объективной характеристики исследуемого места установки 2.5 м телескопа ГАИШ, требуется, как минимум, годовая статистика оптической атмосферной турбулентности над вершиной. Поэтому основная цель этапа 2008 года заключалась в организации и проведении бесперебойных измерений в течение всего года на вершине г. Шатджатмаз.

Степень выполнения поставленных в проекте задач: Наблюдения на горе Майданак были начаты еще в 2005 г как совместные исследования ученых Ташкентского астрономического института и нашей группы. В 2006 – 2007 эти исследования были продолжены,

уже при поддержке настоящего проекта. При подготовке этой программы, мы исходили из того, что в Майданакской обсерватории в течение длительного времени исследовалось общее качество изображений при помощи прибора DIMM. Первоначальный план предполагал наблюдения до начала 2007 г, но оказалось возможным продлить их до конца осени 2007 без разработки специальной питающей оптики для прибора MASS. Объем полученных данных (280 ночей при общей продолжительности измерений более 1000 часов) позволяет заключить, что основная цель этой кампании была достигнута.

Окончательная обработка данных и анализ результатов, проведенные в 2008 г подтвердили, что были получены однородные и высококачественные данные. По результатам этих исследований была подготовлена и отправлена в редакцию статья в журнал "Письма в Астрон. Журнал".

Задача подготовки комбинированного прибора MASS/DIMM для проведения параллельных измерений в другом пункте, также была полностью выполнена. Мы отказались от разработки специальной камеры, установив в DIMM-канале высококачественную индустриальную ПЗС камеру. Необходимое для работы этого прибора программное обеспечение было полностью завершено к началу измерений с этим прибором.



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.

Из не-прозвучавших ранее целей и задач отметим разработку и фактическую реали-

зацию проекта автоматического монитора оптической турбулентности, работающего без присутствия оператора-наблюдателя. То, что это действительно необходимо для получения плотных и объемных рядов измерений показывает и опыт наших коллег и наш опыт исследований на г. Майданак. Заметим, что аналогичные роботизированные мониторы, работающие, например в Чили [9], не рассчитаны на высокую влажность и низкие температуры как в большинстве мест на территории России. Эта задача была успешно выполнена в 2007 г: на горе Шатджатмаз развернут стационарный автоматический монитор оптической турбулентности (астроклиматический пункт). Достаточно подробно автоматический монитор оптической турбулентности описан в отчете по настоящему проекту 2007 г [10].

Нужно признать, что решение связанных с АСМ научно-технических проблем растянулось на достаточно длительный период. Только в феврале 2008 г монитор стал работать в полностью автоматическом режиме. Основной проблемой оказалась специфика управления телескопом RCX400. Этот телескоп не совсем предназначен для полностью автоматической работы и имеет ошибки в его собственном программном обеспечении. Дополнительно, до лета 2008 г периодически возникали проблемы с электропитанием, возникающие из-за поломок ветро-генератора.

Управлением работой всего комплекса занимается программа **ameba**, стартующая каждые сутки незадолго до начала ночи. Условиями для проведения наблюдений является: Солнце находится под горизонтом ниже -12° , скорость ветра ниже 9 м/с, температура неба на 22° ниже окружающей температуры, напряжение на аккумуляторах больше 22 В. Если все эти условия выполнены, автоматически открывается укрытие телескопа и включается компьютер, предназначенный только для проведения измерений, аппаратура инициализируется, выбирается из специального списка объект для измерений, телескоп наводится на звезду и начинаются измерения.

Периодически проверяются оптимальность текущего объекта измерений и внешние условия. Если с течением времени другой объект становится предпочтительнее для измерений, происходит перенаведение телескопа. Если внешние условия меняются так, что наблюдения продолжать далее нельзя, аппаратура переводится в парковое состояние, укрытие закрывается и компьютер выключается.

В настоящее время автоматический монитор оптической турбулентности работает практически все ясное ночное время и мы имеем данные измерений для 200 ночей при общем времени измерений 900 часов. Проведенная предварительная обработка также, как и в случае измерений на Майданакской обсерватории, показала, что полученные данные имеют высокое качество и однородность и могут быть использованы для оценки эффективности использования АО на 2.5 м телескопе и для определения основных характеристик этой системы.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные за отчетный период важнейшие результаты: Программа измерений на горе Майданак

В результате измерений с оригинальным MASS, установленным на телескопе АФР в Майданакской обсерватории, получены данные о высотном распределении оптической турбулентности в течение 280 ночей за период с августа 2005 г. по ноябрь 2007 г. Полное время наблюдений составило свыше 1000 часов. После обработки данных и их фильтрации по критериям качества для дальнейшего статистического анализа имеется около 50 тыс.

Таблица 1: Продолжительность измерений в ночах и часах по месяцам в 2005 – 2007 г.

Сезон Месяцы	2005		2006		2007	
	ночей	часов	ночей	часов	ночей	часов
январь	—	—	—	—	1	0.1
февраль	—	—	8	20.5	4	15.5
март	—	—	12	27.2	6	8.8
апрель	—	—	17	71.6	6	15.7
май	—	—	23	84.1	10	23.5
июнь	—	—	—	—	2	4.8
июль	—	—	—	—	26	72.5
август	14	58.8	—	—	25	87.8
сентябрь	30	210.0	—	—	21	105.1
октябрь	23	73.8	14	15.9	20	61.4
ноябрь	5	34.2	5	9.6	7	18.5
декабрь	—	—	—	—	—	—

высотных профилей оптической турбулентности и примерно столько же интегральных характеристик атмосферной турбулентности. Итоговая статистика наблюдений приведена в Таблице 1. Распределение измерений достаточно хорошо соответствует распределению ясного ночного неба на Майданаке.

Пример результатов измерений с прибором MASS показан на Рис. 2 для типичной ночи 9 сентября 2005 г. Наблюдается спорадическое, иногда достаточно кратковременное, повышение мощности турбулентности в разных слоях. Турбулентность в начале ночи эволюционировала по высоте, постепенно снижаясь. В конце ночи доминировала турбулентность на высоте около 4 км.

В результате переобработки данных измерений было получено свыше 50 000 интегральных атмосферных параметров и столько же высотных профилей турбулентности. Каждый профиль характеризуется значениями интенсивности турбулентности в 6-ти слоях, центрированных на высотах 0.5, 1, 2, 4, 8 и 16 км. Чтобы избежать неоднозначности, подчеркнем, что получаемые в результате величины — это не $C_n^2(h_i)$, а $J_i = C_n^2(h_i)\Delta h_i$. Качество изображения, соответствующее всей толще атмосферы за исключением приземного слоя, обычно называется качеством изображения в свободной атмосфере β_{free} . Надёжная оценка этой величины получается при учёте всех слоёв $h \geq 0.5$ км [11, 12].

На Рис. 3 показаны кумулятивные распределения вклада оптической турбулентности разных частей атмосферы в качество изображения. Другими словами — каким было бы качество изображения, если бы наблюдения выполнялись не с поверхности вершины, а с некоторой высоты. Дополнительно на графике нанесено распределение β_{free} , полученного как интегральный параметр атмосферы, т.е. без восстановления профиля. Видно, что в статистическом смысле эти величины идентичны. Так, медианное значение качества изображений в свободной атмосфере (выше примерно 250 м над поверхностью горы) составляет 0''46.

Угол изопланатизма, определяющий поле зрения классической адаптивной системы, со-

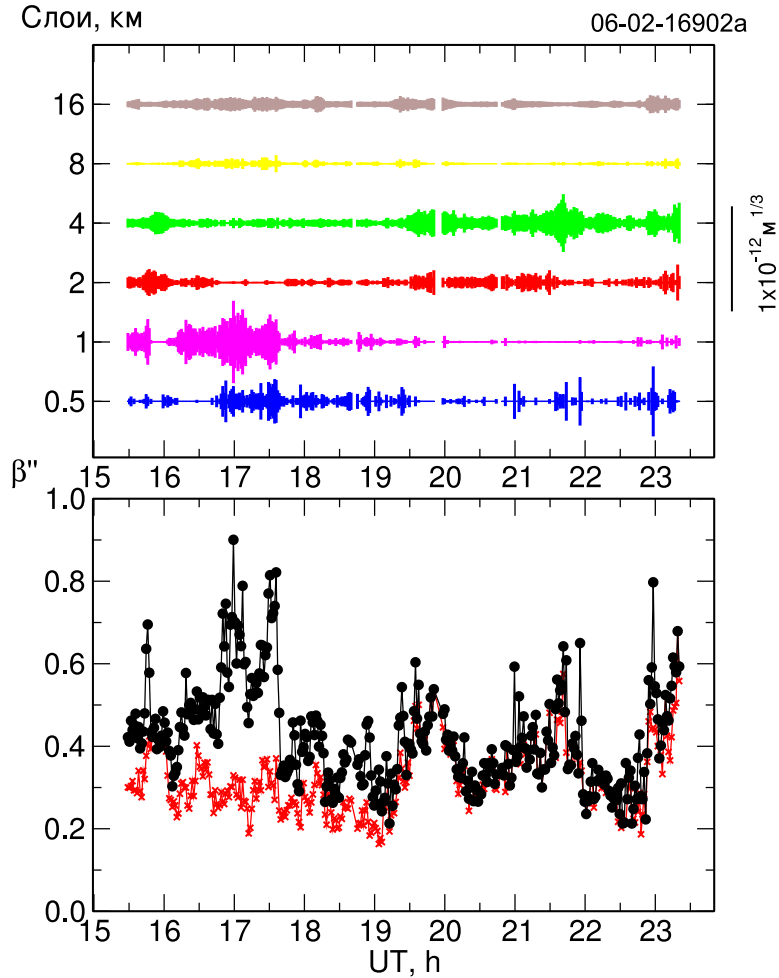


Рис. 2: Результаты измерений 9 сентября 2005 г. Вверху: представление мощности турбулентности для 6-ти высотных слоев. Масштаб обозначен вертикальным отрезком справа. Внизу: поведение β_{free} (кружки) в течение ночи. Крестиками обозначено качество изображения β , формируемое атмосферой начиная с высоты 2 км.

ставляет $2''.19$ для всех измерений и $2''.57$ при селекции 50% лучших ночей. Атмосферная постоянная времени оценивается в 7 мс, что является лучшим показателем среди всех действующих астрономических обсерваторий мира. Для всех этих характеристик наблюдаются некоторые сезонные вариации, подтверждающие информацию, что на Майданакской обсерватории осень – наиболее благоприятное время для астрономических наблюдений.

Сравнение с опубликованной величиной для полного качества изображений на горе Майданак $\beta = 0''.69$ [13] позволяет оценить вклад нижних слоев атмосферы (включая приземный) как 60%, что является достаточно типичной величиной [14, 15]. Доля приземного слоя зависит от полной мощности оптической турбулентности в атмосфере, она может значительно вырасти при ухудшении ситуации. При оптимальной реализации адаптивной оптики, сопряженной с нижними слоями, возможно получение качества изображений лучше $0''.3$ при поле зрения около 3 угловых минут [16].

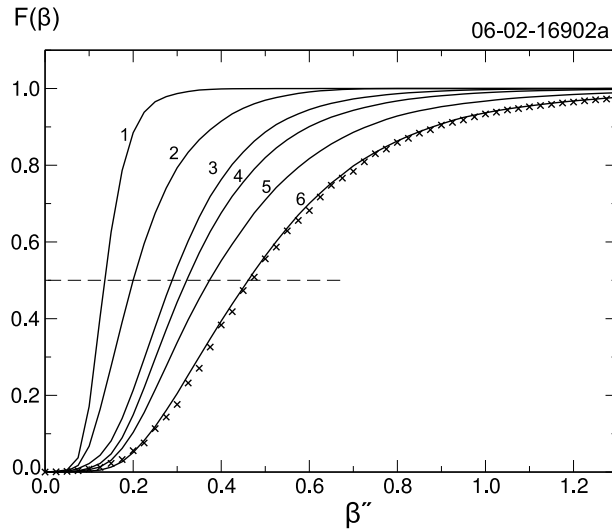


Рис. 3: Кумулятивное распределение вклада в качество изображения по нарастающей толщине атмосферы: 1 — 16 км слой, 2 — 8 км и выше слой, 3 — 4 км и выше, 4 — 2 км и выше, 5 — 1 км и выше, 6 — вся атмосфера от 0.5 км и выше. Крестики — распределение интегральной оценки качества изображения.

Полученные за отчетный период важнейшие результаты: Программа измерений на горе Шатджатмаз

Как уже упоминалось выше, разработан и развернут автоматический монитор оптической турбулентности (астроклиматический пункт) и начаты регулярные измерения оптической турбулентности, в том числе и ее высотного распределения, на горе Шатджатмаз около ГАС ГАО РАН в месте планируемой установки 2.5 м телескопа ГАИШ. Также, к настоящему времени накоплен 1.5 годичный материал о локальной метео-ситуации.

В результате измерений с прибором MASS/DIMM, входящем в состав автоматического монитора, получены данные для 200 ночей общей продолжительностью около 900 часов. Заметим, что эти данные получены в основном в автоматическом режиме и поэтому являются более плотными и однородными чем данные, полученные для горы Майданак. Сведения о динамике выполнения наблюдений приведены в Таблице 2. При расчете числа наблюдательных ночей не учитывались ночи, в которые наблюдали менее 0.5 часа, число этих ночей указано в скобках. В последней колонке приведена для сравнения продолжительность астрономической ночи — абсолютный верхний предел продолжительности наблюдений.

В результате текущей предварительной обработки измерений получены следующие астроклиматические характеристики для этой вершины: медиана распределения общего качества изображений составляет 1"03 с марта по сентябрь и 0"91 с сентября по март, а за весь период наблюдений — 0"95. Соответствующее кумулятивное распределение качества изображений представлено на Рис. 4. Следует обратить внимание, что в 10% случаев реализуется качество изображения лучше чем 0"60. Для сравнения, такое же значение на Майданакской обсерватории можно наблюдать в 35% случаев [17].

Таблица 2: Продолжительность измерений оптической турбулентности на горе Шатджатмаз по месяцам в 2007 и 2008 гг.

год	месяц	MASS		DIMM		астр. ночь часы
		ночи	часы	ночи	часы	
2007	сентябрь	0	0.0	1 (+0)	1.5	245.0
	октябрь	3 (+4)	4.0	9 (+1)	53.2	302.3
	ноябрь	5 (+1)	15.1	8 (+3)	27.4	327.9
	декабрь	11 (+1)	28.5	11 (+2)	28.9	356.2
	итого	19 (+6)	47.6	29 (+6)	111.0	1231.4
2008	январь	17 (+2)	34.3	18 (+1)	33.8	347.7
	февраль	18 (+2)	62.7	17 (+4)	56.7	296.7
	март	8 (+4)	19.9	7 (+4)	17.5	271.9
	апрель	10 (+4)	25.5	10 (+4)	24.4	208.9
	май	8 (+2)	16.8	8 (+2)	16.7	155.6
	июнь	8 (+5)	26.0	8 (+5)	24.9	113.0
	июль	5 (+5)	12.8	5 (+5)	12.7	137.4
	август	17 (+3)	58.6	17 (+3)	56.6	195.2
	сентябрь	13 (+2)	53.5	12 (+3)	53.6	245.0
	октябрь	22 (+1)	150.1	22 (+1)	143.6	302.3
	ноябрь	23 (+1)	164.0	23 (+1)	164.4	327.9
	декабрь	23 (+4)	185.0	24 (+3)	187.6	356.2
	итого	172 (+35)	809.0	171 (+36)	792.5	2957.8

Медианное значение качества изображений в свободной атмосфере равно $0''49$, что незначительно уступает соответствующей характеристике для Майданака. По полному качеству изображения и качеству изображения в свободной атмосфере исследуемое место несколько превосходит такую обсерваторию как Серро Тололо [18].

Угол изопланатизма составляет $2''14$, что несколько меньше чем на Майданаке, а постоянная времени существенно меньше — около 3 мс. Рис. 5 показывает относительный вклад различных слоев атмосферы (не включая приземный слой) в зависимости от общей мощности оптической турбулентности. Видно, что в условиях слабой турбулентности доминирует высокие (8 и 16 км) слои. Объясняется это тем, что эти слои захватывают в себя тропопаузу — слой, где постоянно присутствует сравнительно мощная турбулентность. Турбулентность на более низкой высоте зависит от присутствия средне-масштабных явлений, таких как циклоническая активность в атмосфере, а в самых нижних слоях — и от локальных явлений.

Используя одновременные измерения в обоих каналах — MASS и DIMM, можно получить надежную оценку для приземного слоя в толще от 0 до ≈ 300 м над поверхностью и, соответственно, его типичный вклад в полное качество изображения. Эта данные представлены на Рис. 6, где изображена кумулятивная вероятность появления определенной доли приземного слоя. Видно, что медианное значение вклада приземного слоя составляет

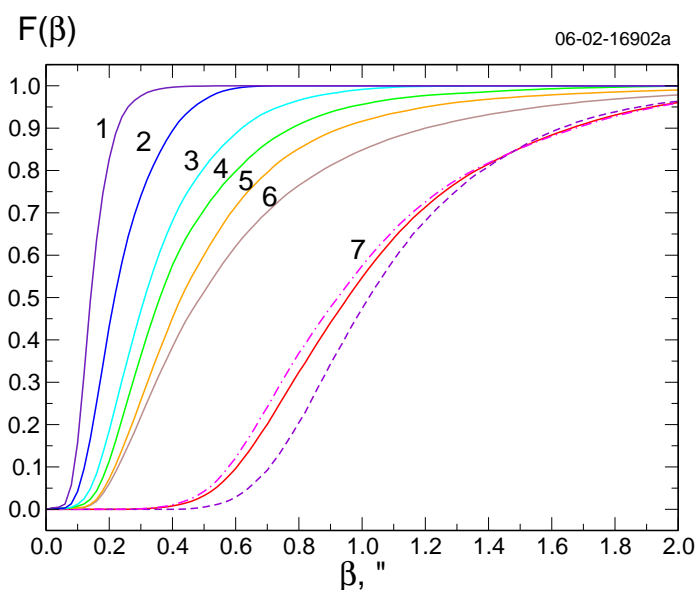


Рис. 4: Кумулятивное распределение вклада в качество изображения по нарастающей толщине атмосферы: 1 — 16 км слой, 2 — 8 км и выше слой, 3 — 4 км и выше, 4 — 2 км и выше, 5 — 1 км и выше, 6 — вся атмосфера от 0.5 км и выше. 7 — распределения качества изображения по данным DIMM, относящиеся ко всей толщине атмосферы. Сплошная — для всего периода измерений, штрих-пунктирная — зимние измерения, штриховая — летние

68%, причем, в условиях хороших изображений эта величина может увеличиться до 70%. Это заметно больше, чем для лучших обсерваторий мира (где эта величина около 60%, см. [15, 14]), однако выигрыш при применении адаптивной оптики может оказаться даже больше.

Совместный анализ приземной турбулентности и направления и скорости ветра показывают определенную связь, которая должна быть учтена при возведении разного рода строений на площадке будущей обсерватории.

Оценка потенциального годового наблюдательного времени для горы Шатджатмаз составляет 1300 часов. Однако, эта величина подлежит уточнению после завершения зимнего сезона 2008 – 2009 гг, поскольку основана на показаниях датчика облачности по температуре неба (1430 часов), а не на наших реальных измерениях. В любом случае, подтверждено известное по рассказам старожил, явное преобладание зимней погоды над летней и по продолжительности ясного ночного времени и по качеству изображений.

Методы и подходы, использованные в ходе выполнения проекта: Основой применяемого нами метода является измерение мощности оптической турбулентности на луче зрения по амплитудным и фазовым флуктуациям световой волны. Поскольку это прямые методы — они наиболее приемлемы для оптической астрономии и дают максимальную точность при минимальных дополнительных предположениях.

Много-апертурный датчик мерцаний (MASS) предназначен для измерения амплитудных

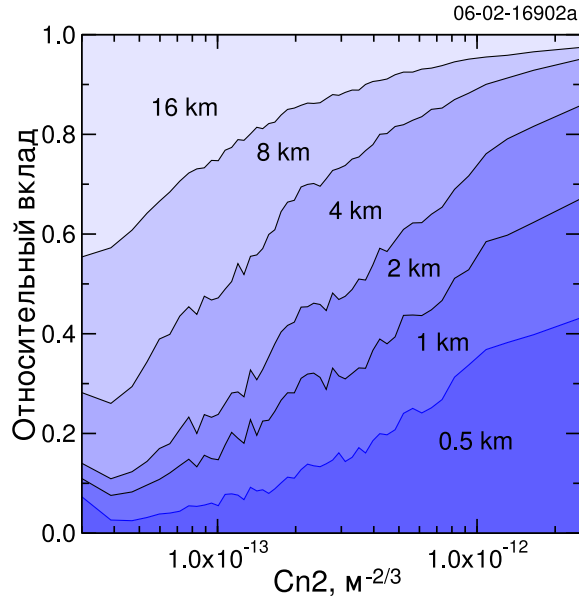


Рис. 5: Структура турбулентности в свободной атмосфере в зависимости от общей интенсивности оптической турбулентности по данным MASS

флюктуаций световой волны в 4 апертурах разного размера и позволяющий одновременно получать 4 обычных индекса мерцаний звезд и 6 дифференциальных индексов с временным разрешением 1 мс [11, 19]. Из этих данных восстанавливается высотное распределение оптической турбулентности в атмосфере [12, 20]. Этот метод имеет принципиальное ограничение — он не чувствителен к приземной турбулентности, что компенсируется применением второго метода.

DIMM — монитор дифференциальных дрожаний звезд, измеряющий кривизну волнового фронта на базе 20–25 см [21] одинаково чувствителен и к низкой и к высокой турбулентности. Оба метода опираются на Колмогоровскую модель турбулентности, однако отличия от этой модели на границах инерциального диапазона не меняют существенно результат, поскольку речь идет о прогнозах для телескопов размером 1 – 10 м.

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 6 лет. Хотя эта методика уже стала почти классической (в мире работает свыше 25 таких приборов) — все они сосредоточены в западном полушарии. Заметим, что все эти приборы работают с нашим оригинальным программным обеспечением как для сбора, так и для анализа данных. 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. Также мы значительно улучшили точность измерений в DIMM-канале, выбрав оптимальную ПЗС камеру для регистрации дифференциальных дрожаний (величины связанной с качеством изображения).

Существенным в процессе измерений турбулентности на горе Шатджатмаз является

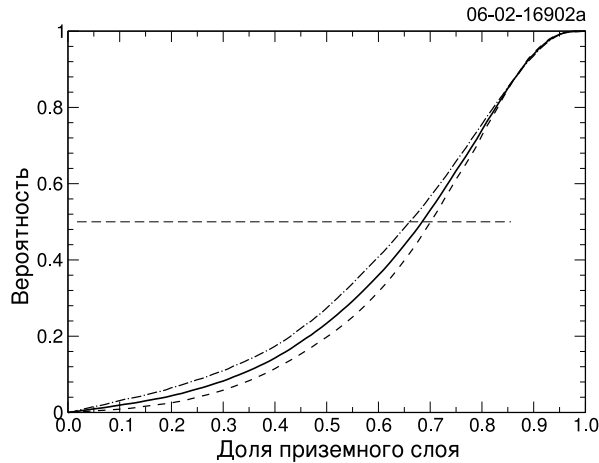


Рис. 6: Кумулятивная вероятность для доли приземного слоя в полной оптической турбулентности. Сплошная линия — для всего набора данных. Штриховая — при условии слабой турбулентности, штрих-пунктирная — при сильной

автоматический режим наблюдений. Это не только экономит значительные средства на обеспечение наблюдателей (свыше 500 тыс руб в год), но, главным образом, обеспечивает плотный и однородный ряд измерений.

Заметим, что поскольку такой параметр как “качество изображения” многое определяет 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.

СТЕПЕНЬ НОВИЗНЫ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Степень новизны полученных результатов: Результаты измерений распределения оптической турбулентности по высоте на горе Майданак безусловно оригинальны и получены впервые, если не считать наших же тестовых измерений с прототипом прибора MASS в 1998–1999 г [22]. Особенно интересны они тем, что это единственные систематические данные о свободной атмосфере для всего региона Средней Азии, перспективного с астроклиматической точки зрения. Хотя некоторые характеристики (например, изопланатический угол, атмосферная постоянная времени) оценивались и ранее, но в течение кратких эпизодических измерений, и, соответственно, они также требовали подтверждения по результатам долговременных наблюдательных программ.

Впервые начаты измерения оптической турбулентности во всей атмосфере (включая приземный слой) в Кавказском регионе современными методами. Наличие подобной объективной информации крайне необходимо для выбора стратегии развития экспериментальной астрономии в целом, не только для проектируемой обсерватории на г. Шатджатмаз. Полученный объем измерений достаточно велик, хотя покрывает только год с небольшим, а желательно иметь данные измерений в течении 3 лет. Особенно ценным и новым является тот факт, что медианное качество изображения составляет $0''95$, что позволяет отнести эту

точку к перспективным для оптической астрономии местам.

В процессе подготовки и выполнения обоих наблюдательных программ были получены многочисленные научно-методические результаты: повышение точности DIMM канала за счет оптимального выбора детектора, новые алгоритмы и программное обеспечение для управления наблюдениями [23, 24] и обработки результатов, опробованы современные схемы построения ароматических мониторов, пригодные не только для астроклиматических исследований.

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 по выбору места для ELT, антарктическая астроклиматическая программа и т.д.) помогая им в освоении методики MASS и обмениваясь различного рода информацией. Все эти группы пользуются нашим программным обеспечением для прибора MASS, а часть использует наши наработки и для DIMM канала. В каком-то смысле наши исследования и задают этот самый мировой уровень. Об этом свидетельствует тесное сотрудничество нашего коллектива с зарубежными астроклиматическими группами в ESO, СТЮ, IAC. Большой интерес вызывают наша методика и результаты у групп, связанных с разработкой адаптивных оптических систем, например на телескопе WHT, телескопе SOAR.

Список литературы

- [1] J. Vernin, J.-L. Caccia, G. Weigelt *et al* , A&Ap **243**, 553, 1991.
- [2] Roddier, F., *Adaptive optics in astronomy*, Cambridge U. Press, New York, ed. F. Roddier, 1990
- [3] Wilson R.W., Wooder N.J., Rigal F., *et al* , MNRAS **339**, 491, 2003.
- [4] J. Fuensalida, S. Chueca, J.M. Delgado, *et al* , *Second Backaskog Workshop on Extremely Large Telescopes* (Ed. A.L. Ardeberg, T. Andersen, Proc. of the SPIE, **5382**, 2004), p. 619.
- [5] A. Tokovinin, S. Baumont, and J. Vasquez), MNRAS **340**, 52, 2003.
- [6] D. Dravins, L. Lindgren, E. Mezey *et al*), PASP **109**, 173 1997.
- [7] S.L. Kenyon, J.S. Lawrence, M.C.B. Ashley *et al* , PASP **118**, 924, 2006.
- [8] M. Shao and M.M. Colavita, A&Ap **262**, 353, 1992.
- [9] 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
- [10] В.Корнилов, Изучение высотных распределений атмосферной оптической турбулентности для оценки перспективы использования адаптивных оптических систем. Январь 14, 2008, http://dragon.sai.msu.ru/mass/download/doc/rffi_rep2007.pdf

- [11] Kornilov V., Tokovinin A., Voziakova O., Zaitsev A., Shatsky N., Potanin S., Sarazin M., Proc. SPIE, V. 4839, p. 837-845, 2003
- [12] A.Tokovinin, V.Kornilov, N.Shatsky, O.Voziakova, MNRAS, V.343, P.891, 2003
- [13] Ильясов С.П., Байджуманов А.К., Саразен М. и др., Письма в Астрон. журн., Т.25. С.156, 1999
- [14] A. Tokovinin and T. Travouillon), MNRAS **365**, 1235, 2006
- [15] J.E. Thomas-Osip, G. Prieto, M. Johns, and M.M. Phillips. *Ground-based and Airborne Telescopes* (Ed. L.M. Stepp, R. Gilmozzi, Proc. of the SPIE, **7012**, 2008), p. 64, 2008
- [16] F. Rigaut, *Beyond conventional adaptive optics. ESO Topical Meeting* (Ed. E. Vernet, R. Ragazzoni, N. Hubin, S. Esposito, Garching: ESO Conf. and Workshop Proc. **58**, 2002), p. 11
- [17] S.A. Ehgamberdiev, A.K. Baijumanov, S.P. Ilyasov *et al* , A&Ap Suppl. **145**, 293, 2000
- [18] Tokovinin A., Baumont S., Vasquez J., MNRAS, 340, 52, 2003
- [19] Kornilov V., Tokovinin A., Shatsky N., Voziakova O., Potanin S., Safonov B., MNRAS, V. 382, Issue 3, pp. 1268-1278, 2007
- [20] Tokovinin A., Kornilov V., MNRAS, V.381, Issue 3, pp. 1179-1189, 2007
- [21] Sarazin M., Roddier F., Astron. Astrophys. 227, 294, 1990
- [22] Корнилов В., Токовинин А., Астрон.Ж., т.45, с.459, 2001
- [23] V.Kornilov, Turbina-core(D) DIMM User Guide. March 23, 2008, http://dragon/mass/download/doc/dimm_soft_description.pdf
- [24] 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>