

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
Физический факультет  
Кафедра экспериментальной астрономии

---

Б. С. Сафонов

**Обработка и анализ астроклиматических  
данных, полученных на горе Шатжатмаз в  
2007-2008 годах**

Допущен к защите  
Заведующий кафедрой  
академик РАН  
А.А. Боярчук  
“ ”декабря 2008 года

Дипломная работа  
студента 636 группы  
Б. С. Сафонова  
Научный руководитель  
доцент, к.ф.-м.н.  
В. Г. Корнилов

Москва 2008

# Содержание

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>2</b>
1.1	Астроклиматические исследования. Прибор MASS/DIMM. . . . .	2
1.2	Астроклиматический монитор на г.Шатжатмаз . . . . .	3
1.3	Цели и задачи данной работы . . . . .	4
1.4	Модель атмосферной турбулентности . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Получение и обработка данных</b>	<b>8</b>
2.1	MASS . . . . .	8
2.2	DIMM . . . . .	11
2.3	Метеоданные . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Статистика параметров атмосферной турбулентности и метеопараметров</b>	<b>16</b>
3.1	Количество ясного неба . . . . .	16
3.2	Температура . . . . .	17
3.3	Направление и скорость ветра . . . . .	18
3.4	Качество изображения . . . . .	19
3.5	Изопланатический и изокинетический углы . . . . .	21
3.6	Постоянная времени . . . . .	22
3.7	Профиль турбулентности в свободной атмосфере . . . . .	22
3.8	Турбулентность в приземном слое и свободной атмосфере . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Атмосферное поглощение</b>	<b>26</b>
4.1	Метод Бугера . . . . .	28
4.2	Индивидуальная оценка поглощения . . . . .	28
<b>5</b>	<b>Заключение</b>	<b>30</b>
5.1	Сравнение с другими обсерваториями . . . . .	31
5.2	Отличия между летними и зимними измерениями . . . . .	32
<b>A</b>	<b>Корреляция данных</b>	<b>36</b>

# 1 Введение

## 1.1 Астроклиматические исследования. Прибор MASS/DIMM.

Систематические исследования астроклимата в мире начались в 60-70 годах, в связи с поисками мест для телескопов 4-м класса, которые тогда были в проекте. Для этих исследований понадобились инструменты, позволявшие бы в полевых условиях делать измерения параметров турбулентности в атмосфере, которые потом легко было бы сравнивать между собой. Было придумано множество разных методов оценки качества изображения, но измерения как правило проводились в n-бальной шкале типа: плохо, средне, хорошо, и поэтому результаты, полученные разными методами было невозможно калибровать между собой. Возникла необходимость в общем методе объективной оценки качества изображения, независимого от человеческого фактора и подходящего для полевых исследований, т.е. не требующего крупного телескопа.

С появлением быстрых ПЗС-матриц в начале 90-х большое распространение получили приборы DIMM (см. главу 2.2), впервые предложенные в [6]. Этот прибор не требует большого телескопа (достаточно 25 см) и в тоже время дает достаточно надежные измерения качества изображения. Однако, для оценки перспектив использования адаптивной оптики измерений одного качества изображения недостаточно — нужно знать статистику *профиля* атмосферной турбулентности. Тогда и возникла идея использовать для измерения турбулентности мерцания звезд [9]. Соответствующий прибор был назван MASS — мульти-апертурный датчик мерцаний, его первый экземпляр был создан в ГАИШ группой под руководством В.Г.Корнилова[5] при участии обсерваторий СТЮ и ESO. В качестве питающей оптики MASS требует телескоп диаметром всего 11 см.

MASS имеет существенный недостаток: он нечувствителен к приземному слою турбулентности (0-500 м). Между тем, почти все исследования турбулентности указывают на то, что низкая турбулентность дает основной вклад в ухудшение изображений, см. например [21], [14], [20]. Для устранения этого недостатка MASS дополняют прибором DIMM, который одинаково чувствителен к турбулентности на всех высотах. Для оценки интенсивности приземного слоя турбулентности достаточно вычесть интеграл турбулентности, получаемый MASS, из интеграла, получаемого DIMM. Также для увеличения надежности измерений MASS и DIMM собирают в одном корпусе, получающийся инструмент называется MASS/DIMM (прототип создан при сотрудничестве ГАИШ МГУ, СТЮ и ESO[7]). Преимущества такого решения очевидны: оба прибора используют один телескоп, соответственно, измерения турбулентности происходит на одном луче зрения, что делает их устойчивыми. В 2004 году были проведены специальные исследования, в которых MASS/DIMM работал одновременно с другим, более точным, прибором для измерения профиля турбулентности SCIDAR (он требует телескопа 1.5 м диаметром), MASS/DIMM показал хорошее совпадение результатов со SCIDAR'ом[14].

Среди прочих методов измерения турбулентности MASS/DIMM имеет лучшее соотношение между количеством получаемой информации и простотой в использовании. Благодаря этому он широко используется в астроклиматических исследованиях по всему миру, в настоящее время насчитывается 31<sup>1</sup> копия MASS/DIMM. Современные технологии связи и энергообеспечения позволяют вести мониторинг астроклимата с помощью полностью автоматизированных комплексов, способных работать многие месяцы без присутствия человека. MASS/DIMM представляет собой неотъемлемую часть таких комплексов, т.к. наблюдения на нем могут быть полностью автоматизированы.

---

<sup>1</sup>По данным сайта <http://www.ctio.noao.edu/~atokovin/profiler/index.html>

## 1.2 Астроклиматический монитор на г.Шатжатмаз

Астроклиматический монитор (далее ASM — Automated Seeing Monitor), о котором пойдет речь в работе, представляет собой пример автоматизированного астроклиматического поста. Он находится в 20 м от места установки 2.5-м телескопа ГАИШ в точке с географическими координатами  $\phi = 43^\circ.737$ ,  $\lambda = 43^\circ.674$ . Основной целью его установки является мониторинг качества изображения и других астроклиматических параметров для определения оптимальной стратегии наблюдений на 2.5-м телескопе<sup>2</sup>. Кроме того, когда 2.5-м телескоп начнет функционировать, астроклиматический монитор будет обеспечивать поддержку наблюдений текущей информацией о качестве изображения, прозрачности атмосферы и других важных параметров; все крупные современные обсерватории ведут такую практику.

Работы по строительству ASM начались весной 2007 года, полноценные наблюдения на DIMM начались в октябре того же года, а на MASS — в конце ноября. Внешне ASM представляет собой вышку высотой 5 м и вагончик, стоящий в 10 м от вышки (см рис. 1). На вагончике установлен ветрогенератор и солнечная батарея, питающие всю установку энергией. Внутри находятся аккумуляторы — они сглаживают колебания напряжения, вызванные порывами ветра, и позволяют наблюдать в периоды затишья. На полной зарядке аккумуляторов система может функционировать в течении 1 недели, если каждую ночь наблюдать по 9 часов. На случай отказа ветрогенератора имеется бензиновый генератор. Весной 2008 года из-за сильного обледенения лопастей ветряка при очередном порыве ветра они сломались, тогда около полутора месяцев П.В.Кортунов каждый понедельник заряжал аккумуляторы с помощью генератора, пока из Москвы не привезли новые лопасти. Также на мачте ветрогенератора установлены анемометр и термометр.

Вышка состоит из металлической фермы, на которой установлен купол, и бетонного столба, несущего собственно телескоп. Фундаменты фермы и столба развязаны чтобы минимизировать вибрации телескопа от ветра. Под куполом находятся 2 компьютера. Один (omiscop) работает постоянно, он управляет метеостанцией, куполом, веб-камерами и питанием. Второй (druid) включается только на время наблюдений, он управляет телескопом, приборами MASS и DIMM, а также веб-камерой искателя. Еще на башне установлены wifi-антенна для связи с ГАС и две веб-камеры наблюдения, одна

<sup>2</sup>См. сайт, посвященный 2.5-м телескопу <http://lnfm1.sai.msu.ru/kgo/faq.php>

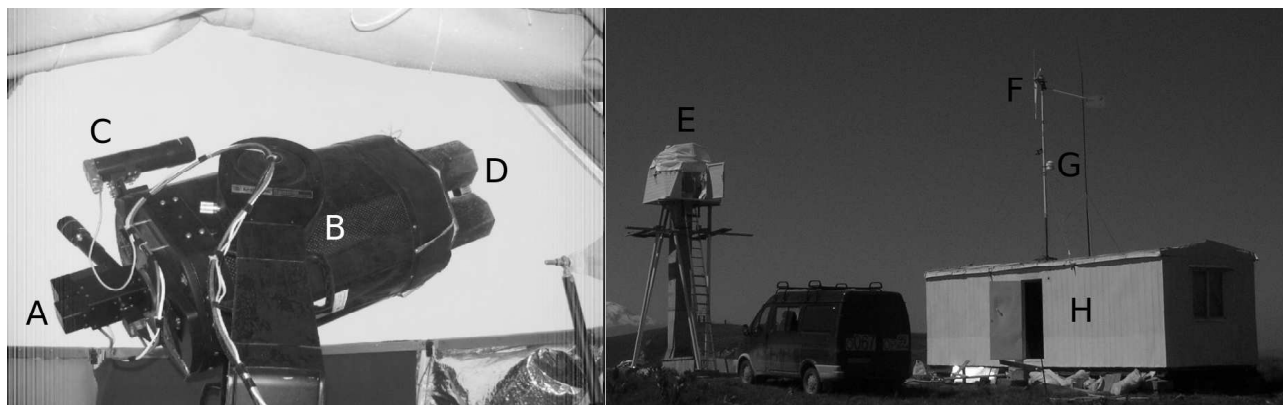


Рис. 1: ASM. Слева: вид подкупольного пространства, А — прибор MASS/DIMM, В — телескоп Meade RCX400, С — искатель с веб-камерой, D — противоросник. Справа: вид снаружи, E — вышка, F — ветряк, G — метеостанция, H — вагончик.

под куполом, чтобы контролировать состояние телескопа и купола, другая вне, чтобы отслеживать погоду и состояние ветряка. Сам купол матерчатый, как оказалось, он достаточно надежен и имеет минимальную теплоемкость, что важно для точного измерения качества изображения. Управляется купол при помощи линейных актюаторов.

Телескоп Meade RCX400 12" [23] установлен на бетонной колонне на высоте 6м от уровня земли — это стандартная высота установки подобных систем. Оптическая система Ричи-Кретьен, диаметр главного зеркала 30 см, эквивалентный фокус 2.4 м. Монтировка альт-азимутальная, полностью автоматизированная, точность наведения порядка 1°. Этой точности недостаточно для попадания звезды в поле зрения MASS/DIMM, поэтому в искателе телескопа была установлена веб-камера для наведения и грубого гидирования. Телескоп также имеет механизм фокусировки, сигнал обратной связи для него дает DIMM.

Аппаратно-программная структура ASM построена таким образом, чтобы обеспечивать автоматическую работу. Однако, до февраля 2008 года наблюдения проводились вручную удаленно через интернет. По опыту этих наблюдений В.Г.Корнилов написал программу, заменяющую наблюдателя. Начиная с марта 2008 года ASM наблюдает полностью автоматически. Естественно, некоторые нештатные ситуации требуют вмешательства человека, чаще всего в том случае если что-то сломалось. Но это происходит не очень часто.

Более подробно концепция автоматического астроклиматического поста будет описана в отдельной статье.

ASM построен группой MASS ГАИШ МГУ под руководством В. Г. Корнилова: Н. И. Шатский, С. А. Потанин, О. В. Возякова. В строительстве также участвовали П. В. Кортунов, А. А. Белинский, Е. С. Горбовской, М. В. Корнилов и сотрудники ГАС ГАО РАН: М. Г. Серков, В. А. Чермянов. Автор диплома также участвовал в строительстве, написании программного обеспечения и его отладке.

### 1.3 Цели и задачи данной работы

Помимо этого передо мной была поставлена задача текущей обработки, систематизации и первичного анализа данных, получаемых ASM. В данной работе я подвожу промежуточные итоги измерений параметров турбулентности и метеорологических параметров за первый год наблюдений. Ранее промежуточные результаты (первые 3 месяцев) наблюдений были представлены на докладе В.Г.Корнилова 14 февраля 2008 года на ученом совете ГАИШ<sup>3</sup>, с тех пор объём данных увеличился в 4 раза и были охвачены все времена года, а не только зима, поэтому целью данной работы было также уточнение тех результатов.

Также здесь представлен стандартный анализ результатов, которые обычно выполняется в такого рода исследованиях и включает построение распределений и корреляций различных параметров астроклимата. Стандартность данной процедуры и сходность методик получения результатов позволяет эффективно сравнивать наши результаты с результатами других групп.

Раздел введения 1.4 посвящен обзору используемых в работе параметров атмосферной турбулентности и их влиянию на качество наблюдений. Во второй главе приводится краткое описание приборов, с помощью которых были получены данные, а также методов обработки. Особое внимание уделено параметрам обработки и фильтрации наблюдений. Также приведена общая статистика полученных результатов. В третьей

---

<sup>3</sup>Презентация выложена в интернет по адресу <http://dragon.sai.msu.ru/mass/download/doc/rep2007.pdf>

главе дана более подробная статистика параметров атмосферной турбулентности и метеопараметров. Большой интерес представляют статистические закономерности между различными параметрами, измеряемыми астроклиматическим монитором, они они также приводятся в третьей главе. В частности, связь между параметрами атмосферной турбулентности и метеопараметрами, например, скоростью и направлением ветра. Исследование этих связей позволяет не только лучше понять локальную атмосферу, но и делать краткосрочный прогноз качества изображения, что может оказаться полезным при планировании наблюдений. В четвертой главе исследуется статистика атмосферного поглощения, вычисленного из данных MASS. В заключении (глава 5) суммируются и обсуждаются результаты, приведенные в главах 2 и 3. Также уделяется внимание отличию данных, полученных в зимний и летний период, и условиям, характерным для хороших изображений. Приводится сравнение с данными аналогичных исследований, проведенных в других местах. В приложении обсуждаются методы интерполяции данных, которые играют большую роль при сравнении измерений, полученных разными приборами.

## 1.4 Модель атмосферной турбулентности

В этом разделе мы обсудим базовые понятия теории атмосферной турбулентности, которые активно используются в работе. В настоящее время общепринятой моделью оптической атмосферной турбулентности является т.н. Колмогоровская модель, в ней структурная функция флуктуаций показателя преломления

$$D_n(\vec{r}) = \langle |n(\vec{x} + \vec{r}) - n(\vec{x})|^2 \rangle, \quad (1)$$

где усреднение производится по  $\vec{x}$ , описывается следующим образом:

$$D_n(\vec{r}) = C_n^2 |\vec{r}|^{2/3}, \quad (2)$$

где  $C_n^2$  — число, характеризующее интенсивность турбулентности в данной точке (измеряется в  $\text{м}^{-2/3}$ ). В общем виде, она изменяется от точки к точке, однако мы будем считать, что  $C_n^2$  зависит только от высоты и эту зависимость будем называть профилем турбулентности  $C_n^2(h)$ . Когда мы будем говорить, что для какого-либо турбулентного слоя  $C_n^2 \sim 10^{-13} \text{м}^{2/3}$ , это значит, что имеется в виду интеграл  $C_n^2(h)$  по этому слою.

$C_n^2$  — локальный параметр, а при астрономических наблюдениях нас интересует в первую очередь эффект, который произвела вся толща атмосферы на волновой фронт. Структурная функция флуктуаций фазы искаженного волнового фронта имеет вид:

$$D_\phi(\vec{r}) = 6.88 \left( \frac{|\vec{r}|}{r_0} \right)^{5/3}, \quad (3)$$

$r_0$  — т.н. параметр или радиус Фрида. Он связан с профилем турбулентности  $C_n^2(h)$  так:

$$r_0^{-5/3} = 0.423 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 M_0 \sec z, \quad (4)$$

где  $\lambda$  — длина волны,  $z$  — зенитное расстояние (в данной работе все величины рассчитываются для  $\lambda = 0.5 \text{мкм}$  и  $z = 0$ ),  $M_0$  — интеграл  $C_n^2$  по всей атмосфере, в общем виде записывается следующим образом:

$$M_k = \int_0^\infty h^k C_n^2(h) dh \quad (5)$$

Как известно, качество изображения — это полуширина длинноэкспозиционного изображения в телескопе с диаметром апертуры  $D \gg r_0$ , она выражается через параметр Фрида следующим образом:

$$\beta = 0.98 \frac{\lambda}{r_0} \quad (6)$$

Отметим, что в реальности изображение в большом телескопе всегда меньше  $\beta$  из-за влияния внешнего масштаба турбулентности  $L_0$ , вблизи него структурная функция фазы перестает расти и выходит на постоянное значение. Обычно  $L_0 \sim 30 - 40m$ , поэтому прибором MASS/DIMM его измерить нельзя.

В последние 20 лет технический прогресс сделал возможным создание устройств, компенсирующих искажения волнового фронта в реальном времени - так называемой адаптивной оптики (АО) Важный параметр атмосферной турбулентности, имеющий большое значение для работы адаптивной оптики — это угол изопланатизма  $\theta_0$  — угол, в пределах атмосферная функция рассеяния точки более-менее постоянна, другими словами — это поле зрения простой системы адаптивной оптики. Угол изопланатизма связан с  $C_n^2(h)$  следующим образом ([26]):

$$\theta_0^{-5/3} = 2.91 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \int_0^\infty h^{5/3} C_n^2(h) dh, \quad (7)$$

обычно  $\theta_0 \sim 2 - 3''$ .

Допустим, на некоем абстрактном телескопе диаметром  $D$  установлен система АО первого порядка, проще говоря, автогид исправляющий все наклоны волнового фронта, в том числе те, что возникают за счет атмосферы, т.е. дрожания. Очевидно, что идеальное исправление будет достигаться только для гидировочной звезды, а по мере удаления от неё точность исправления наклонов фронта будет ухудшаться. Изокинетический угол — это расстояние от гидировочной звезды, при котором точность исправления наклонов волнового фронта становится хуже 1 радиана, другими словами — это поле зрения АО 1 порядка. Изокинетический угол, как правило, больше изопланатического в несколько раз, что связано с тем, что искажения, вызывающие наклоны волнового фронта как целого, значительно больше тех, что деформируют его и увеличивают изображение. Изокинетический угол связан с  $C_n^2(h)$  следующим образом [25]:

$$\theta_{TA} = \left[ 0.668 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 D^{-1/3} \int_0^\infty h^2 C_n^2(h) dh \right]^{-1/2}, \quad (8)$$

где  $D$  — диаметр телескопа.

До сих пор мы говорили о пространственных свойствах оптической турбулентности. Качество изображения, изопланатический и изокинетический углы — все эти параметры ничего не говорят о временных свойствах турбулентности, а они, также важны при проектировании приборов для получения высокого углового разрешения. Например, время экспозиции спекл-интерферометра должно быть меньше чем время, за которое мгновенное изображение звезды успевает существенно измениться, иначе информация о тонкой структуре объекта будет безвозвратно потеряна. А система АО должна за это время успеть измерить волновой фронт и компенсировать его. Очевидно, что проникающая сила этих методов также зависит от времени, в течении которого волновой фронт постоянен.

В качестве величины, характеризующей скорость, с которой изменяется картина турбулентности обычно используется т.н. постоянная времени  $\tau$  [27]:

$$\tau_0 = 0.31 \frac{r_0}{V_0}, \quad (9)$$

где  $V_0$  — некая усредненная скорость ветра, она вычисляется следующим образом[28]:

$$V_0^{5/3} = \int_0^\infty V(h)^{5/3} C_n^2(h) dh / \int_0^\infty C_n^2(h) dh \quad (10)$$

Обычно  $\tau_0 \sim 3 - 5$  мс.

Прибор MASS/DIMM, об устройстве и принципе действия которого речь пойдет в следующем разделе, измеряет профиль турбулентности  $C_n^2(h)$  с разрешением по высоте  $dh \sim h/2$ , другими словами, атмосфера разбивается на 7 слоев, толщина каждого из которых примерно равна половине его высоты: 0 км, 0.5 км, 1.0 км, 2.0 км, 4.0 км, 8.0 км, 16.0 км. Для каждого из этих слоев измеряется интеграл турбулентности:

$$C_{ni}^2 = \int_{layer\ i} C_n^2(h) dh \quad (11)$$

Данные о профиле турбулентности позволяют затем рассчитывать все описанные параметры:  $\beta$ ,  $r_0$ ,  $\theta_0$ ,  $\theta_{TA}$  и  $\tau_0$ .

Нередко для характеристики интенсивности турбулентности в слое мы будем использовать значение качества изображения, соответствующее  $C_{ni}^2$ :  $\beta_i = (C_{ni}^2/6.8 \times 10^{-13})^{3/5}$  — следует из формул 4 и 6 при  $\lambda = 0.5 \mu m$ . Подчеркнем, что  $\beta$  — неаддитивная величина, нельзя складывать сами значения  $\beta$  для 2 турбулентных слоев, для этого нужно сначала возвести их в степень 5/3:

$$\beta_{total}^{5/3} = \beta_{layer\ A}^{5/3} + \beta_{layer\ B}^{5/3}$$

В астроклиматических исследованиях атмосферу часто делят на несколько слоев, отличающихся по физическим причинам турбулентности, это:

1. Поверхностный слой — первые 15-20 м, здесь определяющую роль играет механическое взаимодействие и теплообмен с подстилающей поверхностью.
2. Приземный слой — первые 300-500 м, его высота определяется высотой приземного инверсионного слоя. Также имеет значение тип рельефа местности (вершина горы, склон, ветровая тень и т.п.).
3. Переходный слой, промежуточный между приземным и свободной атмосферой.
4. Свободная атмосфера — выше 3-4 км. За турбулизацию свободной атмосферы ответственны постоянные сильные ветра  $\sim 30 - 50$  м/с дующие на большой высоте — т.н. струйные течения.

Многие авторы сообщают, что приземный слой вносит основной вклад в интеграл турбулентности (60 – 70%), а поверхностный слой составляет основную часть приземного ( $\sim 70\%$ )[19]. Прибор MASS/DIMM позволяет разделить вклад приземного слоя и свободной атмосферы, а также разбить свободную атмосферу на несколько слоев. К сожалению, выделить поверхностный слой с помощью MASS/DIMM невозможно, для этой цели нужны другие приборы: SODAR, LuSci[12]. Мы будем пользоваться следующими обозначениями:  $\beta_{GL}$  — качество изображения соответствующее интенсивности турбулентности в приземном слое  $C_{nGL}^2$ ,  $\beta_{FA}$  — то же для свободной атмосферы и  $\beta$  без индекса — для всей атмосферы.



## 2 Получение и обработка данных

Данные об астроклимате места, получаемые ASM, можно разделить на 3 группы по приборам: MASS, DIMM и метеостанция. Первые два измеряют характеристики турбулентности атмосферы, метеостанция измеряет метеопараметры, также имеющие значение для характеристики места.

### 2.1 MASS

Мерцания звезд — это одно из наиболее очевидных проявлений атмосферной турбулентности. Свет, проходя через неоднородности показателя преломления, испытывает чисто фазовые искажения, т.е. изменяется только *направление* его распространения. Однако, после распространения флуктуации фазы вызывают флуктуации амплитуды, происходит случайная фокусировка/дефокусировка света. Именно эти флуктуации амплитуды глаз и видит как мерцания. Также флуктуации амплитуды волнового фронта на зрачке можно увидеть, если посмотреть в расфокусированный телескоп на звезду. При этом видна характерная картина светлых и темных пятен быстро перемещающихся по изображению звезды — это и есть флуктуации амплитуды, которые после интегрирования по апертуре проявляют себя как мерцания — флуктуации суммарного потока.

Величина мерцаний характеризуется индексом мерцаний  $s^2$ , представляющим собой дисперсию относительных флуктуаций потока в некоторой приемной апертуре. Также в статье [9] был введен дифференциальный индекс мерцаний — дисперсию относительных флуктуаций отношения потоков в двух апертурах[9]. Индекс мерцаний зависит от высотного распределения турбулентности  $C_n^2(h)$ :

$$s^2 = \int_0^\infty C_n^2(h)W(h)dh, \quad (12)$$

где  $W(h)$  — т.н. весовая функция, её вид зависит от геометрии апертуры или апертур, если речь идет о дифференциальном индексе мерцаний[5]. При этом большую роль играет размер апертуры по сравнению с размером первой зоны Френеля для доминирующего турбулентного слоя  $r_F = \sqrt{\lambda z}$  — характерным масштабом флуктуаций амплитуды. Например, для апертуры малой по сравнению с размером зоны Френеля  $d \ll r_F$  :  $W(h) \rightarrow h^{5/6}$ , а для  $d \gg r_F$  :  $W(h) \rightarrow h^2$ . Весовые функции для дифференциальных индексов отличаются принципиально: они имеют максимум, т.о. можно сказать, что некоторый индекс мерцаний чувствителен к турбулентности на определенной высоте.

Прибор MASS измеряет поток в 4 апертурах, 3 из которых — это концентрические кольца, вложенные друг в друга, а последняя — это круг вложенный во внутреннее кольцо. Таким образом, измеряется 10 индексов мерцаний — 4 простых и 6 дифференциальных. Различия в весовых функциях для индексов мерцаний отражают тот факт, что они по разному зависят от турбулентности на разных высотах. Решая обратную задачу, можно восстановить высотный профиль турбулентности  $C_n^2(h)$ . Более подробно алгоритм MASS изложен в [2]. Перейдем к описанию специфики наблюдений на MASS и предварительной их фильтрации.

По сути, MASS представляет собой 4-канальный фотометр, измеряющий поток от звезды с временным разрешением 1 мс. Столь высокое разрешение необходимо, чтобы избежать дополнительного сглаживания мерцаний (и следовательно падения индекса мерцаний  $s^2$ )из-за переноса картины мерцаний ветром. Индексы мерцаний вычисляются каждую секунду, а затем усредняются за 1 минуту. Эти усредненные за минуту

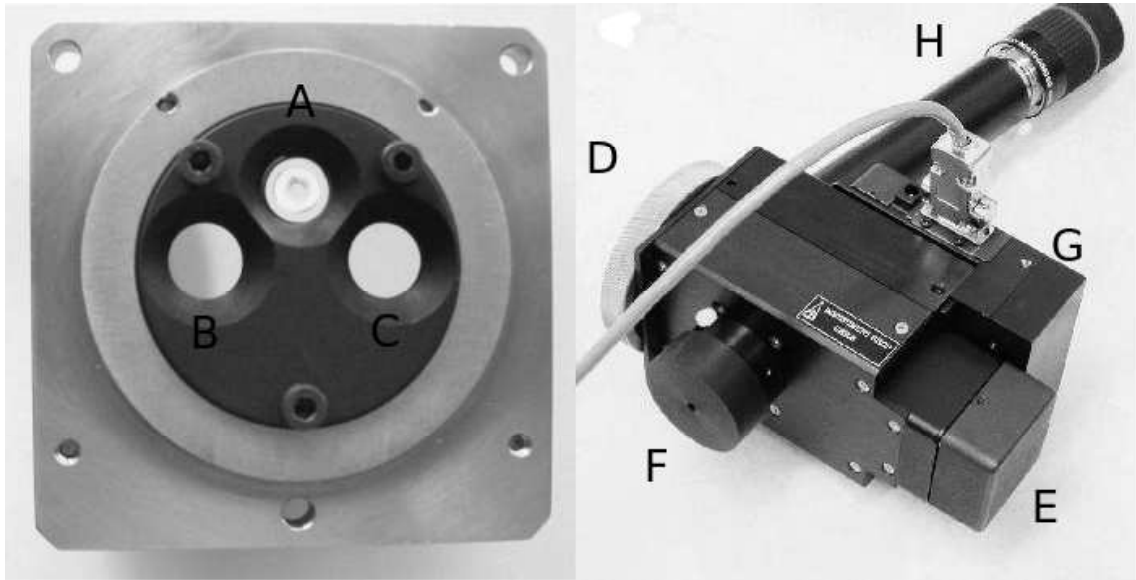


Рис. 2: Слева: сегментатор выходного зрачка телескопа, А — апертуры MASS, В и С — апертуры DIMM. Справа: общий вид прибора MASS/DIMM, D — крепление к телескопу, E — сегментатор, F — крепление ПЗС-матрицы DIMM, G — блок ФЭУ MASS, H — окуляр подсмотра.

индексы мерцаний мы будем рассматривать как единичное измерение в MASS, они будут впоследствии использованы для расчета параметров атмосферной турбулентности, соответственно тоже с разрешением в 1 минуту.

Деление света на каналы в MASS происходит следующим образом: перед фокальной плоскостью телескопа установлена линза Фабри, которая укорачивает фокусное расстояние телескопа и строит изображение входного зрачка телескопа на т.н. сегментаторе (рисунок 2), каждая кольцевая зона которого перебрасывает пучки на катоды соответствующего ФЭУ. Геометрические размеры апертур в проекции на входной зрачок даны в таблице 1. Более подробно об устройстве MASS читайте [1].

Таблица 1: Параметры апертур MASS.

параметр/апертура	A	B	C	D
внутренний диаметр (см)	0.0	21.1	35.8	63.2
внешний диаметр (см)	20.6	34.8	62.4	89.1
непуассоновость	1.028	1.037	1.026	1.035
нелинейность (нс)	18.8	17.1	18.2	17.8

При малых значениях индексов мерцаний на них начинают оказывать существенное влияние такие параметры как непуассоновость и нелинейность (мертвое время) ФЭУ, их необходимо учитывать при обработке [7]. Они измеряются в стандартной процедуре, предусмотренной в ПО MASS. Измерения были сделаны 10 октября 2007 года, их результаты также приведены в табл. 1. С учетом этих параметров была произведена обработка имеющихся данных, для каждой точки рассчитывались следующие параметры турбулентности:

1. Интегралы атмосферной турбулентности — величины, рассчитываемые как ком-

бинации индексов мерцаний.

- Качество изображения в свободной атмосфере, т.е. таким было бы изображение в большом телескопе на высоте 500 м  $\beta_{FA}$ .
  - Интеграл турбулентности в свободной атмосфере  $M_0$  (определение интеграла турбулентности в разделе 1.4)
  - Интеграл турбулентности в свободной атмосфере  $M_{5/3}$ , от него зависит угол изопланатизма  $\theta_0$  (см. главу 1.4)
  - Интеграл турбулентности в свободной атмосфере  $M_2$ , от него зависит изокинетический угол  $\theta_{TA}$  (см. главу 1.4)
  - Угол изопланатизма, его подробное описание в главе 1.4. Грубо говоря, это поле зрения простой системы адаптивной оптики.
  - Эффективная высота турбулентности.
  - Характерное время  $\tau_0$  — единственная величина, напрямую зависящая от скорости ветра в доминирующем турбулентном слое.
2. Профиль атмосферной турбулентности вычисляется путем решения обратной задачи, и, соответственно менее устойчив.
- $\chi^2$  характеризует качество восстановления профиля, см. далее.
  - Высота слоя и интеграл  $C_{ni}^2$  в нем, проще говоря его интенсивность. В модели используется 6 слоев, лежащих на высотах 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0, толщина слоя порядка половины его высоты.
3. Сопутствующие данные — другие данные, получаемые MASS, имеющие значение для астроклиматических исследований.
- Поток в апертуре D — на основе его можно оценить прозрачность атмосферы, см. главу 4.
  - Дисперсия потока в апертуре D, рассчитанная для 1-секундных точек потока позволяет сделать вывод о наличии облаков.

Всего вычислено 34000 1-минутных точек, однако не все они были использованы для построения статистики. Часть точек было отфильтровано по следующим критериям:

1. Поток в апертуре  $Dflux < 100$  (отсчетов/мс). Не рассматриваются точки со слишком низким потоком. Во-первых, вклад пуассоновского шума в апертурах A и B делает относительную погрешность определения индексов мерцаний слишком большой. Низкий поток также указывает на наличие облаков и, соответственно, возможность флуктуаций потока. По этому критерию отсеивается 2.4% данных.
2. Относительная дисперсия потока в апертуре  $e\_Dflux > 0.02$ . Отметим, что под этой дисперсией понимается дисперсия значений потока, усредненных за 1 секунду, т.е. *не* индексы мерцаний. На эту величину влияют более-менее плавные изменения потока, появляющиеся за счет флуктуаций прозрачности или облаков. Статистика прозрачности приведена в главе 4. Отсеивается 2.1%

3. Абсолютная погрешность качества изображения  $e_{\beta_{FA}} \times \beta_{FA} > 0.2$ . Необычно большое значение относительной погрешности определения качества изображения является следствием нестационарности процесса или флуктуаций потока. Под нестационарностью я имею в виду ситуации, когда статистические параметры мерцаний изменяются на временах, значительно меньших 1 минуты — единичного времени наших измерений. Очевидно, что мы не имеем права использовать индексы мерцаний, измеренные в эти периоды, к счастью, бывают они не часто. Обычно время корреляции качества изображения больше. Отсеивается 0.2%
4.  $\chi^2 > 100$ . Нормированная сумма квадратов отклонений индексов мерцаний, вычисленных по восстановленному профилю, от измеренных, характеризует “качество” восстановления профиля. Большое значение этой величины указывает на то, что измеренные индексы мерцаний трудно объяснить в рамках теории атмосферной турбулентности. Кроме вышеперечисленных причин это может быть следствием разюстировки прибора, запотевания телескопа и т.д.. Малый  $\chi^2$  (20-50) практически гарантирует правильное восстановление профиля турбулентности. Отсеивается 6.7%

Если потребовать от данных выполнения всех этих условий, то отсеивается 9.4%, и остается 30810 1-минутных точек измерений. Отмечу, что данные критерии неселективны по отношению к качеству изображения (кроме критерия 3). Точки, отфильтрованные по третьему критерию имеют в среднем большое значение качества изображения, т.к. время корреляции  $\beta$  уменьшается с её ростом. Однако, этот эффект не может сильно исказить статистику, т.к. по этому критерию отсеивается всего 0.2% данных. Статистика параметров атмосферной турбулентности, измеренных MASS, и их связь с метеопараметрами приведена в главах 3, 4, обсуждение результатов в главе 5.

## 2.2 DIMM

Вторым по очевидности проявлением атмосферной турбулентности являются дрожания звезд, правда их, в отличие от мерцаний, невооруженным глазом в большинстве случаев не видно. Измерять непосредственно дисперсию дрожаний не совсем удобно, т.к. в неё большой вклад вносят вибрации телескопа, которые трудно устранить, особенно если наблюдать на маленьком телескопе в условиях, приближенных к полевым. Поэтому DIMM измеряет т.н. дифференциальные дрожания — это флуктуации разности координат изображений звезд, полученных в двух близкорасположенных апертурах (дифференциальные дрожания пропорциональны *кривизне* волнового фронта). Например, в нашем случае диаметр апертур 9.3 см, а расстояние между их центрами 20 см. На практике, в выходной зрачок телескопа помещают маску в виде двух зеркал соответствующего размера, наклоненных на немного разные углы, чтобы развести изображения, даваемые апертурами. Изображение регистрируется ПЗС-матрицей с экспозицией, достаточно малой, чтобы “заморозить” изображение. Дисперсия вычисляется на интервале в 1 секунду, а затем дисперсии за 1 минуту усредняются, таким образом, DIMM также как и MASS дает 1-минутные точки качества изображения.

В нашем случае DIMM и MASS скомпонованы в одном приборе и питаются от одного телескопа (MASS/DIMM изображен на рисунке 2, правый). В выходном зрачке, построенном линзой Фабри, установлен сегментатор MASS/DIMM: зеркало, изображенное на рисунке 2. Видно, что кроме сегментатора MASS еще есть две зеркала, соответствующие апертурам DIMM, одна из них слегка наклонена. Свет, отраженный от них фокусируется и попадает на ПЗС-матрицу. ПЗС-матрица DIMM также используется для

точного гидирования и фокусировки. Добавим, что управляющая электроника, программное обеспечение и инструменты обработки у MASS и DIMM никак не связаны с друг другом (разве что питание у них общее). Это два независимых прибора в одном корпусе.

Особенностью DIMM является тот факт, что он одинаково чувствителен к турбулентности на всех высотах, т.е. он измеряет непосредственно интеграл  $M_0$  (хотя в последнее время появились сомнения в этом факте [4]). Формула вычисления качества изображения из дисперсии  $\sigma^2$  дрожаний выглядит следующим образом: [3]:

$$\beta = 0.98 \left( \frac{D}{\lambda} \right)^{1/5} \left( \frac{\sigma_d^2}{K} \right)^{3/5} \quad (13)$$

Где  $D$ -диаметр апертур, а коэффициент  $K$  зависит от отношения диаметра апертур к расстоянию между ними  $b$ , и типа дисперсии (продольные/поперечные дрожания):

$$K_{lG} = 0.340(1 - 0.570b^{-1/3} - 0.040b^{-7/3}) \quad (14)$$

$$K_{tG} = 0.340(1 - 0.855b^{-1/3} + 0.030b^{-7/3}) \quad (15)$$

$K_t$  — соответствует *поперечным* дрожаниям звезд, а  $K_l$  — *продольным*. Важно, что при обработке данных DIMM мы независимо получаем качество изображения, рассчитанное для поперечных  $\beta_t$  и продольных  $\beta_l$  дрожаний. Несовпадение этих величин вызывает сомнение в их истинности, такие значения должны быть отброшены.

При обработке использовались следующие параметры DIMM: диаметр апертур 9.3 см, расстояние между центрами 20 см, масштаб изображения 0.634"/рх, формат матрицы 658 × 492, экспозиция 4 мс, частота кадров 200Гц. Для каждой точки вычисляются следующие величины:

1. Потоки в апертурах.
2. Качество изображения, измеренное по продольным и поперечным дрожаниям.
3. Число штреля в левом и правом изображениях

Результаты обработки DIMM также необходимо фильтровать, так как этот прибор очень чувствителен к расфокусировке и разъюстировке телескопа [4]. Мы использовали следующие критерии отбора для DIMM:

1.  $\beta_l/\beta_t \notin (0.7, 1.3)$ . Неправильное отношение  $\beta_l/\beta_t$  может свидетельствовать о разных проблемах, начиная с разъюстировки телескопа и заканчивая виньетированием в системе. Очевидно, что такие данные должны быть отброшены. Этому критерию не удовлетворяют 0.8% данных.
2. Производная качества изображения  $d\beta/dt > 1.0''/min$ . В моменты фокусировки телескопа измеряемое значение качества изображения резко возрастает. Отсеивается 5.0%.
3. Отношение потоков в левой и правой апертурах  $\notin (0.92, 1.12)$ . указывает на запотевание мениска телескопа. Небольшое различие в потоках от апертур возникает вследствие мерцаний. Отсеивается 2.3%.
4. Потоки в левой и правой апертурах  $< 1500$  отсчетов/мс. данные, полученные в условиях плохой прозрачности имеют слишком большую неопределенность. См. раздел 2.1. Отсеивается 0.3%.

После применения всех критериев отсеивается 7.7% точек, в итоге остается 37794 1-минутных точек DIMM. Критерии фильтрации измерений DIMM также слабо селективны по качеству изображения.

В таблице 2 приведена статистика наблюдательного времени на MASS/DIMM за период 10.2007-11.2008 по месяцам. В главе 3 количество наблюдательного времени отражено графически. В среднем, мы наблюдали 38% ясного времени. Отметим, что в последние месяцы эта доля стабильно увеличивалась, что связано с отладкой системы. На рисунке 3 приведен пример измерений профиля турбулентности MASS/DIMM в течении одной ночи, качества изображения, соответствующего слоям атмосферы: 0-16 км (вся атмосфера), 0.5-16 км (свободная атмосфера и переходный слой), 4-16 км (свободная атмосфера), 0-0.5 км (приземный слой) и скорости ветра. Виден всплеск турбулентности в середине ночи, который сначала появился в приземном слое, а затем перешел на высоту 1-2 км, также ясно видно увеличение скорости ветра в 2-3 раза, начало которого совпадает с моментом появления турбулентности с точностью 2-3 минуты. Более подробно о корреляции скорости ветра и качества изображения смотрите раздел 3.8.

Таблица 2: Продолжительность наблюдений на MASS и DIMM по месяцам. 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 — предел длительности наблюдений (рассчитано с помощью libnova).

год	месяц	MASS		DIMM		астр. ночь
		ночи	часы	ночи	часы	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 за 2007:	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
	итого за 2008:	149 (+31)	624.1	147 (+33)	604.9	2601.6
	суммарно:	168 (+37)	671.6	176 (+39)	715.9	3833.0

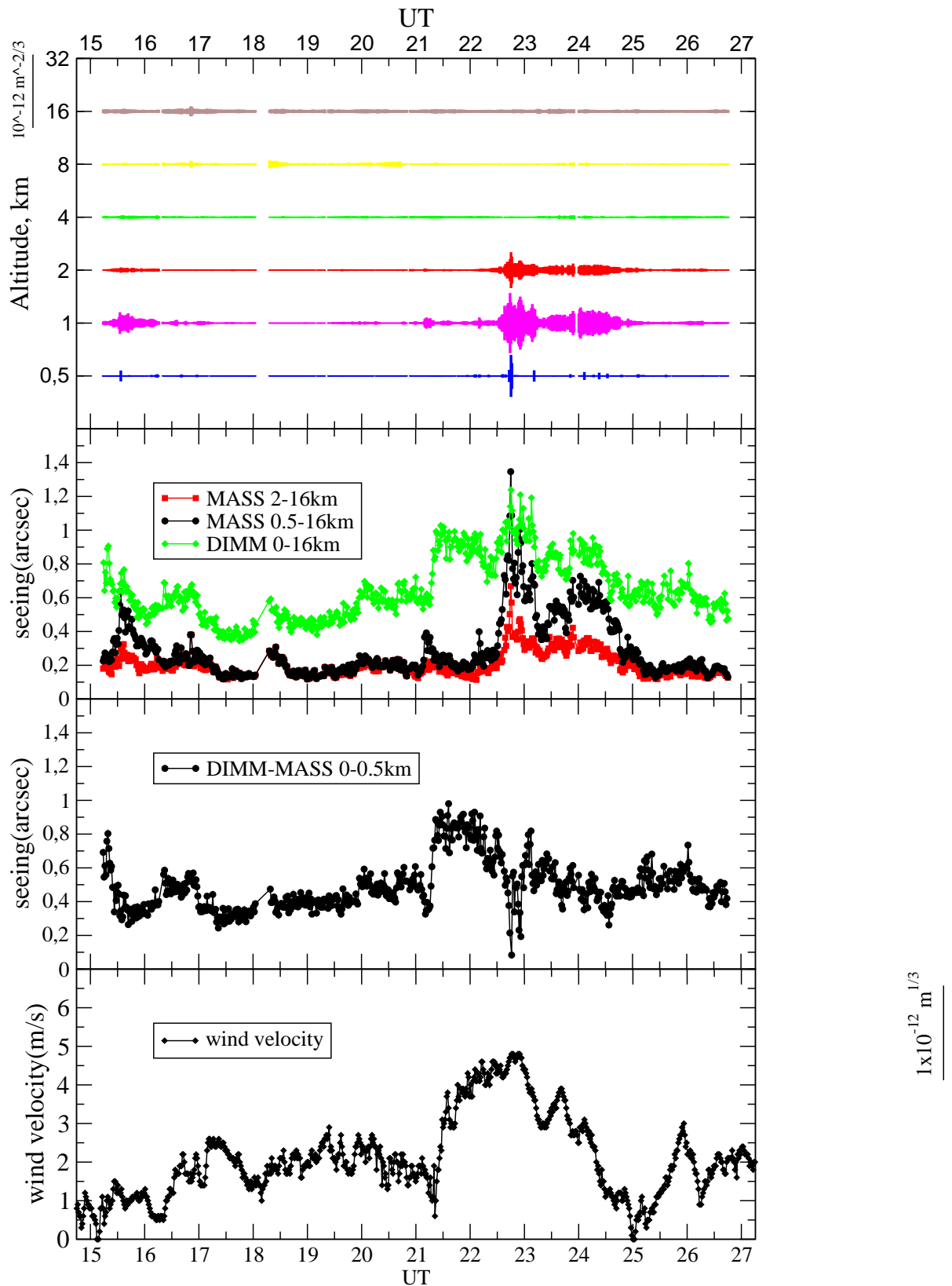


Рис. 3: Пример измерений MASS/DIMM. Сверху вниз: профиль турбулентности, толщина линий соответствует интенсивности турбулентности, масштаб показан слева вверху; качество изображения по измерениям MASS и DIMM по отдельности; качество изображения, соответствующее приземному слою (см. раздел 3.8); скорость ветра.

## 2.3 Метеоданные

Метеостанция выполняет сразу две задачи, важность каждой из которых трудно переоценить. С одной стороны, она измеряет метеопараметры, необходимые для оценки астроклимата местности, эта задача сходна с назначением приборов MASS и DIMM. С другой стороны, по текущим метеоданным автоматически принимается решение о проведении/непроведении наблюдения.

Итак, метеостанция ASM измеряет следующие метеопараметры:

1. Внешняя температура.
2. Скорость и направление ветра.
3. Влажность.

Кроме того, метеостанция измеряет некоторые параметры, имеющие значение для функционирования ASM:

1. Температура в вагончике
2. Температура в ящике с компьютерами
3. Напряжение на аккумуляторах

К сожалению, наша метеостанция не дает информации о состоянии неба (ясно/облачно/осадки), поэтому мы использовали т.н. температуру неба, измеряемую метеостанцией MASTER<sup>4</sup>.

Температура неба — это температура, до которой бы нагрелось абсолютно черное тело, освещаемое небом и лишенное других путей теплообмена. Измеряется с помощью датчика ИК-излучения. Температура неба — это прекрасный индикатор облаков, т.к., в основном, она зависит от количества воды в атмосфере, именно вода сильнее всего излучает в ИК-диапазоне. Ясное небо имеет температуру  $-25 \div -35^\circ\text{C}$ , облачное — больше  $-20^\circ\text{C}$ . Непрерывное измерение этой величины дает и статистику ясного неба и условие для начала наблюдений. Интересно, что температура *ясного* неба зимой и летом практически не отличается, поэтому критерий начала наблюдений один и тот же весь год.

Т.к. датчик температуры неба расположен в 700 м от ASM, его данные не совсем точно отражают ситуацию на г.Шатжатмаз, особенно когда вода присутствует в виде тумана. В наших планах установка на ASM более совершенного датчика ясного неба. Он будет состоять из нескольких, предположительно пяти, ИК-датчиков, каждый из которых будет направлен в разные части неба (С, В, Ю, З, зенит), что позволит более подробно отслеживать ситуацию с облаками. Добавим, что когда начнутся астрономические наблюдения на КГО, такой датчик будет очень полезен, если не необходим. Все описанные параметры измеряются раз в 1 секунду, а затем усредняются за 1 минуту, по аналогии с MASS и DIMM.

Метеоданные также необходимо фильтровать, т.к. они нередко содержат выбросы. Во время перепадов напряжения, например, в момент включения генератора, по неизвестной причине, метеопараметры могут принимать произвольные значения. Например, максимальная зафиксированная скорость ветра на ASM 129 м/с, очевидно, что она не имеет отношения к реальности. Статистика метеопараметров приведена в главе 3.

---

<sup>4</sup>MASTER — это робот-телескоп, предназначенный для поиска оптических транзиентов (в частности послесвечения гамма-всплесков), расположен на крыше одного из корпусов ГАС ГАО РАН, в 700 м от ASM. Построен группой MASTER из ГАИШ[29].



**Роль метеостанции в управлении наблюдениями** Как уже говорилось, измерение метеопараметров необходимо для автоматического принятия решения о проведении наблюдений. Наблюдения начинаются при условии что:

1. Температура неба в течении получаса была  $< -23^{\circ}C$ .
2. Средний ветер в течении получаса был  $< 6$  м/с.

Наблюдения прекращаются при условии что:

1. Температура неба  $> -21^{\circ}C$ .
2. Средний ветер  $> 8$  м/с.

Небольшое различие в условиях на начало и конец наблюдений необходимо для того чтобы исключить частые включения — выключения при колебаниях параметров вблизи границы срабатывания.

## **3 Статистика параметров атмосферной турбулентности и метеопараметров**

### **3.1 Количество ясного неба**

Астроклимат места складывается из многих вещей, и самая очевидная из них — это доля времени, пригодного для наблюдений. Есть ли на небе облака мы определяли по показаниям датчика температуры неба, см. раздел 2.3. Результаты представлены на диаграмме 4. Точки отображают общую продолжительность ночного времени, количество ясного неба, а также время, которое мы отнаблюдали, по месяцам в часах. Под ночным временем мы понимаем время, в течении которого высота солнца была  $< -18^{\circ}$ , количество ясного неба также рассчитывалось для этого времени.

Как уже говорилось, данные датчика ясного неба не всегда точны. Например, летом нередко были ситуации, когда датчик показывал ясное небо, телескоп открывался, но наблюдения так и не начинались, т.к. по факту звезды не было. Конечно, можно было бы оценивать ясное время по фактическому времени наблюдений. Но оно было бы сильно занижено вследствие того, что возможность проведения наблюдений зависит от нескольких факторов таких как: исправность системы (железа и программной части), наличия энергии в аккумуляторах, силы ветра и наличия облаков. Все они уменьшают наблюдательное время. Кроме того, часть времени уходит на запуск телескопа и перенаведение. Зимой 2007-2008 года у нас были проблемы с энергообеспечением установки вследствие низкой средней скорости ветра и отсутствия солнечной батареи, поэтому в декабре-январе мы практически совсем не наблюдали, а в феврале пришлось ограничить наблюдательное время до 2-3 часов в ночь.

Принимая во внимание эти факты, можно сказать что реальное количество ясного времени лежит между пунктирной и штрихпунктирной кривой, но ближе к пунктирной. Видно, что зимой не только больше длительность астрономической ночи, но и процент ясного неба выше. Так, за ноябрь мы отнаблюдали больше времени чем за март-август. Кроме того, в зимний период нередко ситуации, когда ясная погода может устанавливаться на несколько дней. О других отличиях между зимней и летней погодой речь пойдет дальше. В сумме, за период с октября 2007 по ноябрь 2008 ясного неба было 49% от ночного неба, мы отнаблюдали 38% от ясного неба.

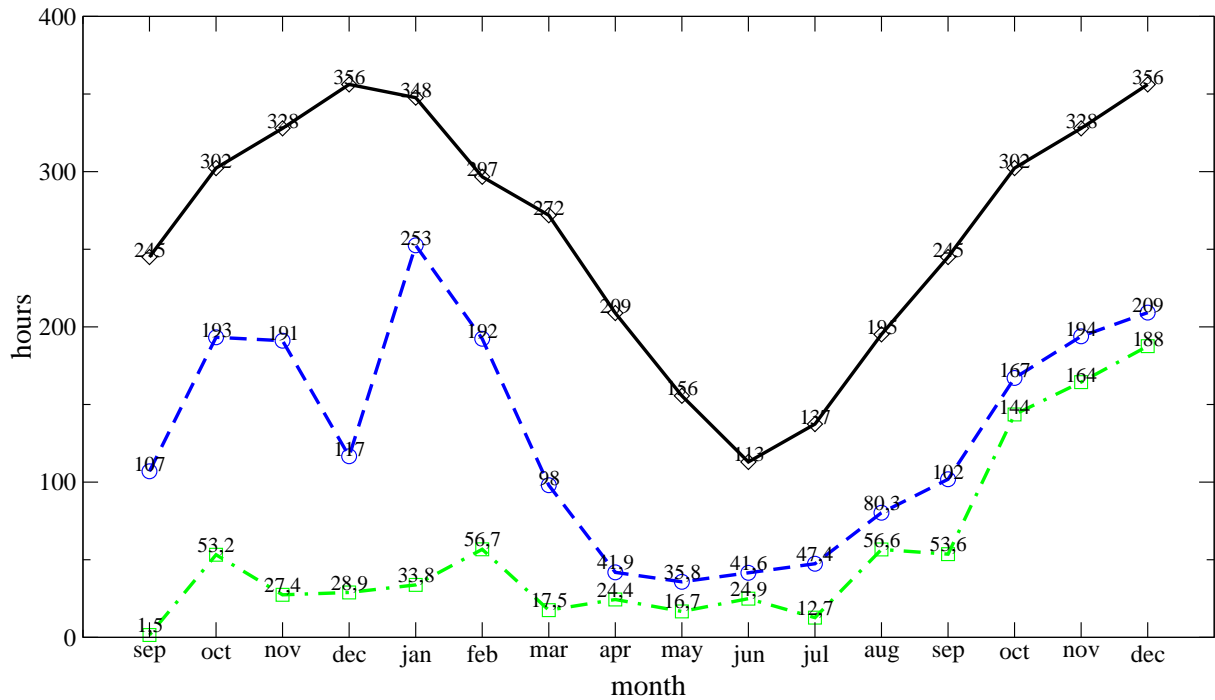


Рис. 4: Суммарная продолжительность астрономической ночи (в стандартном понимании  $h_{sun} < -18^\circ$ ), количество ясного неба в астрономическую ночь и наблюдательное время в часах по месяцам.

### 3.2 Температура

Средняя ночная и дневная температура по месяцам представлена на рисунке 5. Для астрономических наблюдений в первую очередь интересны перепады температуры между днем и ночью. Большой перепад температуры приводит к тому, что купол, конструкция телескопа и, в особенности, зеркало в начале наблюдений имеют температуру существенно большую, чем температура внешнего воздуха. Из-за этого возникает интенсивная конвекция, которая сильно портит изображение. Возможно даже возникновение постоянных потоков воздуха, которые можно принять за абберации зеркала телескопа. На некоторых обсерваториях, чтобы избежать этого эффекта, башню перед наблюдениями специально охлаждают до ожидаемой ночной температуры.

На рисунке 6 изображено распределение перепадов температуры. Медианный перепад температуры порядка  $-3.5^\circ C$ , что довольно мало. Также для сравнения показано распределение перепадов температуры для ночей с качеством изображения, лучше медианного. Отметим, что при хорошем качестве изображения перепад температур в среднем немного меньше, а значит легче бороться с подкупольной конвекцией, что будет способствовать получению хороших изображений.

Отметим, что укрытие MASS/DIMM специально сделано так, чтобы обеспечивать соответствие внешней и внутренней температуры, оно совершенно не утеплено, в полу есть щели, в которые свободно дует ветер и теплоемкость всех конструкции довольно мала. Поэтому, скорее всего, перепад температуры не влияет на качество изображения, измеряемое MASS/DIMM.

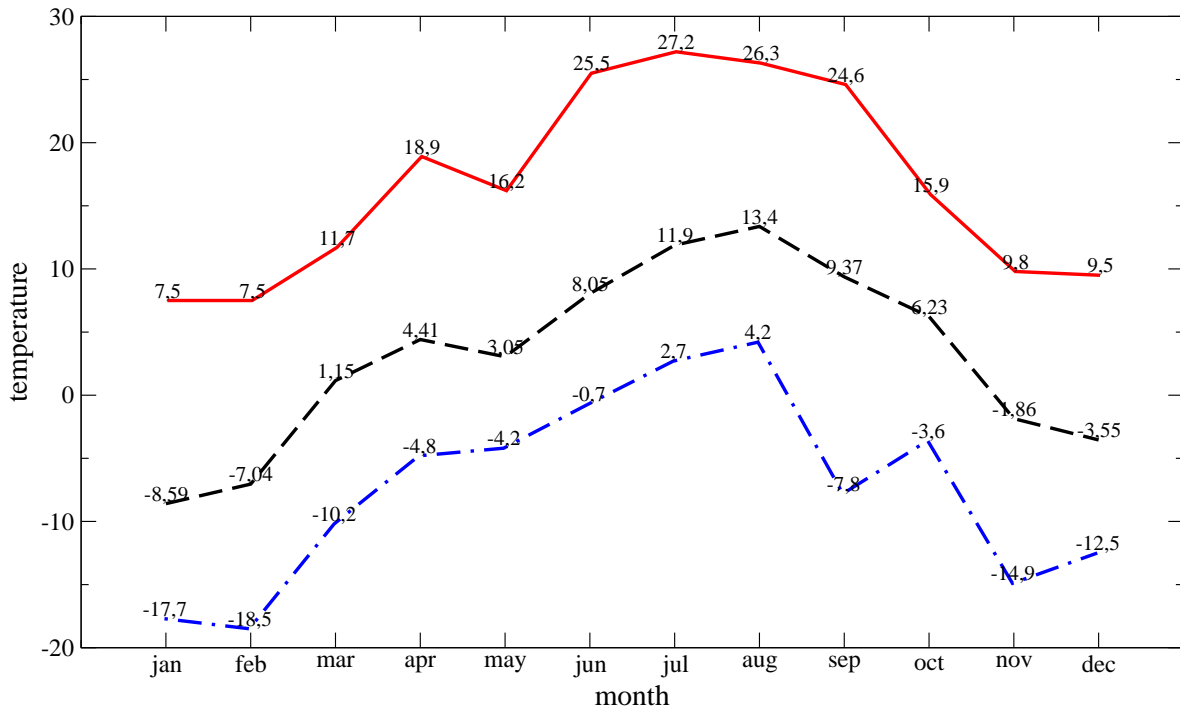


Рис. 5: Температура, усредненная по месяцам. Сплошная — максимальная, прерывистая — средняя, штрихпунктирная — минимальная.

### 3.3 Направление и скорость ветра

Ветер — это второй фактор погоды после облаков, который влияет на возможность проводить наблюдения, поэтому он нуждается в столь же пристальном внимании. На рисунке 7 (левый) приведено совместное распределение моментов измерения по скоростям ветра и по времени суток. Видно, что ночью скорость ветра в среднем меньше, она превосходит 8 м/с только в 3% случаев. Это значит, что ветер практически не будет ограничивать время наблюдений на 2.5-м телескопе. Добавим также, что зимой медианная скорость ветра составляла 2.3 м/с, летом — 2.6 м/с. (медиана скорости ветра для обсерватории Параналь:  $\sim 7$  м/с,)

Распределение направлений ветров (рисунок 7 (правый)) также имеет значение, например, для установки выхлопа системы откачки воздуха из подкупольного пространства, он должен быть установлен на наветренной стороне, иначе шлейф теплого воздуха попадет на башню, и от системы откачки будет только вред. По рисунку видно, что основные направления ветра — юго-восток и запад. Также обратим внимание на значительное отличие преимущественных направлений и скоростей ветров, дующих днем и ночью.

Различие настолько существенное, что можно говорить о “дневном” и “ночном” ветре. Дневной ветер (10-19 часов) имеет скорость в среднем от 3 до 6 м/с и дует с северо-востока, либо юго-востока. Ночной же ветер (20-9 часов) редко превосходит 5 м/с (а в среднем имеет скорость 2.5 м/с) и дует, как правило, с запада. Таким образом, существует ярко выраженная горно-долинная циркуляция.

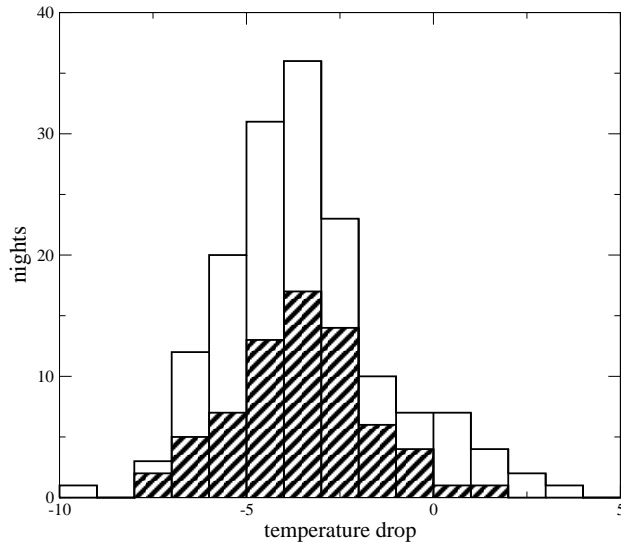


Рис. 6: Распределение перепада температуры между полуднем и полночью в ясные ночи и ночи с хорошим качеством изображения. В качестве ясных рассматривались ночи, в которые средняя температура неба была  $< -23^{\circ}\text{C}$ . Под ночами с хорошими изображениями мы понимаем ночи, в которые среднее качество изображения, измеряемое DIMM  $\beta < 0.95''$  (медиана для всего периода наблюдений)

### 3.4 Качество изображения

Качество изображения - величина, хорошо известная всем астрономам-наблюдателям, для большинства видов наблюдений она имеет большое значение (спектроскопия, фотометрия), для некоторых — решающее (АО, интерферометрия), поэтому качество изображения наряду с количеством ясного неба является одним из основных астроклиматических параметров при выборе места для обсерватории и при сравнения существующих мест. Мониторинг качества изображения после строительства телескопа приобретает еще большее значение: текущая величина  $\beta$  может быть использована для оптимального распределения наблюдательного времени.

На рисунке 8 приведено кумулятивное нормированное распределение качества изображения, измеряемого DIMM. Именно такое качество изображения будет наблюдаться в большом телескопе, при условии, что его оптика идеальна и под куполом нет турбулентности. Также для сравнения приведены распределения качества изображения, измеряемого MASS. Эти кривые соответствуют качеству изображения, которое дал бы идеальный телескоп находящийся на высоте соответственно 0.5, 1, 2, 4, 8, 16 км. Другая интерпретация этих величин — качество изображения в телескопе с системой адаптивной оптики, исправляющей первые 0.5, 1, 2, 4, 8, 16 км. В таблице внутри рисунка даны квантили изображенных распределений<sup>5</sup>.

Также на этом рисунке приведено распределение  $\beta$  для зимнего и летнего периодов. Под зимним периодом мы понимаем время между осенним и весенним равноденствием, под летним соответственно между весенним и осенним. Видно существенное различие между сезонами, причем общее распределение лежит ближе к зимнему вследствие того,

<sup>5</sup>Квантиль  $q_p$  распределения случайной величины  $X$  — это такое  $x$ , что вероятность фиксировать  $X < x$  равна  $p$  ( $P(X < x) = p$ ). Таким образом, квантиль  $q_{0.5}$  имеет смысл медианы. Квантили более устойчивы по сравнению со средним, особенно для сильно асимметричных распределений, поэтому мы будем использовать их.

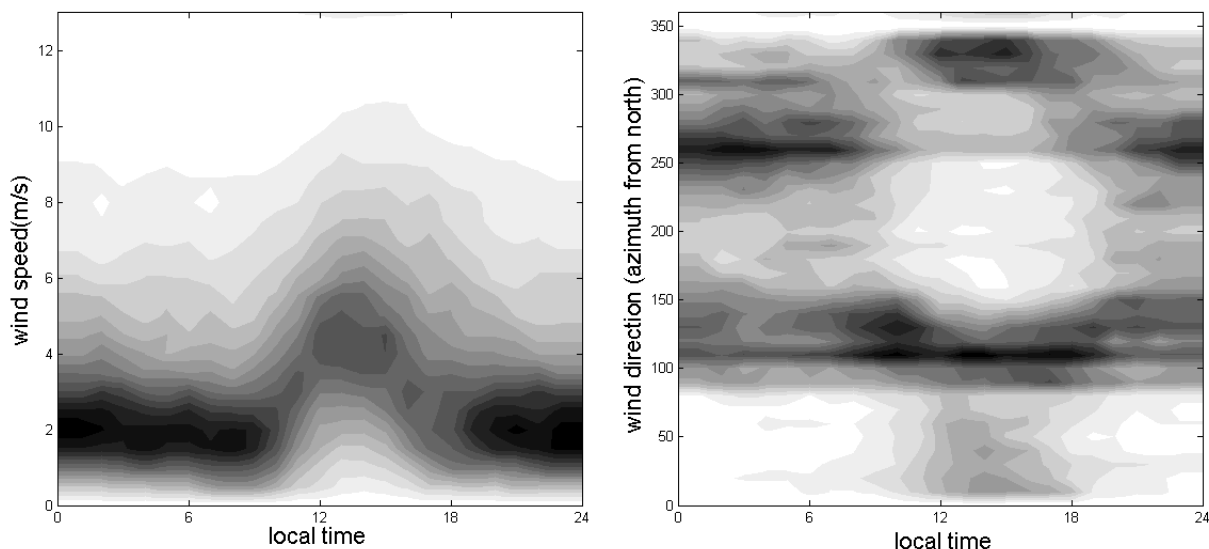


Рис. 7: Справа изображено распределение скорости ветра, слева — распределение направления ветра. Степень черноты отражает вероятность наблюдать ветер соответствующей скорости/направления в соответствующее время суток.

что летом мы наблюдали существенно меньше, чем зимой (см. график 4). Особенно это отличие заметно для периодов очень хороших изображений. Например, вероятность наблюдать изображения меньше  $0.6''$  летом практически равна нулю. Отметим, что распределение, соответствующее зимнему сезону, хотя и имеет существенно меньшую медиану, но его дисперсия больше, т.е. и очень плохие изображения зимой встречаются чаще. Сезонные отличия в профиле турбулентности приведены в табл. 4.

Бросается в глаза тот факт, что качество изображения, измеряемое DIMM, значительно превосходит то, что измеряет MASS, что говорит о том, что вклад приземного слоя 0-500 м в атмосферную турбулентность сравним со вкладом всей остальной атмосферы. В разделе 3.8 мы будем рассчитывать интенсивность турбулентности в приземном слое и исследовать её.

длительность/ $\beta('')$	1.0	0.7	0.4
>5мин	634	332	16
>15мин	343	127	7
>30мин	185	62	2
>60мин	95	27	—
>120мин	37	4	—

Таблица 3: Периоды хороших изображений

Отметим, что встречаются периоды, когда изображения, значительно меньших медианных, могут держаться довольно долгое время. Например, дважды наблюдалось, как изображения  $< 0.4''$  устанавливались на 40 минут — это уникальные случаи.

Для работы системы АО важно не только хорошее качество изображения, но и продолжительность его периодов. Рассмотрим пример: есть система АО, функционирующая при  $\beta < 0.7$ . Пока это условие выполняется, точность коррекции волнового фронта довольно плавно зависит от  $\beta$ , но если качество изображения вдруг становится хуже, точность падает скачком, другими словами, система перестает работать вообще. В таблице 3 приведена статистика периодов, когда изображения были  $< 0.4''$ ;  $< 0.7''$ ;  $< 1.0''$ .

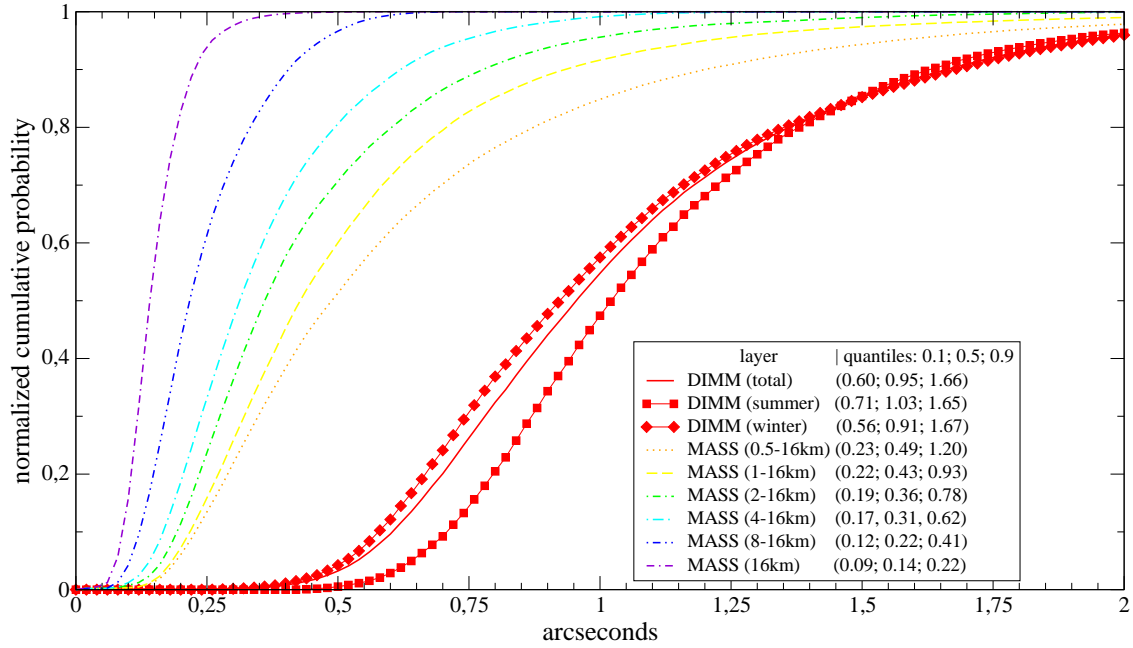


Рис. 8: Кумулятивное нормированное распределение качества изображения с учетом слоев атмосферы: 0-16 км, 0.5-16 км, 1-16 км, 2-16 км, 4-16 км, 8-16 км, 16 км. Общее качество изображения измеряется непосредственно DIMM (приведены распределения качества изображения для летнего и зимнего сезонов, см. текст). Качество изображения по слоям рассчитано из профилей турбулентности MASS. В таблице приведены квантили  $q_{0.1}$ ,  $q_{0.5}$ ,  $q_{0.9}$  распределений.

### 3.5 Изопланатический и изокинетический углы

Мы рассчитывали угол изопланатизма  $\theta_0$  (см. раздел 1.4) из профиля турбулентности, получаемого MASS. Отметим, что приземный слой на угол изопланатизма не влияет. Распределение угла изопланатизма представлено на рисунке 9, на этом же рисунке для сравнения представлено распределение качества изображения. Квантили  $q_{0.1}$ ,  $q_{0.5}$ ,  $q_{0.9}$  составили: 1.21, 2.21, 3.32.

Интересно, что распределения  $\theta$  и  $\beta$  пересекаются, т.е. самое плохое качество изображения *больше*, чем самый малый угол изопланатизма. Если вспомнить, что угол изопланатизма тем меньше, чем хуже качество изображения, то станет очевидно, что моменты, когда  $\beta > \theta_0$  могут иметь место. Анализ полученных данных показывает, что такие ситуации действительно встречаются в 5% случаев на длине волны 0.5 мкм. Отметим, что с уменьшением длины волны качество изображения будет увеличиваться, а угол изопланатизма уменьшаться, например, для  $\lambda = 0.33$  мкм (полоса В)  $\beta > \theta_0$  уже в 23% случаев. В такой ситуации спекл-интерферометрические наблюдения становятся вовсе невозможны, а система АО будет работать только при условии, что она мультисопряженная.

Изокинетический угол  $\theta_{TA}$  (см. раздел 1.4) мы также рассчитывали из профиля турбулентности для  $D=2.5$  м. Его распределение нанесено на рисунок 9, квантили  $q_{0.1}$ ,  $q_{0.5}$ ,  $q_{0.9} = 4.87''$ ,  $7.35''$ ,  $10.50''$ . Отметим, что исправление наклонов волнового фронта с точностью в 1 радиан — довольно жесткий критерий, в большинстве наблюдений с разрешением, ограниченным атмосферой, требования на точность гидирования в 20-50 раз слабее, поэтому и поле зрения АО 1 первого порядка в реальности будет много больше.

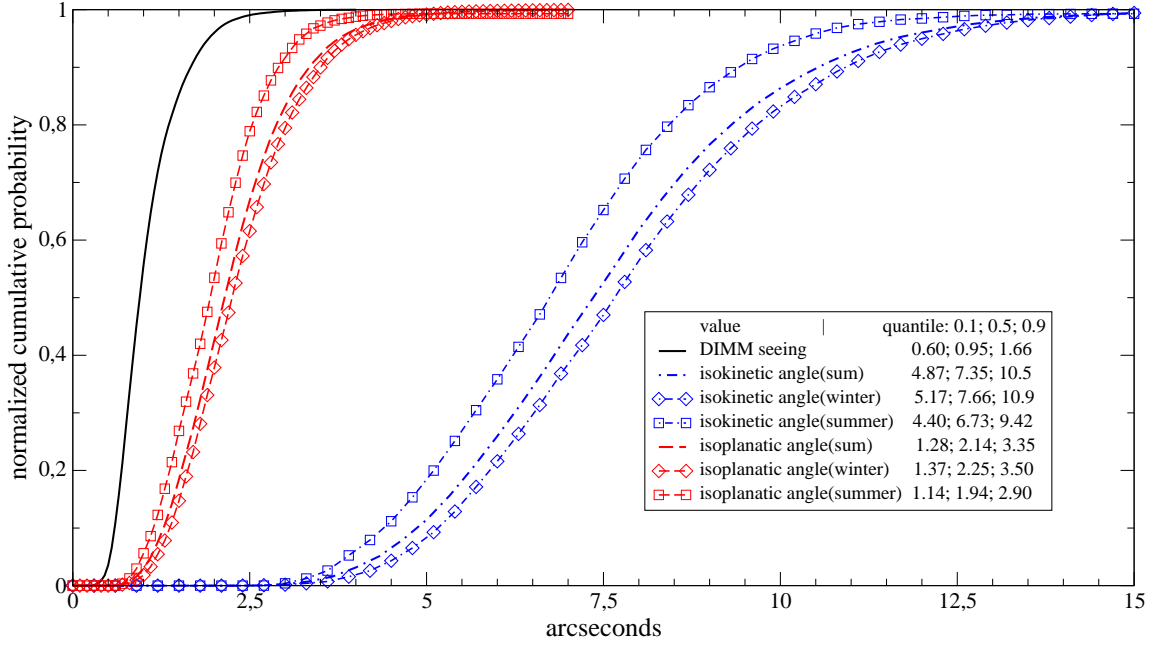


Рис. 9: Распределение величин изопланатического и изокинетического угла по данным MASS общее и для разных сезонов. Также для сравнения приведено распределение качества изображения, полученного DIMM.

### 3.6 Постоянная времени

В приборе MASS/DIMM постоянная времени измеряется путем анализа временных корреляций мерцаний. А так как мерцания определяются высокой турбулентностью, то и постоянная времени соответствует свободной атмосфере, приземный слой при оценке не учитывается, что приводит к появлению систематических ошибок в определении  $\tau_0$ . Этот факт подтвердился в ходе совместных измерений на MASS и на других приборах для измерения профиля турбулентности (таких, как SCIDAR[14]). Было замечено, что MASS занижает величину  $\tau_0$  примерно в 1.3 раза. На рисунке 10 приведено распределение  $\tau_0$  для Шатжатмаза по данным наших измерений, квантили  $q_{0.1}$ ,  $q_{0.5}$ ,  $q_{0.9}$  составили:  $0.90''$ ,  $2.27''$ ,  $4.01''$ .

### 3.7 Профиль турбулентности в свободной атмосфере

В таблице 4 приведены данные о среднем профиле турбулентности с разделением по сезонам и периодам с хорошим/плохим изображением (в данном случае под хорошим изображением мы понимали  $\beta_{MASS} < 0.49''$  (медиана)). Сезонных различий выявлено не было (за исключением равномерного роста интенсивности турбулентности во всех слоях), а вот корреляция с качеством изображения просматривается.

Чтобы проанализировать вклады слоев при разном качестве изображения, мы отсортировали все измеренные профили по  $\beta$ , а затем рассчитали скользящее среднее с окном 500 по  $\beta$ , результат приведен на рисунке 11. Видно, что с ухудшением качества изображения (т.е. с ростом интеграла турбулентности  $C_n^2$ ) вклад слоев до 4 км увеличивается, а выше 4 км уменьшается. Другими словами ухудшение качества изображения происходит в основном за счет роста турбулентности в промежуточном слое, а высотная турбулентность растет не так значительно. Отметим, что данный факт, подтверждает выводы, сделанные в [17],[16],[13]. Еще раз отмечу, что вышесказанное относится к сво-

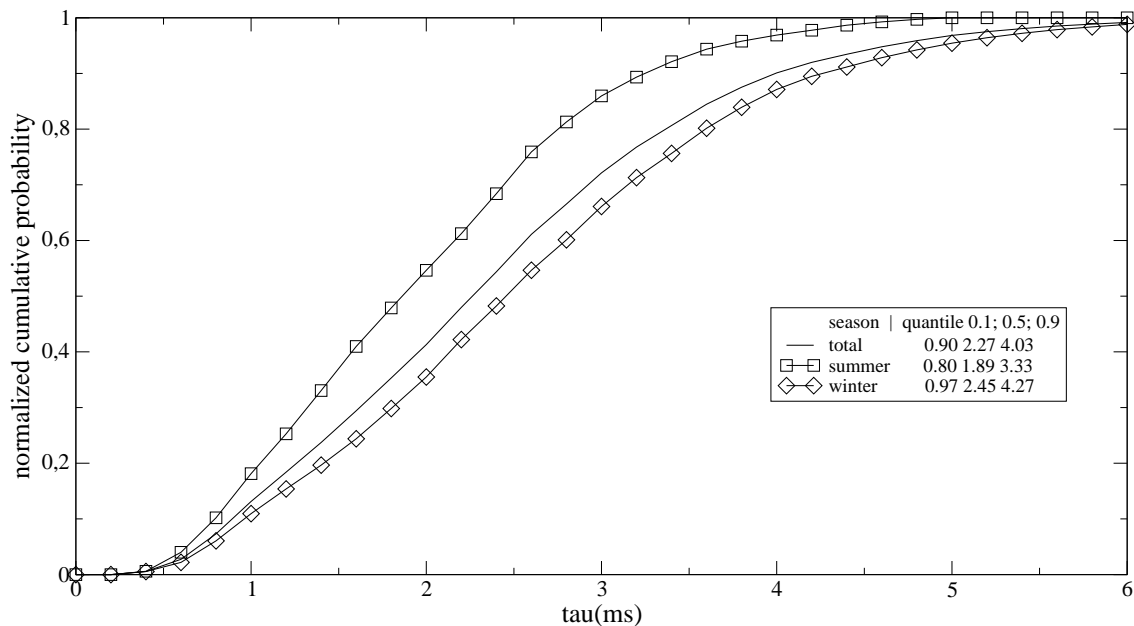


Рис. 10: Распределение постоянной времени  $\tau_0$  для зимы (ромбы) и лета (квадраты).

бодной атмосфере, о приземном слое речь пойдет в следующем разделе.

### 3.8 Турбулентность в приземном слое и свободной атмосфере

Как уже говорилось, DIMM дополняет MASS в том смысле, что он дает информацию о приземном слое — от 0 до 500 метров. Исследование приземного слоя представляет особый интерес по следующим причинам:

1. Как видно из рисунка 8, турбулентность в приземном слое составляет значительную долю от всей турбулентности в атмосфере, какую именно мы расскажем чуть позже
2. Зависимость интенсивности турбулентности в приземном слое должна быть более четко связана с метеопараметрами, которые мы измеряем. Очевидно, что в сво-

Таблица 4: Усредненные профили турбулентности: за весь период наблюдений, за зимний/летний сезоны и в периоды хорошего/плохого качества изображения. В ячейках таблицы указаны интенсивности турбулентных слоев в  $10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$ , в скобочках в процентах от интеграла по всей атмосфере.

высота слоя (км)	всего	зима	лето	$\beta_{FA} < 0.49$	$\beta_{FA} > 0.49$
0.5	1.12 (28%)	1.03 (28%)	1.32 (28%)	0.11 (10%)	2.22 (31%)
1.0	0.84 (21%)	0.84 (23%)	0.85 (18%)	0.15 (13%)	1.61 (22%)
2.0	0.65 (16%)	0.54 (14%)	0.90 (19%)	0.10 (9%)	1.25 (17%)
4.0	0.70 (17%)	0.61 (16%)	0.90 (19%)	0.25 (22%)	1.19 (16%)
8.0	0.40 (10%)	0.40 (11%)	0.40 (8%)	0.27 (24%)	0.55 (8%)
16.0	0.32 (8%)	0.28 (8%)	0.40 (8%)	0.24 (22%)	0.41 (6%)



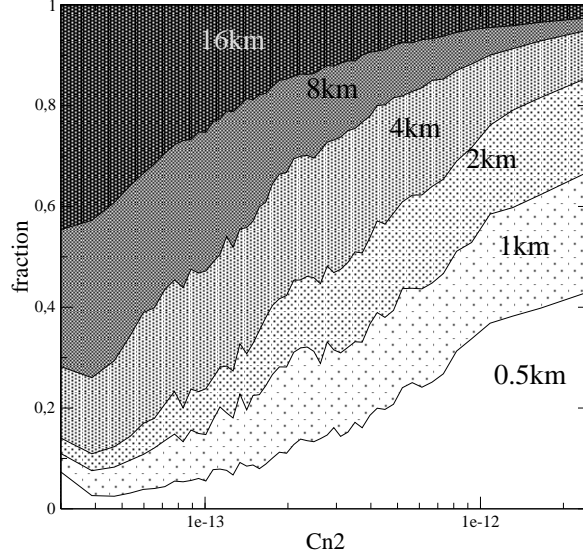


Рис. 11: Профили турбулентности, усредненные по интегралу турбулентности

Таблица 5: Статистика качества изображения, соответствующего приземному слою ( $\beta_{GL}$ ) и свободной атмосфере ( $\beta_{FA}$ ).

GL/FA	параметр	всего	зима	лето	$\beta < 0.96$	$\beta > 0.96$
$\beta_{GL}$	$q_{0.1}$	0.39	0.37	0.46	0.35	0.57
$\beta_{GL}$	$q_{0.5}$	0.70	0.67	0.74	0.56	0.96
$\beta_{GL}$	$q_{0.9}$	1.24	1.27	1.19	0.76	1.50
$C_{nGL}^2$	вклад в инт.	64%	65%	62%	66%	62%
$\beta_{FA}$	$q_{0.1}$	0.22	0.20	0.28	0.19	0.34
$\beta_{FA}$	$q_{0.5}$	0.48	0.44	0.55	0.34	0.68
$\beta_{FA}$	$q_{0.9}$	1.11	1.08	1.18	0.59	1.22
$C_{nFA}^2$	вклад в инт.	36%	35%	38%	34%	38%

бодной атмосфере скорость, направление ветра, температура и другие параметры отличаются от приземных, поэтому проследить связь турбулентности в свободной атмосфере и приземных метеопараметров сложнее.

3. В данный момент многие обсерватории проводят исследования в области т.н. Ground Layer Adaptive Optics — адаптивной оптики, исправляющей исключительно приземный слой турбулентности [8]. Конечно, полного исправления волнового фронта в этом случае достичь невозможно, т.к. турбулентность в свободной атмосфере остается неисправленной, зато коррекция достигается в значительно большем поле зрения. В связи с этим интересно было бы проанализировать условия, при которых приземный слой дает определяющий вклад в ухудшение изображений. В эти моменты использование GLAO имело бы особый смысл.

Интеграл в приземном слое мы рассчитывали по следующей формуле[7]:

$$C_{nGL}^2 = 6.8 \cdot 10^{-13} \beta^{\frac{5}{3}} - C_{nFA}^2 \quad (16)$$

Первое слагаемое в формуле — это интеграл турбулентности по всей атмосфере, он вычисляется из качества изображения, измеренного DIMM  $\beta$ , по формуле из [3]. Более подробно о сведении данных MASS и DIMM читайте в приложении А.

В таблице 5 приведена статистика качества изображения, соответствующего приземному слою и свободной атмосфере по отдельности. Видно, что средний вклад приземного слоя в интеграл почти не зависит от сезона и от общей интенсивности турбулентности (в отличие от профиля турбулентности в свободной атмосфере, см. предыдущий раздел). Чтобы более внимательно изучить этот вопрос мы построили распределение вкладов приземного слоя в интеграл ( $C_{nGL}^2/C_n^2$ ) для зимы/лета и периодов хорошего/плохого качества изображения (рис. 12). Несмотря на значительную дисперсию этого распределения, оно подтверждает вывод о постоянстве вклада приземного слоя, видна разве что небольшая сезонная зависимость: летом вклад приземного слоя в среднем чуть больше, чем зимой.

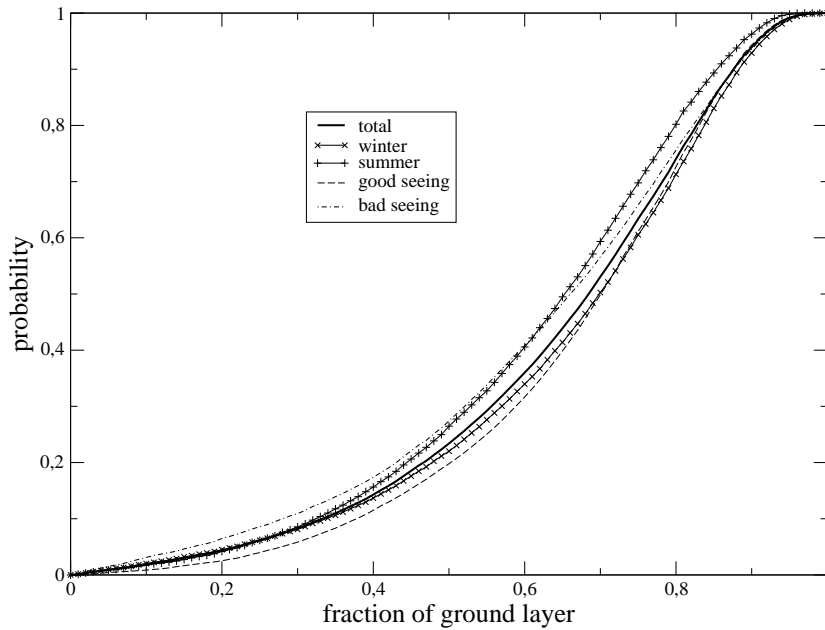


Рис. 12: Распределение вклада приземного слоя в общий интеграл турбулентности: общее, для зимы/лета и для периодов хорошего/плохого изображения ( $\beta_{DIMM} < 0.96$ )

Кстати, если рассматривать атмосферу в целом, то видно, что летом в среднем изображения хуже, чем зимой. Причем усиление турбулентности происходит как в приземном слое, так и в свободной атмосфере.

Тот факт, что распределение вклада приземного слоя почти не зависит от общей турбулентности может быть следствием того, что интенсивность турбулентности в приземном слое и свободной атмосфере статистически независимы. Это предположение приводится в [13], в этой же работе есть рисунок с совместным распределением  $C_{nGL}^2$  и  $C_{nFA}^2$ . Мы построили его по нашим данным, чтобы убедиться, что и в нашем случае эта гипотеза выполняется (см. рис. 13). На рисунке также проведены кривые соответствующие постоянному общему качеству изображения.

Для того, чтобы качество изображения стало хорошим необходимо выполнение двух, как только что было доказано, не связанных между собой условий: это малая турбулентность в приземном слое и в свободной атмосфере. И если о свободной атмосфере

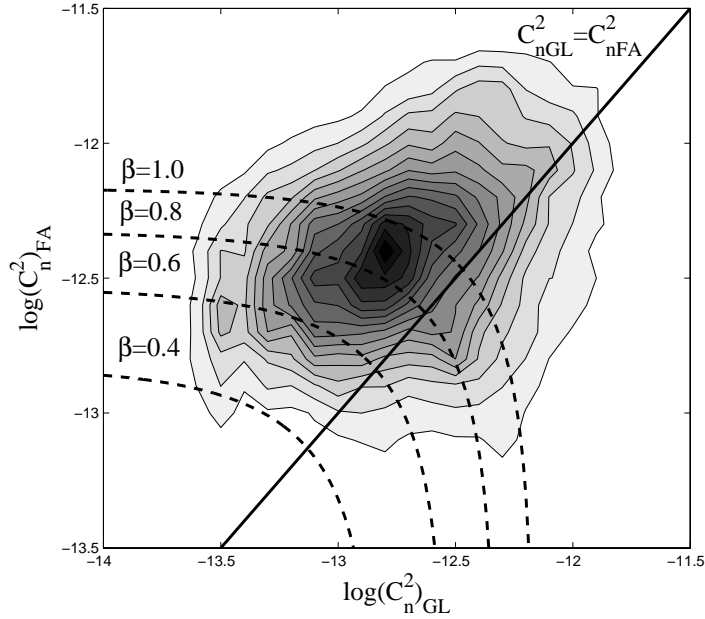


Рис. 13: Корреляция интенсивности турбулентности в приземном слое  $C^2_{nGL}$  и в свободной атмосфере  $C^2_{nFA}$ , по осям отложены логарифмы соответствующих величин.

мы мало что можем сказать (у нас нет возможности напрямую измерять её физические параметры), то некоторые параметры приземного слоя (такие как ветер и температура) мы можем измерить.

На графике 14 представлены распределения скоростей (слева) и направлений (справа) ветра для разных значений турбулентности в приземном слое и в свободной атмосфере. На распределении скоростей видно небольшое отличие для условий слабой и сильной турбулентности, причем в условиях слабой турбулентности ветер в среднем меньше. Данный эффект сильнее проявлен для приземного слоя, что вполне ожидаемо, т.к. измеряемый ветер фактически дует в приземном слое.

На распределении направлений также видно различие. При хорошем качестве изображения в приземном слое вероятность наблюдать ветер в диапазоне направлений от  $250^\circ$  до  $300^\circ$  значительно выше, чем при плохом. Отметим, что если рассматривать качество изображения, даваемое свободной атмосферой, то вместо этого эффекта там проявлен другой: юго-восточный ( $100^\circ - 130^\circ$ ) ветер при интенсивной турбулентности в свободной атмосфере дул немного чаще.

## 4 Атмосферное поглощение

Данные измерений MASS — абсолютные значения потоков — могут быть использованы для оценки величины атмосферного поглощения. Допустим,  $m_0$  — звездная величина звезды в полосе нашего прибора при наблюдении вне атмосферы,  $m(M_z)$  — звездная величина той же звезды при наблюдении с поверхности земли,  $M_z$  — воздушная масса, которую преодолевает свет звезды. Напомним, что в первом приближении эти величины связаны законом Бугера:

$$m = m_0 + M_z \cdot k, \quad (17)$$

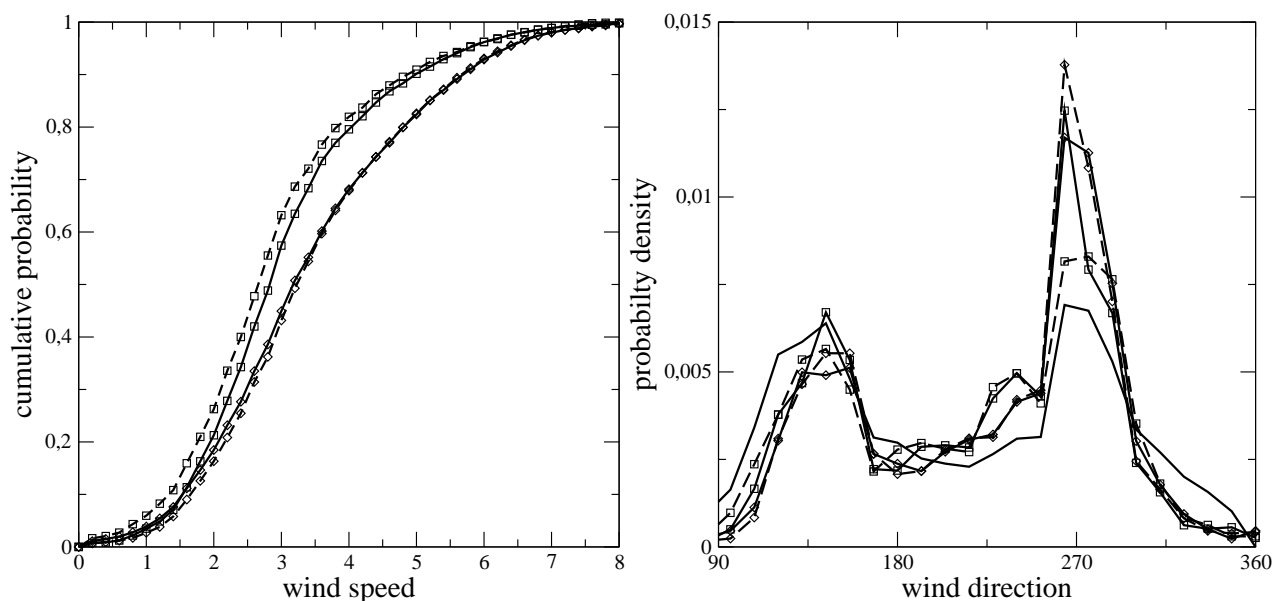


Рис. 14: Слева: кумулятивное распределение по скоростям ветра для разных условий турбулентности, Справа: распределение плотности вероятности направлений ветра для разных условий. Сплошные линии относятся к свободной атмосфере, прерывистые — к приземному слою. Квадратами обозначены кривые, соответствующие хорошим изображениям, ромбами — плохим (меньше/больше медианы соответствующего слоя (см. табл. 5)). Сплошная кривая без символов на распределении направлений — общее распределение ночного ветра.

где  $k$  — т.н. атмосферное поглощение на единицу воздушной массы, далее просто атмосферное поглощение. В наших наблюдениях воздушная масса никогда не превышает 1.3, поэтому для её расчета мы использовали простейшую формулу  $M_z = \sec(z)$ .

Для определения зависимости внеатмосферной звездной величины в полосе MASS от известных звездных величин в фотометрических полосах Джонсона — т.н. уравнения цвета — 22 февраля 2008 года О.В. Возякова и В.Г. Корнилов провели эксперимент, в котором они наблюдали около 20 звезд с различным показателем цвета на разных зенитных расстояниях. При этом зенитные расстояния выбирались большими, чем в обычных наблюдениях MASS, что позволило точно учесть атмосферное поглощение (специально была выбрана фотометрическая ночь) и определить уравнение цвета:

$$VMASS = V + 0.45375 * (B - V) + 1.0709, \quad (18)$$

К сожалению, на инструментальную величину звезды влияют такие переменные факторы как прозрачность оптики телескопа и прибора и зависимость чувствительности ФЭУ от температуры. Поэтому мы определяли нуль-пункт фотометрической шкалы для нескольких, разнесенных дат, об этом чуть позже.

Методика наблюдений на MASS плохо подходит для точного определения атмосферного поглощения классическим методом Бугера вследствие того, что диапазон воздушных масс мал — от 1.00 до 1.25, каждая звезда наблюдается не более 1.5 часов. Тем не менее, из дальнейшего повествования вы увидите, что некоторую оценочную информацию из этих наблюдений можно извлечь.

## 4.1 Метод Бугера

Сначала мы попытались аппроксимировать каждую кривую потока прямой Бугера. Но этот метод работает только при том условии, что поглощение в процессе наблюдения одной звезды не изменялось. Практика показала, что это условие выполняется довольно редко, особенно летом. На рисунке 15 приведены зависимости звездной величины от воздушной масс для Альфы Лебеда в фотометрическую и среднестатистическую безоблачную ночь. Стало понятно, что получить статистику прозрачности таким образом невозможно, так что мы решили хотя бы убедиться в том, что нуль-пункт фотометрической шкалы прибора соответствует расчетному и не изменяется со временем. Для этого мы отобрали несколько наиболее однородных (в смысле постоянства поглощения) рядов потоков и аппроксимировали их прямыми Бугера, результаты приведены в таблице 6.

Первое, что бросается в глаза — это большое отличие в нуль-пунктах для одной и той же звезды — они имеют разброс порядка  $0.1^m$ , хотя отличие среднего от расчетного нуль-пункта и меньше разброса. Также не наблюдается систематического изменения нуль-пункта на протяжении года наблюдений. Таким образом, у нас нет оснований не доверять расчетному значению нуль-пункта, его мы и будем использовать для оценки прозрачности атмосферы. В таблице 1 также приведено атмосферное поглощение, определенное из аппроксимации. Добавим, что в месяцы с апреля по август даже в фотометрические ночи поглощение было больше  $0.26^m$ , зимой же среднее поглощение составляло  $0.20^m$ . Это различие мы обсудим немного позже.

## 4.2 Индивидуальная оценка поглощения

Итак, предположим, что нуль-пункт фотометрической шкалы нашего прибора не изменяется со временем и его можно рассчитать по формуле 17. Тогда мы можем вычислить атмосферное поглощение для каждой одноминутной точки потока:

$$k = \frac{m - m_0}{M_z} \quad (19)$$

Надо отметить, что такой метод определения поглощения успешно использовался в нескольких работах: [30]. За год наблюдений мы сделали более 32 тысяч одноминутных измерений потоков звезд, что дает богатый материал для построения статистики поглощения. Погрешность каждого из этих измерений составляет  $0.003^m$ . На рисунке 16 представлено распределение атмосферного поглощения для всего периода наблюдений а также для зимнего (декабрь-март), летнего (апрель-сентябрь) и осеннего (октябрь-ноябрь) сезона по отдельности.

Видно разительное отличие в характерных значениях поглощения для разных сезонов. Причем отличаются не только среднее значение поглощения, но и их дисперсия — для летнего сезона дисперсия в 3-4 раза больше, чем для других сезонов. Очевидно, что такое увеличение дисперсии трудно объяснить инструментальными эффектами, тем более при оценке поглощения методом Бугера столь существенного сдвига нуль-пункта мы не зафиксировали.

Возможно, это переключение связано с образованием/исчезновением снежного покрова, что должно влиять на количество пыли в атмосфере. Также возможно, эффект возникает из-за высокой влажности летом, что приводит к образованию конденсата (тумана). Мы можем косвенно оценить количество воды в атмосфере по приземной влажности и температуре неба (см. главу о метеостанции), а содержание пыли должно

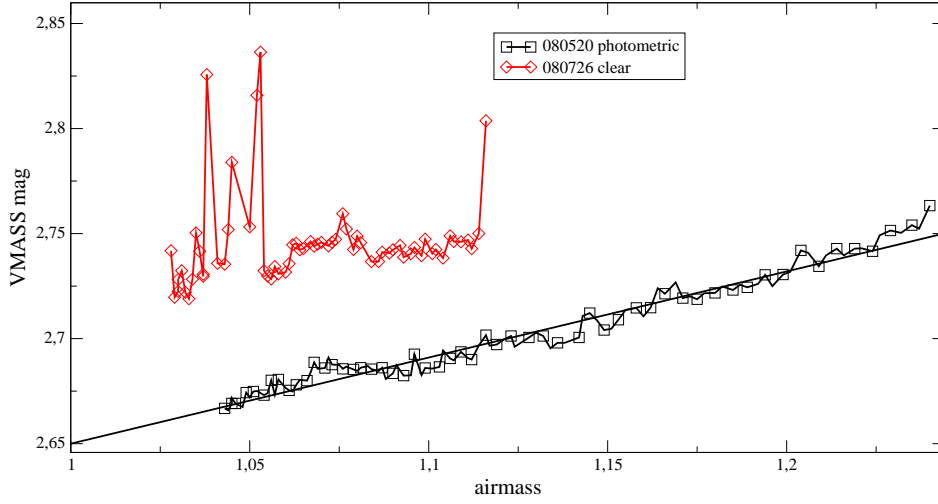


Рис. 15: Примеры кривых блеска для Альфы Лебеда в фотометрическую и нефотометрическую ночь. Каждая точка соответствует минутному усреднению потока в апертуре D.

Таблица 6: Результаты аппроксимации кривых потока прямыми Бугера. Для звезд указаны величина в полосе MASS и показатель цвета  $B - V$ . Дата в формате YYMMDD. Коэффициенты и их погрешности получены МНК.  $\chi^2$  — средний квадрат остаточного отклонения отдельных измерений потока — характеризует “качество” кривой блеска.

звезда VMASS;B-V	внеатмосферная		атмосферное	
	дата	величина	поглощение	$\chi^2$
Alp_Lyr 1.09; 0.00	080604	$1.05 \pm 0.01$	$0.26 \pm 0.01$	$1.2 \cdot 10^{-5}$
	080829	$1.15 \pm 0.02$	$0.35 \pm 0.02$	$8.3 \cdot 10^{-5}$
	080916	$1.26 \pm 0.01$	$0.20 \pm 0.01$	$7.7 \cdot 10^{-6}$
	080917	$1.20 \pm 0.01$	$0.19 \pm 0.01$	$4.3 \cdot 10^{-6}$
Alp_Cyg 2.36; 0.09	080520	$2.24 \pm 0.01$	$0.41 \pm 0.01$	$2.2 \cdot 10^{-5}$
	080604	$2.20 \pm 0.004$	$0.38 \pm 0.004$	$5.5 \cdot 10^{-6}$
	080716	$2.35 \pm 0.02$	$0.32 \pm 0.02$	$7.3 \cdot 10^{-6}$
	080916	$2.53 \pm 0.02$	$0.18 \pm 0.02$	$8.0 \cdot 10^{-6}$
Gam_Gem 3.00; 0.00	071204	$2.93 \pm 0.02$	$0.19 \pm 0.01$	$1.4 \cdot 10^{-5}$
	080114	$2.99 \pm 0.01$	$0.15 \pm 0.01$	$1.5 \cdot 10^{-6}$
	080213	$2.97 \pm 0.01$	$0.23 \pm 0.01$	$1.2 \cdot 10^{-5}$
Alp_Leo 2.37; -0.11	071204	$2.30 \pm 0.02$	$0.20 \pm 0.02$	$2.0 \cdot 10^{-5}$
	080114	$2.29 \pm 0.02$	$0.27 \pm 0.02$	$2.8 \cdot 10^{-5}$
Bet_Gem 2.66; 1.00	080114	$2.65 \pm 0.005$	$0.16 \pm 0.004$	$3.3 \cdot 10^{-6}$
	080213	$2.46 \pm 0.04$	$0.40 \pm 0.04$	$5.6 \cdot 10^{-6}$
	080203	$2.60 \pm 0.002$	$0.20 \pm 0.002$	$3.9 \cdot 10^{-6}$
	080225	$2.66 \pm 0.01$	$0.16 \pm 0.01$	$1.4 \cdot 10^{-5}$

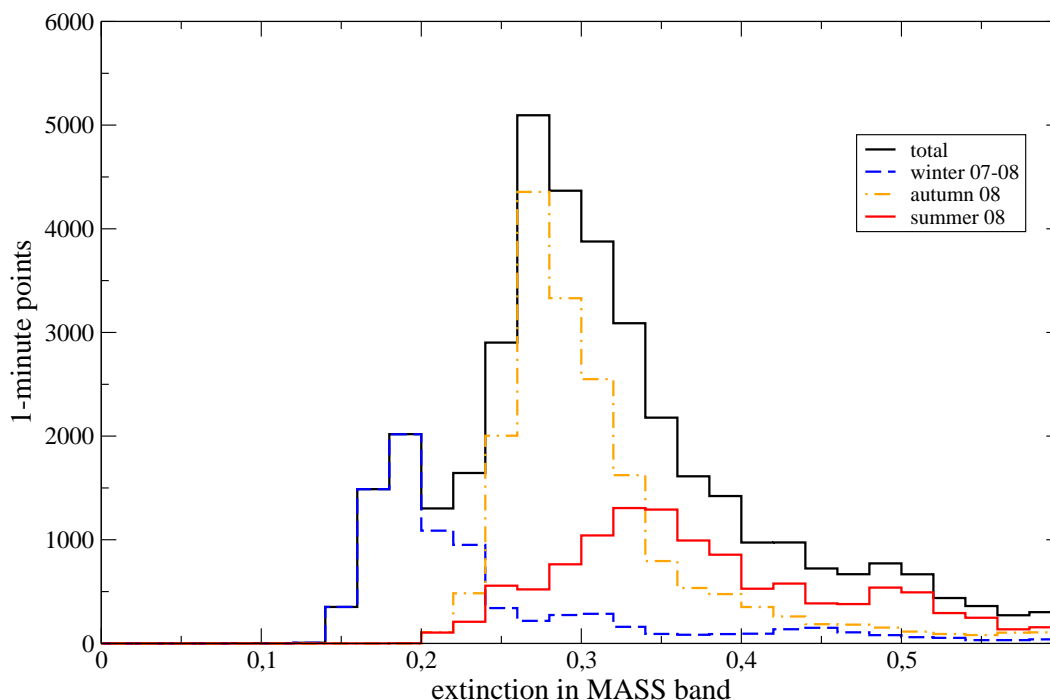


Рис. 16: Распределение прозрачности в полосе MASS по сезонам: прерывистая — зима 2007-2008 (медиана  $0.21^m$ ), сплошная — лето 2008 (медиана  $0.36^m$ ), штрихпунктирная — осень 2008 (медиана  $0.29^m$ ). Также показана сплошная огибающая — суммарное распределение (медиана  $0.30^m$ ). Рэлеевская компонента атмосферного поглощения для полосы MASS ( $0.460\mu\text{км}$ ) и высоты ASM — 2100 м равна  $0.17^m$ [32].

коррелировать со скоростью ветра. К сожалению на данный момент статистика прозрачности и метеоданных слишком мала, чтобы заметить какую-то связь между прозрачностью и метеопараметрами.

## 5 Заключение

Данная работа была проведена в рамках исследований астроклимата г.Шатжатмаз — места установки 2.5-м телескопа ГАИШ. Целью являлось подведение промежуточных итогов этих исследований. За 13 месяцев мониторинга турбулентности мы провели 672 часа наблюдений на MASS и 715 часов наблюдений на DIMM. Результаты обработки этих данных суммированы в таблице 7. Доля ясного ночного времени по нашим измерениям составила 48%, причем основная его часть приходится на зимний период. Медианный перепад температур между полднем и полночью оказался всего  $-4^\circ\text{C}$ . Медианное значение скорости ветра в астрономическую ночь составило 2.3 м/с, ветер  $V > 10$  м/с дул всего в 1.7% случаев. Также была замечена горно-долинная циркуляция. Днем ветер, в среднем, сильнее в 2 раза и дует в других направлениях по сравнению с ночью.

Медиана  $q_{0.5}$  качества изображения  $\beta - 0.96''$ , в приземном слое —  $0.70''$ , в свободной атмосфере —  $0.49''$ . Добавим, что летом наблюдаемые изображения были в среднем хуже, что особенно сильно проявлялось для периодов хороших изображений (подробнее см. раздел 5.2). Медиана угла изопланатизма  $\theta_0 - 2.14''$ , постоянной времени  $\tau_0 - 2.27\text{мс}$ . Анализ профилей турбулентности в свободной атмосфере показал,

что усиление интенсивности турбулентности в периоды плохого качества изображения происходит в основном за счет появления сильных турбулентных слоев на высотах 2-4 км, а турбулентный слой на высоте 16 км практически постоянен ([20] указывает на аналогичную зависимость). В тоже время интенсивности турбулентности в приземном слое и свободной атмосфере статистически независимы (что впервые было замечено в [19], [14]).

Были выявлены слабые зависимости интенсивностей турбулентности в приземном слое и свободной атмосфере от скорости и направления приземного ветра. Для периодов хороших изображений характерны меньшие скорости ветра. Также показано, что при западном ветре вероятность наблюдать хорошие изображения уменьшается.

Подытожим условия, характерные для хороших изображений на г.Шатжатмаз:

- Низкая турбулентность в приземном слое — малая скорость ветра, определенные направления ветров.
- Низкая турбулентность в свободной атмосфере — также малая скорость ветра и отсутствие турбулентности на высотах 2-4 км.

Особо отметим, что вследствие независимости приземного слоя и свободной атмосферы, эти условия являются *необходимыми, но не достаточными* для наступления периода хороших изображений [19]. Например, слабый ветер не гарантирует, что будут хорошие изображения, зато сильный гарантирует, что будут плохие. Добавим, что в зимний период вероятность наблюдать хорошие изображения значительно выше, т.к. и приземная, и высотная турбулентность зимой слабее, см. раздел 5.2. Полученные статистические данные позволяют делать предсказания качества изображения. Особенность этих предсказаний в том, что предвидеть плохие изображения мы можем почти наверняка (прогноз ветра, лето), а хорошие вовсе не можем, слабый ветер лишь указывает на *повышенную вероятность* наблюдать хорошие изображения. Однако такие предсказания все равно полезны при планировании наблюдений.

## 5.1 Сравнение с другими обсерваториями

В таблице 7 приведено сравнение некоторых астроклиматических параметров для г.Шатжатмаз и других обсерваторий. Хотя астроклимат г.Шатжатмаз и отстает от лучших мест, таких как г.Параналь, г.Мауна Кеа, г.Майданак, Dome C в Антарктиде, однако нельзя сказать, что это отставание велико. Например, качество изображения, угол изопланатизма и постоянная времени (особенно для зимы) сравнимы или превосходят аналогичные в других обсерваториях, например, Сьерра Тололо или ла Силла.

Оптимизм в плане АО-наблюдений на г.Шатжатмаз также внушает наличие достаточно продолжительных периодов хороших изображений, так за год наблюдений мы 2 раза наблюдали, как на 40 минут устанавливалось  $\beta < 0.4''$ , что соответствует лучшим среднеширотным обсерваториям. Тем более, как уже говорилось, периоды плохих изображений мы, в принципе, можем предвидеть.

Эти результаты являются новыми для Кавказа, ранее аналогичные исследования в этом регионе не проводились, хотя здесь располагается 2 крупные обсерватории: САО РАН и обсерватория пика Терскол. Надо заметить, что не все полученные данные применимы к этому региону, т.к. астроклимат, а, в особенности, приземный турбулентный слой сильнее всего зависят от локального рельефа местности, и астроклимат каждой конкретной обсерватории необходимо измерять из точки, максимально приближенной к главному инструменту (это было основным условием на расположение



Таблица 7: Сравнение данных, полученных на г.Шатжатмаз в 2007-2008гг, с данными, полученными в других географических пунктах.

географический пункт	clear time	$\beta(^{\prime\prime})$ $q_{0.5}$	$\beta_{GL}(^{\prime\prime})$ $q_{0.5}$	$\beta_{FA}(^{\prime\prime})$ $q_{0.5}$	$\theta_0(^{\prime\prime})$ $q_{0.5}$	$\tau_0(\text{мс})$ $q_{0.5}$	источник
Шатжатмаз (общ)	49%	0.95	0.70	0.49	2.14	2.27	
Шатжатмаз (лето)	33%	1.03	0.74	0.55	1.94	1.89	
Шатжатмаз (зима)	54%	0.91	0.67	0.44	2.25	2.45	
Майданак	59%	0.69	—	0.46	2.19	3.94	[18],[17]
la Silla	58%	0.89	—	—	—	—	[18]
Paranal	78%	0.66	—	—	2.5	3.3	[22],[21]
Las Campanas	—	0.66	0.39	0.48	—	—	[16]
Cerro Pachon	—	0.79	0.57	0.47	2.0	2.6	[13],[20]
Cerro Tololo	—	0.95	0.66	0.55	1.8	2.0	[19]
Mauna Kea	—	0.68	0.44	0.38	2.22	—	[14]
Dome C (Antarctica)	—	0.27	—	—	5.7	7.9	[20]

ASM). Однако измерения MASS показали, что высотная турбулентность, величина меняющаяся на масштабах сотни километров, незначительно отличается от других среднеширотных обсерваторий (медиана  $\beta_{FA} = 0.49''$ ), несмотря на близость Кавказского хребта и преобладания ветров, дующих из-за него.

## 5.2 Отличия между летними и зимними измерениями

Особое внимание привлекают обнаруженные существенные отличия между зимними и летними измерениями. Напомним, что в качестве летнего периода мы рассматриваем период между весенним и осенним равноденствиями, а в качестве зимнего — между осенним и весенним.

- Зимой значительно больше процент ясного ночного времени — 54%, летом он составляет 33%. Заметим, что зимой и продолжительность астрономической ночи больше — а значит отличие в абсолютном количестве ясного ночного времени между зимой и летом еще значительнее. За последний год количество ясного ночного времени зимой составило 1020.6 часов, летом — 348.7 часов. Кроме того, скорость ветра зимой в среднем меньше, чем летом, медиана составила 2.3 м/с зимой, и 2.6 м/с летом.
- Медианное качество изображения  $\beta$  зимой составило  $q_{0.5} = 0.91''$ , а летом  $q_{0.5} = 1.03''$ . Для периодов наилучших изображений отличие еще значительнее. Так,  $\beta < 0.6''$  зимой наблюдалось в течении 70.9 часов, а летом — в течении всего 5.2 часов.
- Величины, имеющие значение для адаптивной оптики также отличаются: медианный угол изопланатизма  $\theta_0$  для зимы и лета составил  $q_{0.5} = 2.25''$  и  $q_{0.5} = 1.94''$  соответственно. Медиана постоянной времени  $\tau_0$   $q_{0.5} = 2.45\text{мс}$  и  $q_{0.5} = 1.89\text{мс}$  соответственно.
- Предварительная оценка прозрачности атмосферы показала, что зимой медианное поглощение составляет  $0.20^m$  в полосе MASS, что довольно близко к рэлеевско-

му компоненту поглощения  $0.15^m$ . Летом же поглощение значительно больше — медиана составила  $0.31^m$ .

Однако заметим, что не все свойства турбулентности различаются зимой и летом. Например, соотношения турбулентных слоев зимой и летом отличаются несущественно: вклад приземного слоя зимой 65%, летом 62%, вклад слоев выше 4 км зимой 12%, летом 13%. Можно сделать вывод, что усиление турбулентности в атмосфере в летний период происходит равномерно по всем высотам.

Итак, в последний год на г.Шатжатмаз зимние месяцы гораздо больше подходили для проведения астрономических наблюдений, чем летние. Среди преимуществ — улучшение базовых астроклиматических параметров, определяющих возможность проводить наблюдения, таких как большее количество ясного времени, меньший средний ветер. “Качество” зимнего наблюдательного времени также выше: лучше изображения и прозрачность атмосферы. Причем особенно велико отличие в длительности периодов самой спокойной атмосферы, оптимальных для функционирования АО. Кроме того, можно сделать вывод, что результаты, представленные в докладе В.Г.Корнилова 14 февраля 2008 года на ученом совете ГАИШ, характеризуют зимний сезон и, соответственно, лучше средних.

Другие обсерватории также сообщают о сезонных вариациях астроклимата, особенно сильно варьируется количество ясного времени [18]. Однако в нашем случае нельзя делать выводы о сезонных циклических изменениях астроклимата, т.к. измерения покрывают всего один период — год. Данные результаты являются лишь намеком на такую цикличность и могут быть выбросом, если 2008 год был аномальным в смысле погоды.

Как уже говорилось, данные результаты являются промежуточными, для получения более надежных результатов требуется, в первую очередь накопить больше статистики — хотя бы за 2-2.5 года. После этого можно будет провести гораздо более полный анализ атмосферной турбулентности над г.Шатжатмаз, оценки точности астрометрических, фотометрических наблюдений, моделирование АО-систем, оценка её возможностей.

Также в данный момент проводятся работы по модернизации алгоритма MASS, новый алгоритм восстановления профиля будет более устойчив, что позволит уточнить результаты, представленные здесь. Планируется установка нового измерительного оборудования на ASM: камера всего неба для более надежных данных по облачности и радиометр для оценки количества воды на луче зрения.

## Список литературы

- [1] Kornilov V., Potanin S., Shatsky N., Voziakova O., Zaitsev A., Multi-Aperture Scintillation Sensor. Final Design Document
- [2] Tokovinin A., Kornilov V., Shatsky N., Voziakova O. Restoration of turbulence profile from scintillation indices. MNRAS, 2003, V. 343, p. 891-899
- [3] Tokovinin A. From differential image motion to seeing. PASP, 2002, V. 114, p. 1156-1166.
- [4] Tokovinin A., Kornilov V. Accurate seeing measurements with MASS and DIMM. 2007, MNRAS, V. 381, pp. 1179-1189, Astro-Ph: ArXiv:07080.0195
- [5] Kornilov V., Tokovinin A., Voziakova O., Zaitsev A., Shatsky N., Potanin S., Sarazin M. MASS: a monitor of the vertical turbulence distribution. Proc. SPIE, V. 4839, p. 837-845, 2003
- [6] Sarazin M. Roddier F., The E.S.O Differential Image Motion Monitor, Astron. Astrophys., 227, p.294, 1990
- [7] Kornilov V., Tokovinin A., Shatsky N., Voziakova O., Potanin S., Safonov B., Combined MASS-DIMM instrument for atmospheric turbulence studies, MNRAS, V.382, Issue 3, p.1268, 2007
- [8] Rigaut F., Vernet E., Ragazzoni R., Hubin, N., Esposito, S., Garching: ESO Conf. and Workshop Proc. **58**, 2002), p.11.
- [9] Tokovinin A.A. A new method to measure atmospheric seeing. Pis'ma v AZh., 1998, V. 24, P. 768-771 (AstL 662-664)
- [10] Токовинин А.А. Звездные интерферометры. — М.: Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1988 — 160 с.
- [11] A.Tokovinin. Design of ground-layer turbulence compensation with a Rayleigh beacon.
- [12] Rajagopal J., Tokovinin A., Bustos E., Sebag J. LuSci, a lunar scintillometer to study ground layer turbulence. 2008, Proc. SPIE, V. 7013, paper 60
- [13] A.Tokovinin and T.Travullon, Model of optical turbulence profile at Cerro Pachon, MNRAS 000,1-8 (2005)
- [14] A.Tokovinin, J.Vernin, A.Ziad, M.Chun. Optical turbulence profile at Mauna Kea measured by MASS & Scidar
- [15] Vernin J., Munoz-Tunon C and Sarazin M. E-ELT Site Characterization Status. Proc. SPIE <http://www.vt-2004.org/sci/libraries/SPIE2008/7012-64.pdf>
- [16] Thomas-Osip E. Joanna et al. Giant Magellan Telescope Site Evaluation and Characterization at Las Campanas Observatory
- [17] Kornilov et al. Измерения оптической турбулентности в свободной атмосфере над горой Майданак. 2009

- [18] Ehgamberdiev S. A., Baijumanov A. K., Ilyasov S. P., et al., *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 145, 293 (2000)
- [19] A.Tokovinin, S.Baumont, J.Vasquez. Statistics of turbulence profile at Cerro Tololo
- [20] S.L.Kenyon et al. Atmospheric Scintillation at Dome C, Antarctica: implications for photometry and astrometry. arXiv:astro-ph/0604538v1 2006
- [21] Marc Sarazin, Jorge Melnick et al. Seeing is Believing: New Facts about the Evolution of Seeing on Paranal
- [22] M.Sarazin, *Astroclimatology of Paranal* (European Southern Observatory, 1999); <http://www.eso.org/gen-fac/pubs/astclim/paranal/seeing/>
- [23] <http://www.meade.com/lx400-acf/index.html>
- [24] M.Sarazin, A.Tokovinin The Statistics of Isoplanatic Angle and Adaptive Optics Time Constant derived from DIMM data. Venice 2001, Beyond Conventional Adaptive Optics
- [25] Hardy, J.W. 1998, *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes* (New York: Oxford Univ. Press)
- [26] Fried D.L., Anisoplanatism in adaptive optics, *J. Opt. Soc. Amer. A.*, 72, pp. 52-61, 1982.
- [27] Roddier F., The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy, in *Progress in Optics*, E. Wolf ed., Vol. XIX, pp. 281-376, 1981.
- [28] Roddier F., Gilli J.M., Lund G., On the origin of speckle boiling and its effect in stellar speckle interferometry, *J. of Optics*, 13, 5, 1982.
- [29] Lipunov et al. Optical observations of gamma-ray bursts, the discovery of supernovae 2005bv, 2005ee, and 2006ak, and searches for transients using the "MASTER" robotic telescope. *Astronomy Reports*, Volume 51, Issue 12, pp.1004-1025
- [30] K.Krisciunas, W.Sinton, D.Tholen, A.Tokunaga, W.Golisch, D.Griep, C.Kaminski, C.Impey, C.Christian. *Atmospheric Extinction and Night-Sky Brightness at Mauna Kea*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1987
- [31] Hwankyung Sung , Michael. S. Bessell, *PASA*, 17 (3), 244.
- [32] D.L.King Atmospheric Extinction at the Roque de los Muchachos Observatory, La Palma, RGO/La Palma Technical note no 31

## А Корреляция данных

Допустим, у нас есть два датчика, один измеряет величину  $X$  в моменты времени  $t_{1i}$ , а другой —  $Y$  в моменты  $t_{2i}$ . Построить распределение величины  $X$  и найти её среднее, медиану и т.д. не составляет труда. То же верно и для  $Y$ . Но раз мы измеряли две величины на одном промежутке времени, то еще интересно было бы выяснить, как они коррелируют между собой. Если бы моменты измерения величин совпадали  $\forall i : t_{1i} = t_{2i}$ , то их было бы легко сопоставить друг другу и получить набор уже “двумерных” измерений  $(X, Y)_i$ . Но нас интересует общий случай, когда моменты измерения произвольны, тогда необходимо сначала произвести интерполяцию измерений величины  $Y$  на моменты  $t_{1i}$ . После этого мы сможем сопоставить точки, “измеренные” одновременно и получить необходимый для дальнейшего анализа набор  $(X, Y)_i$ .

Отметим, что интерполяция, безусловно, приведет к увеличению погрешности определения  $Y$ . Кроме того, вполне возможна ситуация, при которой в данных  $X$  будет пробел  $(t_1, t_2)$ , отсутствующий в данных  $Y$ . Данные  $Y$  за этот период в интерполяции использоваться не будут (или мало повлияют на её результат). То же верно и для противоположного случая, когда в данных  $Y$  будет пробел. Мы не имеем права использовать точки интерполированные на моменты, лежащие в этом пробеле, т.к. они не соответствуют реальности и искажают статистику. Поэтому данные  $X$  за этот период придется выкинуть. Вследствие этих причин нельзя рассматривать набор  $(X, Y)_i$ , как полностью заменяющий наборы  $X(t_{1i})$  и  $Y(t_{2i})$ , т.к. в случае “рыхлых” данных при его построении теряется много информации. По этим причинам мы использовали интерполяцию только когда это было необходимо.

Методика наблюдений на приборе MASS/DIMM такова, что моменты измерения параметров турбулентности совпадают с точностью лучше 1 секунды (при расстоянии между точками 1 минута), поэтому соотнесение моментов MASS и DIMM не составляет труда. Однако, при наблюдениях нередки случаи, когда точка DIMM присутствует, а MASS — нет, или наоборот. Если, например, дует сильный ветер и звезда болтается, то из апертуры MASS она выпадает чаще, чем из апертуры MASS. С другой стороны с одним из приборов может быть техническая проблема, например, может быть ошибка чтения с ПЗС-матрицы DIMM, тогда в течении ночи или нескольких, в зависимости от сложности проблемы, данные со сломанного прибора не поступают. Для расчета приземного слоя нам, естественно, нужны данные MASS и DIMM одновременно, поэтому точек приземного слоя оказалось несколько меньше: 25049, чем измерений MASS и DIMM по отдельности, при этом было одиночных наблюдений DIMM было отброшено 6574, MASS — 3539, это не слишком много.

В случае метеоданных интерполяция необходима, т.к. моменты их измерения не совпадают с моментами MASS/DIMM. Для интерполяции метеоданных на точки MASS/DIMM мы использовали стандартный алгоритм библиотеки GSL акима-сплайн. Успешность интерполяции во многом определяется степенью зашумленности данных, другими словами, необходимо чтобы время корреляции интерполируемых данных было много больше периода дискретизации. Для сравнительно медленно меняющихся метеоданных это условие выполняется с большим запасом.