

Изучение астроклимата региона юга Сибири и Средней Азии

В.П. Лукин^{1,2}, С.П. Ильясов³, В.В. Носов¹, С.Л. Одинцов¹, Ю.А. Тиллаев^{3*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, Россия

²Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Россия

³Институт астрономии им. Улугбека АН Узбекистана
100052, г. Ташкент, ул. Астрономическая, 33, Узбекистан

Поступила в редакцию 22.06.2009 г.

Описываются исследования, проводимые в Институте оптики атмосферы СО РАН и кооперации по измерению параметров атмосферы, определяющих качество формируемых оптических изображений. Определено само понятие астроклимата атмосферы. Описаны разработки новой специальной аппаратуры для проведения измерений астроклимата и результаты измерений, выполненных в регионе юга Сибири и Средней Азии. В частности, представлен обзор астроклиматических исследований на Майданакской обсерватории (Узбекистан) и проводится сравнение астроклиматов региона и ведущих обсерваторий мира.

Ключевые слова: турбулентность, астроклимат, внешний масштаб, структурный параметр показателя преломления, когерентная структура; turbulence, astroclimate, outer scale, structural parameter of turbulent atmosphere, coherent structure.

Введение

Несмотря на успешное развитие внеатмосферных астрономических наблюдений, в настоящее время основной поток наблюдательных данных обеспечивается наземными наблюдениями. В этой связи остаются актуальными исследования атмосферы, ограничивающей качество формируемых оптических изображений. Исследования показывают, что теория поглощения, рефракции и рассеяния света в земной атмосфере в общем согласуется с результатами наблюдений, однако в действительности состояние атмосферы в момент наблюдения в некотором пункте отличается от некоторого среднего состояния, положенного в основу теорий. Раздел наблюдательной астрофизики, изучающий влияние атмосферы на эффективность астрономических наблюдений, и представляет собой астроклиматические исследования.

Можно выделить основные параметры, описывающие состояние атмосферы и ее пригодность для астрономических наблюдений, которые достаточно полно характеризуют состояние атмосферы: количество «ясного» времени в пункте наблюдения, метеорологические факторы, прозрачность атмосферы, интенсивность свечения атмосферы, качество астрономических изображений, а также специфиче-

ские параметры (внешний масштаб турбулентности, угол изопланатизма атмосферы и др.), важные для адаптивных телескопов и интерферометров нового поколения [1–4].

Цель наших исследований заключается в изучении астроклимата атмосферы для развития новых астрономических систем, использующих адаптивную оптику. Известно, что с помощью крупных астрономических приборов можно получить изображение достаточно слабого по интенсивности исследуемого объекта с высоким угловым разрешением. Однако по мере увеличения апертуры оптической системы начинает увеличиваться турбулентное размытие изображения, растут аберрации оптической системы, ветровые искажения и другие инструментальные ошибки. Реально из-за влияния земной атмосферы традиционные астрономические телескопы обеспечивают пространственное разрешение не лучше 1 угл. с.

В последние годы наиболее радикальным методом устранения возмущающего влияния атмосферы является применение систем адаптивной оптики. В связи с этим проводятся глубокие научные исследования по применению систем адаптивной оптики в астрономических телескопах. Мировое оптическое сообщество перешло от развития теории к конкретному воплощению в практику таких систем для звездных и солнечных астрономических телескопов наземного базирования. Для российских астрономов также является важным сформулировать задачи применения адаптивной оптики для звездных и солнечных астрономических телескопов.

* Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Сабит Пулатович Ильясов (sabit@astrin.uzsci.net); Виктор Викторович Носов (nosov@iao.ru); Сергей Леонидович Одинцов (odintsov@iao.ru); Ю.А. Тиллаев (sabit@astrin.uzsci.net).

Первые работы по астроклимату

В период 1978–1985 гг. в Институте оптики атмосферы СО РАН был создан первый автоматизированный комплекс для оптических измерений турбулентности [5]. С его помощью в различных регионах СССР (г. Томск, горы Северного Кавказа, г. Цимлянск, Казахстан, Саратовская область) были выполнены исследования астроклимата атмосферы. В частности, был изучен ночной астроклимат такого важного региона, как обсерватория ГАО вблизи 6-метрового астрономического телескопа БТА. Была установлена принципиальная важность учета конечности внешнего масштаба турбулентности [3, 6–8].

Позднее, в результате обобщений данных дневных и ночных наблюдений в г. Томске, а также моделей атмосферной турбулентности для различных регионов мира был введен [9–11] эффективный внешний масштаб турбулентности для атмосферы в целом при работе на вертикальных атмосферных трассах. Как оказалось, для большинства известных обсерваторий мира значение эффективного внешнего масштаба атмосферы лежит в диапазоне от 25 до 40 м (при наблюдении в зенит и для длины волны излучения 0,55 мкм). В настоящее время этот параметр используется при анализе эффективности адаптивных астрономических телескопов и интерферометров наземного базирования [8, 10]. Эти результаты и выводы из них признаны всем мировым оптическим сообществом и нашли широкое применение при проектировании адаптивных телескопов с предельно большими апертурами и большебазовых интерферометров оптического диапазона [12]. Первый многофункциональный комплекс аппаратуры [13] для рутинного контроля метеорологической ситуации в ИОА СО РАН был создан еще в 1984 г. и успешно использовался на полигонах в г. Томске, а также в экспедиции в Болгарии.

Дневной астроклимат Сибири

С помощью новых оптико-электронных систем для измерения параметров атмосферы начиная с конца 90-х гг. XX в. в ИОА СО РАН были возрождены исследования региона Сибири в целях использования его для развития обсерваторий и полигонов как наблюдательных постов. Это позволило получить данные по турбулентности в горных районах. В результате был предложен новый подход описания турбулентности в условиях неоднородной подстилающей поверхности (горный регион) [14, 15].

В связи с развитием систем адаптивной оптики для солнечных телескопов ИСЗФ СО РАН были развернуты исследования особенностей дневного астроклимата. Начиная с 2003 г. коллектив авторов работает по программам СО РАН, с 2009 г. уже в рамках реализуемого совместно с организациями национальных академий наук стран СНГ проекта «Развитие методов высокоточных астроклиматических наблюдений для обеспечения работы адаптивных систем». Поставлена также задача изучения

влияния солнечной активности на изменение режима турбулентности.

За период 1998–2008 гг. были выполнены циклы наблюдений по дневному астроклимату региона юга Сибири (район оз. Байкал, обсерватория Монды, Хакасия, Алтай – район Большого Колыванского озера). Одной из наиболее новых областей исследования стало изучение особенностей структуры пограничного (и приземного) слоев атмосферы. В результате на основе данных многолетних измерений была разработана теория турбулентности для анизотропного пограничного слоя [16]. Теоретически и экспериментально установлено, что в произвольном анизотропном слое теория подобия Монина–Обухова выполняется в окрестности каждой точки слоя. Горная турбулентность является локально слабоанизотропным слоем. Показано, что основной параметр термодинамической устойчивости в таком слое – число Монина–Обухова. Для измерений в горном анизотропном пограничном слое требование постоянства региональной метеоситуации не является принципиальным. В таком пограничном слое все характеристики турбулентности становятся функциями от числа Монина–Обухова. На рис. 1 приведены экспериментальные результаты для масштабов температуры T_* и скорости V_* для всех сеансов наблюдений в зависимости от числа Монина–Обухова.

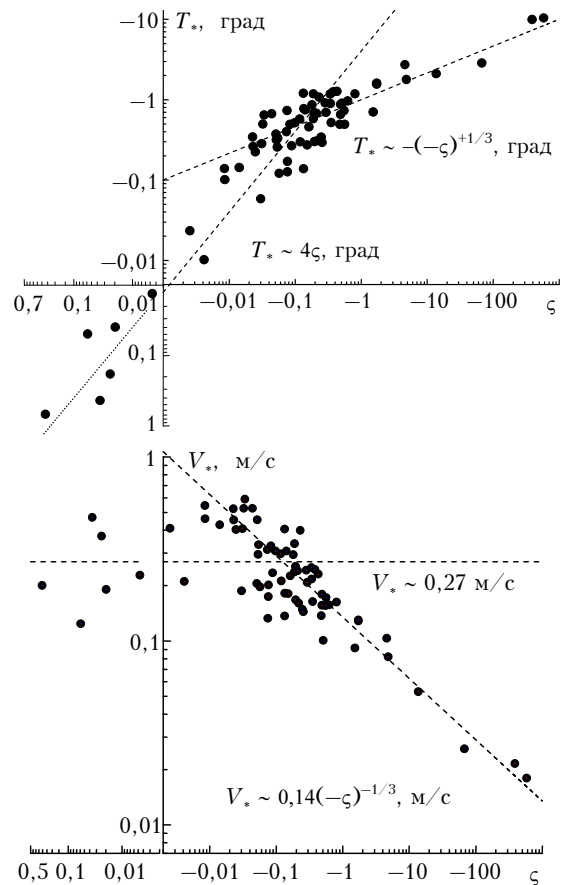


Рис. 1. Турбулентные масштабы температурного поля T_* и поля скорости V_* в горном пограничном слое в зависимости от величины числа Монина–Обухова ζ

В каждом сеансе региональная метеоситуация описывается своим набором чисел Монина–Обухова, изменяющихся во всем зарегистрированном диапазоне $-581 \leq \zeta \leq 0,3$. Объединение всех сеансов наблюдений в один не приводит к значительному разбросу данных. Все данные устойчиво группируются возле определенных сглаженных зависимостей.

Некоторый разброс точек, наблюдающийся в области устойчивой стратификации ($\zeta > +0,05$), постоянно появляется в большинстве измерений различных турбулентных характеристик в атмосфере (в работах разных авторов). А.С. Монин и А.М. Яглом [17] объясняют это перемежаемостью турбулентности в условиях устойчивости и, следовательно, недостаточностью обычного времени усреднения. Таким образом, из измерений [14–16] следует, что в горном пограничном слое экспериментальные результаты, как функции от универсального параметра — числа Монина–Обухова, можно объединять независимо от типа региональной метеоситуации.

Фактически удалось показать, что в значительном интервале изменения чисел Монина–Обухова ($-0,01 < \zeta < -1$) в горном пограничном слое реализуется режим изотропного слоя.

Представляется интересным вопрос, можно ли произвольный пограничный слой заменить на некоторый эффективный изотропный пограничный слой. Это дало бы возможность использовать для описания анизотропного слоя простые полуэмпирические соотношения, справедливые в изотропном слое.

Было также проведено сравнение турбулентных масштабов температуры и скорости анизотропного пограничного слоя T_* , V_* с эффективными масштабами для изотропного слоя T_{*eff} , V_{*eff} . Оказалось, что эффективные турбулентные масштабы температуры и скорости T_{*eff} , V_{*eff} близки к постоянным величинам в широком диапазоне изменения чисел Монина–Обухова ($-581 < \zeta < 0,3$). Как известно, в изотропном слое эти масштабы должны быть постоянными. На основании наших данных можно сделать вывод, что анизотропный пограничный слой может быть заменен на эффективный изотропный пограничный слой.

Важное значение имеет поведение спектра атмосферной турбулентности в области больших масштабов. При параметризации поведение спектра в этой области контролирует внешний масштаб турбулентности L_0 , который, как известно, может быть определен различными способами. Например, В.И. Татарский [18] определяет вертикальный внешний масштаб L_0^T из условия равенства среднего квадрата разности случайных значений температуры в двух точках ее систематической разности. Можно определить внешний масштаб по отклонению структурной функции флуктуаций температуры от 2/3-зависимости. В пространстве Фурье преобразований этот масштаб будет соответствовать масштабу, определенному по отклонениям одномерного пространственного или временного частотного спектров от 5/3-зависимости. Имеются также

масштабы, которые являются параметрами в различных теоретических моделях энергетического интервала трехмерного спектра флуктуаций (например, кармановский внешний масштаб L_0^K). Для практики представляется интересным установить связи между этими масштабами, получить теоретические представления для них, пригодные в анизотропном пограничном слое, и сравнить результаты теории и эксперимента.

На рис. 2 приведены результаты сравнения экспериментальных и теоретических результатов для внешнего масштаба Татарского L_0^T в горном пограничном слое. При использовании экспериментальных значений кармановского масштаба L_0^K , полученных из спектров, применялся коэффициент пересчета кармановского масштаба в масштаб Татарского L_0^T .

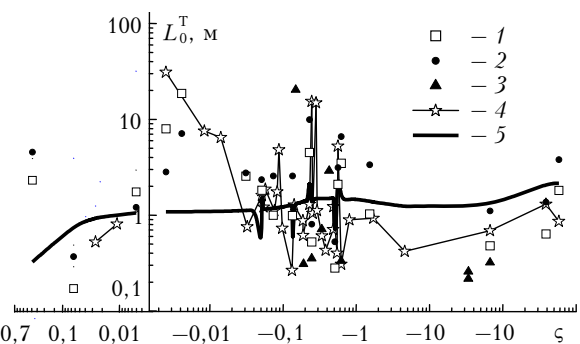


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и теоретических результатов для внешнего масштаба турбулентности L_0^T в горном анизотропном пограничном слое: 1 — эксперимент (из спектров по 5/3-зависимости); 2 — эксперимент (из спектров по насыщению); 3 — эксперимент (по определению Татарского); 4 — полуэмпирическая теория для анизотропного слоя; 5 — полуэмпирическая теория для изотропного слоя

Этот коэффициент пригоден для любого пограничного слоя. Сравнение измеренных тремя разными методами масштабов L_0^T («по определению Татарского», «из спектров по насыщению» и «из спектров по 5/3-зависимости») показывает, что в анизотропном пограничном слое имеет место удовлетворительное согласие эксперимента и полуэмпирической теории (рис. 2).

Измерения постоянных Колмогорова и Обухова

В результате экспедиционных работ 1998–2008 гг., проведенных в горных и равнинных условиях, авторами настоящей работы накоплена обширная экспериментальная база данных приземных измерений параметров турбулентности в различных географических районах и метеоситуациях. Для измерений использовалась мобильная ультразвуковая метеосистема. Данные измерений обнаруживают существование в атмосфере когерентных структур [17, 19]. Когерентная турбулентность, наблюдающаяся в таких структурах, отличается от колмогоровской турбулентности.

В этой связи возникает необходимость в уточнении границ применимости закона Колмогорова–Обухова, в частности в уточнении значения постоянной Обухова C_θ . В соответствии с законом Колмогорова–Обухова структурная функция флуктуаций скорости в инерционном интервале масштабов r выражается [17, 18] через структурную характеристику C_v^2 флуктуаций скорости $D_v(r) = C_v^2 r^{2/3}$. Структурная функция флуктуаций температуры выражается через структурную характеристику C_T^2 флуктуаций температуры $D_T(r) = C_T^2 r^{2/3}$. В свою очередь C_v^2 , C_T^2 зависят от средней скорости диссипации кинетической энергии ϵ , диссипации температуры N и постоянных Колмогорова C и Обухова C_θ : $C_v^2 = C\epsilon^{2/3}$, $C_T^2 = C\epsilon^{-1/3}N$. Отсюда видно, что при известных ϵ и N флуктуации скорости и температуры определяются постоянными C , C_θ .

Постоянные C , C_θ измерялись в различных средах разными методами. В качестве наиболее вероятных оценок обычно считают $C = 1,9$, $C_\theta = 3,0$. Эти оценки являются средними по данным разных авторов. Отклонение от среднего достаточно велико, для C наблюдались значения 0,9; 1,6; 2,8, для C_θ – 1,1; 1,4; 2,5; 2,7; 3,3; 3,5; 5,6; 5,8; 6,5; 9,0.

В наших измерениях для случая реализации в атмосфере колмогоровской турбулентности, при достаточно широком инерционном интервале (на графике показаны вертикальными линиями инерционный интервал, пунктиром – значения постоянных C , C_θ), результаты приведены на рис. 3.

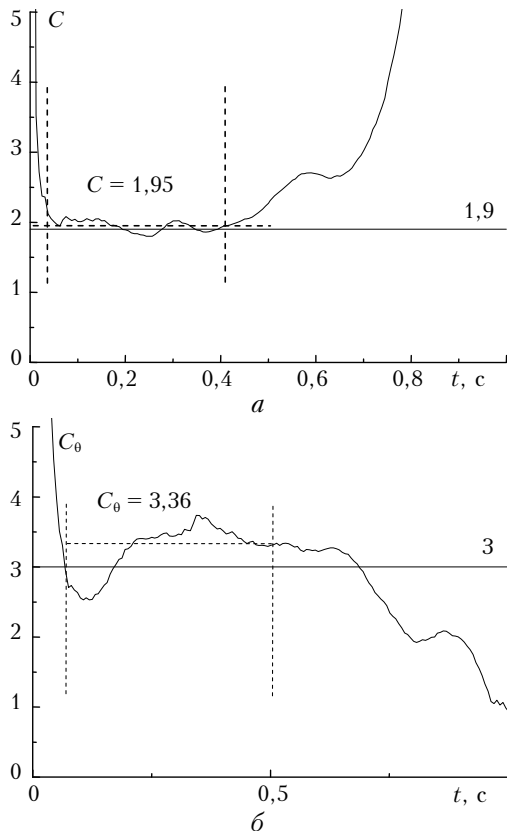


Рис. 3. Постоянная Колмогорова C (а) и Обухова C_θ (б)

Измерения производились 05.07.07 в горах Саяны на высоте 680 м над уровнем моря, применялась специализированная мачта УНЖА-4, высота измерений $h = 14$ м.

Следует заметить, что данные измерений в ряде случаев обнаруживают существование в турбулентной атмосфере детерминированных образований, или когерентных структур. Структурные функции температуры D_T и продольной разности скоростей ветра D_{vw} для когерентной неколмогоровской турбулентности уже в конце инерционного интервала (при приближении к внешнему масштабу L_0) и далее имеют выраженные осцилляции, что означает присутствие некоррелированных между собой вихрей с различными масштабами.

На рис. 4 приведены результаты для типичной когерентной турбулентности. При этом в результате анализа данных более 30 точек наблюдения установлено следующее.

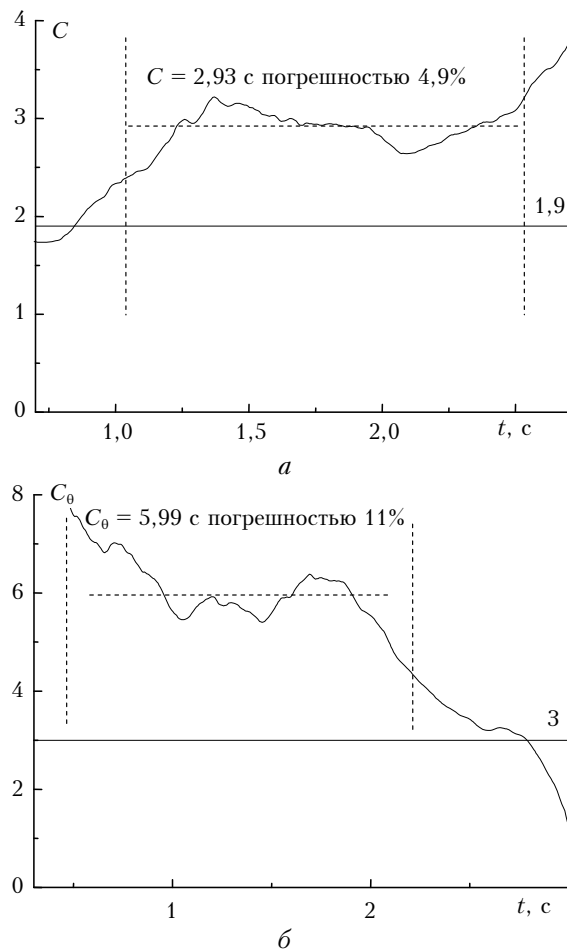


Рис. 4. Постоянная Колмогорова C (а) и C_θ (б) в условиях формирования в атмосфере когерентной структуры

Если турбулентность близка к колмогоровской (ровная подстилающая поверхность, временные спектры в инерционном интервале $W_T(f) \approx f^{-5/3}$), то значение постоянной Обухова можно считать равным 3,0 с относительной погрешностью, не превышающей 30%. Если же турбулентность отклоня-

ется от колмогоровской ($W_T(f) \approx f^{-8/3}$, увеличены внутренние масштабы и др. [19–21]), то наблюдаются значения C_0 в интервале 1,3–5,1. В этом случае погрешность определения значения C_0 может достигать 70%.

Метеофакторы

Во время наблюдений астрономические инструменты подвергаются влиянию различных метеорологических условий: температуры воздуха, его влажности и силы ветра. Изучение метеорологических условий в астропунктах является ежедневной задачей астроклиматических исследований. Главные параметры, которые должны приниматься в расчет, это: температурный режим в пункте наблюдения (суточный и годовой ход, амплитуды колебаний, абсолютные значения минимумов и максимумов), относительная влажность воздуха, частота туманов, средние значения силы ветра, суточный и сезонный ход, максимальные и минимальные значения, роза ветров, изучение ветра на различных высотах в атмосфере.

Мы считаем, что акустический локатор (сонар) может быть тем прибором, который дает оперативную информацию о метеополях около астрономического инструмента. Кроме того, он может стать также еще одним из возможных инструментов изучения $C_n^2(h, t)$, а методы дистанционного акустического зондирования позволяют восстанавливать эту характеристику с достаточно высокой степенью разрешения как по высоте, так и по времени. Существующие в настоящее время сонары обеспечивают потенциальную возможность непрерывного контроля нижнего слоя тропосферы до высот 1–2 км. Принцип работы сонаров заключается в регистрации рассеянных случайными температурными неоднородностями звуковых сигналов. Разрешающая способность сонаров по пространству определяется, во-первых, длительностью зондирующих импульсов и, во-вторых, шириной основного лепестка диаграммы направленности антенны. Сонары обеспечивают разрешение по высоте от единиц до десятков метров, а в горизонтальной плоскости – от десятков до сотен квадратных метров. Периодичность получения одного «мгновенного» профиля $C_T^2(h, t)$ зависит от высоты, до которой требуется его контролировать.

В ИОА СО РАН разработка и эксплуатация сонаров ведутся на протяжении многих лет. Созданы методики определения вертикальных профилей структурной функции температуры [22–24]. В качестве примера на рис. 5 представлены сглаженные контурные карты и примеры профилей высотновременного распределения $C_T^2(h, t)$, полученные в различных географических районах. Контролировался диапазон высот от 70 до 650 м.

Используя эти значения и профили средней температуры и давления, можно получить высотновременные закономерности распределения структурного параметра показателя преломления атмо-

сферы $C_n^2(h, t)$, что особенно важно для диагностики астроклимата в тех или иных районах размещения оптических средств. Наряду с диагностикой структуры турбулентных температурных пульсаций в нижнем слое тропосферы сонары способны измерять высотные профили вектора ветра в тех областях, где есть температурные пульсации. Более подробно эти возможности описаны в работе [25].

Исследование качества ночного изображения на Майданаке

Участие сотрудников Института астрономии в кооперации (ИОА СО РАН–ИСЗФ СО РАН–ИА Национальной академии Узбекистана) связано с развитием новых астрометрических приборов для получения данных, а также с проведением рутинных наблюдений астроклимата в уникальном месте – в обсерватории Майданак [26, 27] Астрономического института им. Улугбека АН Узбекистана (г. Ташкент). Институт астрономии Узбекистана уже давно вовлечен в мировую программу наблюдений астроклимата. Сопоставление синхронных измерений уровня турбулентности в различных местах региона позволит получить возможность с общих позиций исследовать уровень изменчивости дневной турбулентности и связать это с погодными и климатическими изменениями, а также с изменением солнечной активности. Учитывая глобальные климатические изменения на планете, которые прежде всего отражаются на обсерваториях, которые находятся вблизи океанов (Гавайи, Канарские острова, Чили), состояние астроклимата на Майданаке (континентальные условия) отражает в большей степени проявление стабильности атмосферы в целом.

В 1996 г. на горе Майданак был начат мониторинг основного параметра астроклимата – качества изображения. Качество изображения традиционно характеризуется параметром ϵ_{FWHM} – полушириной углового размера изображения звезды в фокальной плоскости телескопа. Измерения этого параметра обычно проводятся с помощью измерителя дифференциальных дрожаний изображений звезд (ДДИЗ). Оптическая схема и принцип работы прибора описаны в работах [28, 29]. Этот инструмент был разработан в Европейской Южной обсерватории для измерений качества изображения в обсерваториях. Медианное и среднее значения качества изображения за весь период наблюдений составили 0,71 и 0,77" соответственно. В таблице приводятся среднемесячные медианные значения ϵ_{FWHM} по всему периоду наблюдений.

Как видно из таблицы, длительный ряд ночных наблюдений с хорошим качеством изображения получен на горе Майданак с июня по октябрь. В этот период наблюдается в среднем около 80% максимально возможного ясного ночного наблюдательного времени. Самое лучшее качество изображения на Майданаке наблюдается в период октябрь–ноябрь. Значения $\epsilon_{FWHM} \leq 1''$ наблюдались в 82% случаев. Из этих же данных можно получить информацию

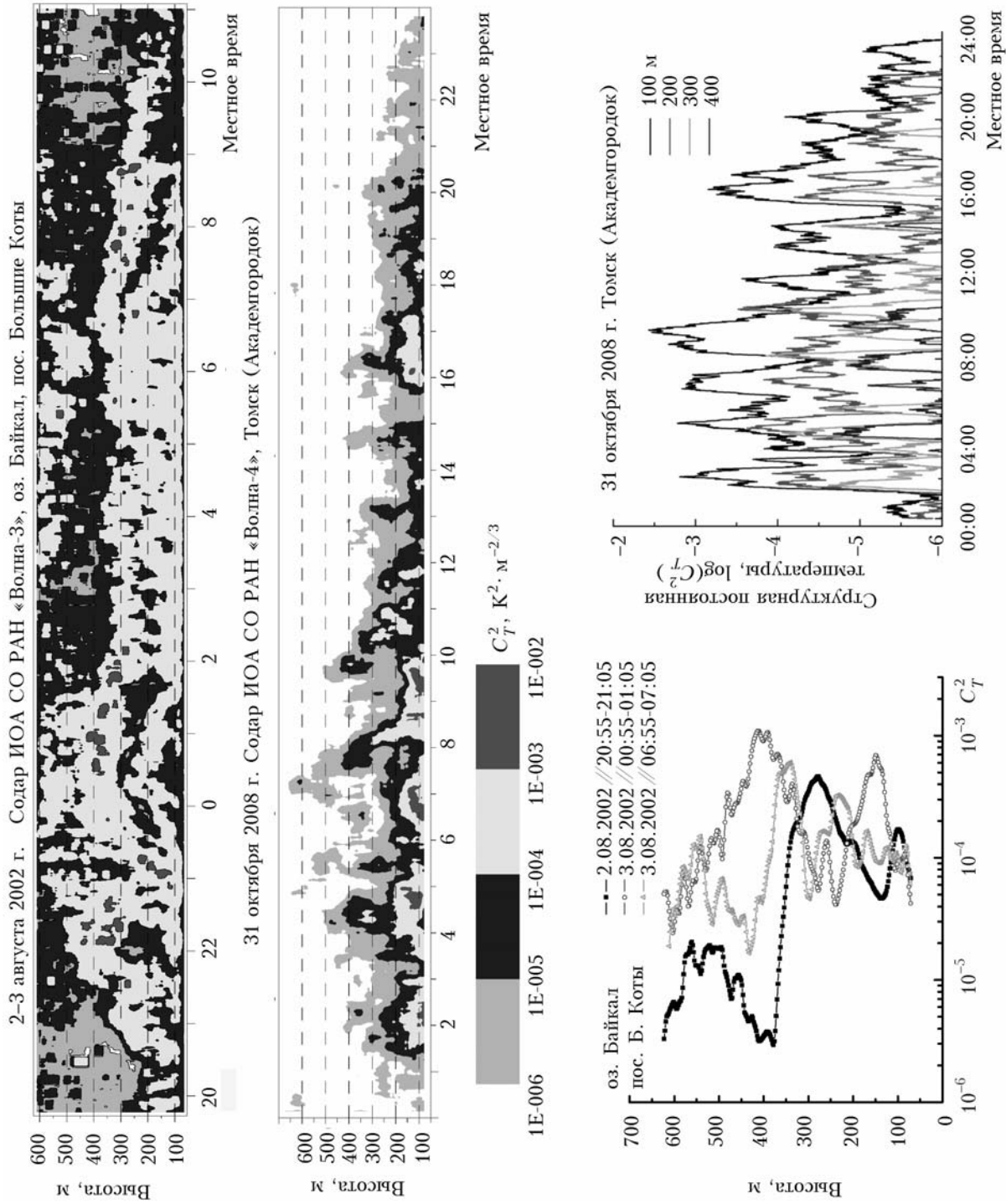


Рис. 5. Примеры карт, высотных и временных профилей структурной характеристики температуры $C_T^2, K^2 \cdot m^{-2/3}$

о сезонных вариациях медианного качества изображения, при этом ежемесячные медианные значения вычислялись усреднением значений различных годов [30].

Сезонная статистика медианного значения качества изображения в обсерватории Майданак в период с августа 1996 по октябрь 2002 г.

Месяц	Количество ночей	Количество данных	ϵ_{FWHM} , угл. с
Январь	68	6069	0,79
Февраль	66	7052	0,77
Март	41	3679	0,71
Апрель	49	3986	0,78
Май	82	7160	0,70
Июнь	93	7522	0,71
Июль	139	10948	0,73
Август	148	14149	0,72
Сентябрь	168	19807	0,69
Октябрь	135	15576	0,68
Ноябрь	75	8061	0,65
Декабрь	70	6704	0,71
Всего	1,134	11,0713	Среднее значение 0,71

На рис. 6 представлены кумулятивные распределения качества изображения, полученные в период 1989–1995 гг. на обсерваториях Паранал и Ла Силла в Чили, обсерватории Рок де Лос Мучачос на Канарах (ОРМ) в 1994–1998 гг. и на Майданаке.

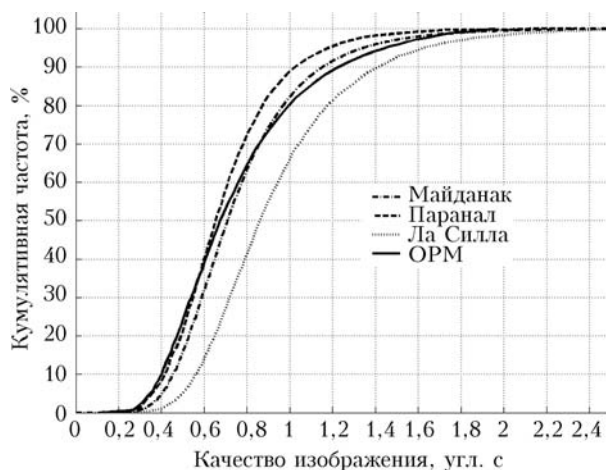


Рис. 6. Кумулятивное распределение качества изображения на Майданаке, в обсерваториях Паранал, Ла Силла и ОРМ

Медианные значения ϵ_{FWHM} на обсерваториях Паранал, ОРМ и Майданак близки и составляют 0,66", 0,69" и 0,71" соответственно, а на обсерватории Ла Силла качество изображения хуже и медианное значение составляет 0,87". Это позволяет сделать вывод о том, что качество атмосферы над Майданаком сравнимо по условиям с качеством атмосферы на лучших обсерваториях мира [29].

Исследование дополнительных параметров атмосферы

С целью мониторинга дополнительных параметров, таких как внешний масштаб волнового фронта L_0 , время когерентности τ_0 и угол изопланатизма θ_0 , которые особенно важны для адаптивной оптики и интерферометрии, в 1998 г. были организованы специальные исследования. Все эти параметры были измерены с помощью универсального монитора качества изображения (английская аббревиатура — GSM), разработанного в Университете г. Ниццы совместно с ГАИШ МГУ [30]. Прибор GSM впервые был использован в 1997 г. во время астроклиматической кампании на Ла Силле в Чили [31], затем в местечке Gemini на Сьеро Пачоне [32] и на VLT на Паранале [33].

Прибор GSM состоит из четырех идентичных модулей для измерений флуктуаций угла прихода оптической волны от звезды. Каждый модуль имеет 10-см макутовый телескоп и систему регистрации для измерения положений изображения звезды с использованием решетки в фокальной плоскости с быстрой модуляцией (200 Гц). Обработка заключалась в вычислении дисперсии флуктуаций угла прихода оптической волны для каждого модуля и их взаимной корреляции, в результате после соответствующей нормировки получали значение внешнего масштаба волнового фронта L_0 . Были найдены шесть значений L_0 , соответствующих шести базам GSM (четыре пространственно-разнесенных модуля формируют шесть различных измерительных баз), и их медианное значение принималось как конечный результат. Внешний масштаб L_0 , полученный от GSM, является параметром внешнего масштаба в модели Кармана. Его соотношение с внешним масштабом для некоторых других моделей описано в [43, 34]. Надо заметить, что данный прибор измеряет практически эффективный внешний масштаб для атмосферы [10, 11].

Угол изопланатизма θ_0 вычислялся из данных индекса мерцания. Поскольку временное разрешение прибора для измерений мерцаний звезд составляло 5 мс, что недостаточно для убедительных измерений мерцания, при проведении измерений осуществлялась коррекция сигналов, обусловленная влиянием усреднения прибора.

В результате по Майданаку имеем: среднее и медианное значения измеренного (эффективного) внешнего масштаба L_0 составили 31,5 и 25,9 м, что оказывается сравнимым со значениями, получаемыми для других обсерваторий. Следует отметить, что значения угла изопланатизма, рассчитанные в [42], также удовлетворительно совпадают с результатами измерений на Майданаке. Среднее значение угла изопланатизма θ_0 составило 2,48". Время когерентности волнового фронта τ_0 , оцененное из GSM-измерений, оказалось порядка 12 мс, что намного больше, чем в Чилийских обсерваториях [31–33]. Все атмосферные параметры всегда пересчитывались для направления в зенит и длины волн 0,5 мкм.

Отметим, что данные измерений астроклимата, проводимых на горе Майданак (2003–2007), регулярно использовались сотрудниками ИОА СО РАН для сопоставления со своими наблюдениями. Безусловно, влияние атмосферной турбулентности является определяющим [35–39] при оценке качества изображения, формируемого в обычных телескопах, а также при оценке параметров адаптивной оптической системы или ее составляющих, таких как активное зеркало, датчик волнового фронта [40] или лазерная опорная звезда [35].

Заметим также, что естественным развитием исследований по созданию новой техники оптических измерений стала новая разработка ИОА СО РАН – дифференциальный измеритель уровня турбулентности и скорости ветра [41]. Данный прибор позволяет определять уровень турбулентности на атмосферных трассах и оценивать пригодность атмосферной трассы для проведения оптических наблюдений.

Авторы выражают признательность сотрудникам ИСЗФ СО РАН и ИОА СО РАН за помощь при проведении измерений в обсерваториях и на полигонах региона.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта СО РАН 2009–2011 гг. «Развитие методов высокоточных астроклиматических наблюдений для обеспечения работы адаптивных систем» и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 16 «Окружающая среда в условиях изменяющегося климата: экстремальные природные явления и катастрофы», проект «Развитие адаптивных систем и измерителей параметров атмосферной турбулентности для улучшения солнечных астрономических наблюдений».

1. Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 277 с.
2. Миронов В.Л., Покасов В.В., Лукин В.П. Когерентность лазерного излучения в атмосфере. Новосибирск: Наука, 1985. 175 с.
3. Lukin V.P., Pokasov V.V. Optical wave phase fluctuations // Appl. Opt. 1981. V. 20. N 1. P. 121–135.
4. Балин Ю.С., Банах В.А., Копытин Ю.Д., Кречков Г.М., Миронов В.Л., Лукин В.П., Орлов В.М., Самохвалов И.В. Сигналы и помехи в лазерной локации. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
5. Губкин С.М., Емалеев О.Н., Лукин В.П., Мутницкий Н.Г., Покасов В.В. Экспериментальные исследования астроклиматических характеристик Приэльбрусья // Астрон. ж. 1983. Т. 60. Вып. 4. С. 789–794.
6. Лукин В.П. Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск: Наука, 1986. 248 с.
7. Lukin V.P. Atmospheric adaptive optics: USA. Belling: SPIE Press, 1996. V. PM-23. 280 p.
8. Лукин В.П., Фортес Б.В. Пространственные фазовые интерферометры наземного базирования и атмосферная турбулентность // Астрон. ж. 1996. Т. 73. № 3. С. 419–425.
9. Лукин В.П., Фортес Б.В. Частичная коррекция турбулентных искажений в телескопе АСТ-10 // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9. № 11. С. 1492–1504.
10. Lukin V.P., Fortes B.V. Ground-based spatial interferometers and atmospheric turbulence // Pure and Appl. Opt. 1996. V. 5. N 1. P. 1–11.
11. Лукин В.П., Фортес Б.В., Носов Е.В. Эффективный внешний масштаб атмосферной турбулентности // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10. № 2. С. 162–171.
12. Lukin V.P., Goncharov A., Owner-Peterson M., Anderson T. The effective outer scale estimation for Euro50 site // Proc. SPIE. 2002. V. 5026. P. 112–118.
13. Антошкин Л.В., Емалеев О.Н., Суконкина В.М., Хацко В.В., Янков А.П. Аппаратура для метеорологических исследований в атмосфере // Приборы и техн. эксперим. 1986. № 3. С. 240–241.
14. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В. Высотные профили интенсивности атмосферной турбулентности. I. Основные теоретические результаты микрометеорологии приземного слоя атмосферы // Изв. вузов. Физ. Деп. Регистр. № 3126-B2000 от 29.11.2000.
15. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В. Высотные профили интенсивности атмосферной турбулентности. II. Основные экспериментальные результаты // Изв. вузов. Физ. Деп. Регистр. № 3125-B2000 от 29.11.2000.
16. Носов В.В., Емалеев О.Н., Лукин В.П., Носов Е.В. Полуклассическая теория анизотропной турбулентности // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 10. С. 845–862.
17. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Т. 1. М.: Наука. 1967. 696 с.; Т. 2. СПб.: Гидрометеиздат, 1996. 742 с.
18. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
19. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Астроклимат специализированных помещений Большого солнечного вакуумного телескопа. Ч. 1 // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20. № 11. С. 1013–1022.
20. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Астроклимат специализированных помещений Большого солнечного вакуумного телескопа. Ч. 2 // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 3. С. 207–217.
21. Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G. Coherent structures in the turbulent atmosphere // Mathematical models of nonlinear phenomena. N.Y.: Nova Sc. Publishers, 2009. P. 120–154.
22. Nevzorova I.V., Odintsov S.L., Fedorov V.A. Some methodical aspects of SODAR measurement of the structure constant of air temperature pulsations // Proc. 10th Int. Symp. Acoust. Rem. Sens. Auckland, New Zeland. 2000. P. 312–315.
23. Gladkikh V. A., Nevzorova I. V., Odintsov S.L. VOLNA-3 sodar measurements of structure characteristic of atmospheric boundary layer // Proc. SPIE. 2000. V. 4341. P. 343–350.
24. Gladkikh V.A., Одинцов С.Л. Калибровка содара «Волна-3» // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 12. С. 1145–1148.
25. Одинцов С.Л. Исследования атмосферного пограничного слоя методами локальной и дистанционной акустической диагностики в ИОА СО РАН // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22. № 10. С. 981–987.
26. Шевченко В.С. Результаты астроклиматических наблюдений на горе Майданак // Астрон. ж. 1973. Т. 50. Вып. 3. С. 632–644.
27. Кардополов В.И., Слудкий В.Е., Хецелиус В.Г., Шевченко В.С. Результаты годичных наблюдений астроклимата на горе Майданак // Астрон. циркуляр. 1971. № 643. № 3. С. 2–4.
28. Sarazin M. and Roddier F. The ESO differential image motion monitor // Astron. Astrophys. 1990. V. 227. N 3. P. 294–300.

29. *Ehgamberdiev Sh., Bayjumanov A., Ilyasov S., Sarazin M., Tillayev Y.A., Tokovinin A., Ziad A.* The astroclimate of Maidanak observatory in Uzbekistan // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 2000. V. 145. N 2. P. 293–304.
30. *Martin F., Tokovinin A., Agabi A., Borgnino J. and Ziad A.* G.S.M.: a Grating Scale Monitor for atmospheric turbulence measurements. I. The instrument and first results of angle of arrival measurements // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1994. V. 108. N 2. P. 173–180.
31. *Martin F., Tokovinin A., Ziad A., Conan R., Borgnino J., Avila R., Agabi A., Sarazin M.* First statistical data on wavefront outer scale at La Silla observatory from the GSM instrument // *Astron. Astrophys.* 1998. V. 336. N 1. P. 49–52.
32. *Vernin J., Agabi A., Avila R., Azouit M., Conan R., Muvrin F., Musciadri E., Sanchez L., Ziad A.* 1998 Gemini site testing campaign Cerro Pachon and Cerro Tololo // Technical report. UMR-6525. University Nice-Sophia-Antipolis. 1999. P. 142.
33. *Martin F., Tokovinin A., Ziad A., Trinquet H., Borgnino J., Agabi A., Sarazin M.* Optical parameters relevant for High Angular Resolution at Paranal from GSM instrument and surface layer contribution // *Astron. Astrophys.* 2000. V. 144. N 1. P. 39–44.
34. *Ziad A., Conan R., Tokovinin A., Martin F., Borgnino J.* From the Grating Scale Monitor (GSM) to the Generalized Seeing Monitor (GSM) // *Appl. Opt.* 2000. V. 39. N 30. P. 5415–5425.
35. *Lukin V.P.* Monostatic and bistatic schemes for laser guide star formation and optimal algorithm for tilt correction in ground-based adaptive telescopes // *Appl. Opt.* 1998. V. 37. N 21. P. 4634–4644.
36. *Lukin V.P., Fortes B.V.* Partial correction for turbulent distortions in ground-based telescope // *Appl. Opt.* 1998. V. 37. N 21. P. 4561–4568.
37. *Лукин В.П., Фортес Б.В.* Адаптивное формирование пучков и изображений. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 212 с. (перевод: Lukin Vladimir P., Fortes Boris V. Adaptive Beaming and Imaging in the Turbulent Atmosphere. USA. Bellinghain: SPIE Press, 2002. V. PM-109.).
38. *Лукин В.П.* Атмосферная адаптивная оптика // *Успехи физ. наук.* 2003. Т. 173. № 8. С. 11–17.
39. *Лукин В.П.* Адаптивное формирование оптических изображений в атмосфере // *Успехи физ. наук.* 2006. Т. 176. № 9. С. 18–24.
40. *Лукин В.П., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Коняев П.А.* Датчики волнового фронта для адаптивных оптических систем // *Автометрия.* 2008. № 4. Т. 43. С. 119–128.
41. *Лукин В.П., Емалеев О.Н., Ботыгина Н.Н., Антошкин Л.В., Лавринова Л.Н.* Дифференциальный оптический измеритель параметров атмосферной турбулентности // *Оптика атмосфер. и океана.* 1998. Т. 11. № 11. С. 1219–1223.
42. *Большасова Л.А., Лукин В.П.* Модовый неизопланатизм фазовых флуктуаций // *Оптика атмосфер. и океана.* 2008. Т. 21. № 12. С. 1070–1075.
43. *Лукин В.П.* О сопоставлении моделей спектра атмосферной турбулентности // *Оптика атмосфер. и океана.* 1993. Т. 6. № 9. С. 628–631.

V.P. Lukin, S.P. Ilyasov, V.V. Nosov, S.L. Odintsov, Yu.A. Tillaev. **The study of astroclimate of the South Siberia and Central Asia regions.**

The investigations, conducted at the Institute of Atmospheric Optics SB RAS in cooperation with other institutes on measuring atmospheric parameters, defining the quality of the formed optical images are described. The notion of the astroclimate of the atmosphere itself is determined. The new special measurement equipment and the results of the measurements, executed in the region of the South Siberia and Central Asia, in particular, at Maydanak observatory (Uzbekistan) are presented.

The comparison of data on the astroclimate in this region with those of leading observatories of the world is conducted.