

УДК 520.16, 681.7

Исследования атмосферы для задач адаптивной оптики

Л.А. Большасова, В.П. Лукин*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 8.02.2021 г.

Адаптивные оптические системы стали неотъемлемой частью крупных астрономических телескопов и лазерных комплексов, работающих сквозь атмосферу. Каждая система разрабатывается индивидуально, требования к элементам и функционирование системы в целом зависят от интенсивности и распределения турбулентных флуктуаций показателя преломления атмосферы по трассе распространения излучения.

Представлен обзор методов и средств измерения, прогноза атмосферных условий для задач адаптивной оптики, включая разработанные в ИОА СО РАН. Кратко описаны основные принципы атмосферной адаптивной оптики и используемые атмосферные параметры. Особое внимание уделено параметру, предназначенному для оценки возможностей применения систем адаптивной оптики, — значению скорости ветра на уровне 200 ГПа; проведено сравнение с данными зарубежных астрономических обсерваторий. Обсуждается необходимость атмосферных исследований для российских астрономических обсерваторий.

Ключевые слова: адаптивная оптика, атмосферная оптическая турбулентность, астроклимат, методы измерения; adaptive optics, atmospheric optical turbulence, site testing, measurement methods.

Введение

Случайные неоднородности показателя преломления атмосферы Земли вызывают искажения распространяющегося оптического излучения, которые проявляются в дрожании, размытии, мерцании оптических изображений и лазерных пучков. Адаптивные оптические системы предназначены для компенсации этих эффектов в реальном масштабе времени.

В 1953 г. Н. Вавcock [1] предложил использовать управляемые оптические элементы с обратной связью для компенсации турбулентных искажений атмосферы. В 1957 г. В. Линник опубликовал работу [2], направленную на решение задачи устранения искажений, обусловленных атмосферной турбулентностью. Он предложил конструкцию телескопа, в котором используется составное зеркало с перемещаемыми элементами, что позволяет подстраивать форму волнового фронта в реальном масштабе времени. Эта концепция, поддержанная современными технологиями, эволюционировала со временем в самостоятельный раздел физической оптики — адаптивную оптику.

Основная цель адаптивной оптики (АО) — разработка методов и технических средств компенсации негативных эффектов, сопровождающих распространение оптического излучения в случайно-неоднородной среде, посредством активного управления фазовым или амплитудно-фазовым профилем оптических полей в приемном и/или передающем тракте оптико-электронной системы.

Характерная особенность систем АО — одновременное выполнение процессов измерения, коррекции и управления волновым фронтом излучения в реальном масштабе времени.

Адаптивная оптика начала активно развиваться в связи с задачей компенсации искажений волнового фронта, вызванных атмосферной турбулентностью и накладывающих основное ограничение на разрешающую способность наземных телескопов. Затем добавились задачи создания мощных лазерных систем, средства АО стали использоваться в промышленности и медицине [3]. В 1989 г. А. Dreher и его коллеги разработали первый сканирующий лазерный офтальмоскоп с деформируемым зеркалом [4].

Современные задачи атмосферной АО — это достижение дифракционного качества изображений, формируемых астрономическими телескопами; наземное слежение за воздушно-космическими объектами; фокусировка лазерного излучения сквозь атмосферу; оптическая связь. Надо отметить, что важность АО со временем лишь возрастает вместе с размерами новых астрономических телескопов, энергетическими возможностями новых лазерных систем и масштабами их практических приложений.

Каждая система АО разрабатывается индивидуально. Требования к основным элементам и системе в целом определяются атмосферными условиями места ее расположения, в частности интенсивностью и распределением турбулентных неоднородностей показателя преломления атмосферы по трассе распространения излучения, которые характеризуются сезонными, суточными, часовыми и даже минутными вариациями. Поэтому этапу проектирования системы АО предшествует этап атмосферных измерений. Если в ранних исследова-

* Лидия Адольфовна Большасова (sla@iao.ru); Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru).

ниях [5] полагалось, что атмосферные измерения необходимы лишь на этапе создания системы АО и далее система может работать в условиях неполноты информации, то в настоящее время стало ясно, что информация об атмосферных условиях важна для эффективной эксплуатации систем АО. Необходимо не только контролировать соответствующие атмосферные параметры в режиме реального времени, но и прогнозировать их для гибкого планирования научных программ и обслуживания приборов, выбора типологии инструментов с АО и без, которые будут использоваться в определенное время.

Лучше всего системы АО работают при минимальных атмосферных искажениях, в связи с чем поиск мест с наименьшим уровнем флуктуаций показателя преломления атмосферы остается важной задачей атмосферных исследований.

Поэтому в настоящее время активно разрабатываются аппаратура для измерений и методы прогноза атмосферных условий.

1. Атмосферная адаптивная оптика

Типичная система АО для атмосферных приложений включает: источник излучения; атмосферный канал передачи с искажениями; устройство воздействия на волновой фронт – корректор волнового фронта; измерительное устройство – датчика волнового фронта (ДВФ); устройство обработки информации, где результаты измерений используются для расчета сигналов управления устройством воздействия на волновой фронт. Специфика системы АО как оптико-электронной системы – это наличие дополнительных элементов: датчика и корректора волнового фронта. Расположение основных компонентов может быть различным и зависит от назначения оптико-электронной системы.

Эффективность системы АО определяется рядом факторов: принципы работы датчика и корректора волнового фронта; алгоритм восстановления волнового фронта; метод коррекции; статические и динамические характеристики корректора волнового фронта и его энергетические возможности; алгоритм управления корректором; динамический диапазон и чувствительность ДВФ; потенциальные возможности аппаратно-программной реализации.

Принципы функционирования систем АО для атмосферных приложений основываются на свойствах линейности, взаимности и квазистационарности атмосферы [5]. Основным является принцип взаимности Гельмгольца, соответствующий принципу обратимости информации. Он выполняется как для свободного пространства, так и для турбулентной среды, и позволяет полностью устранить влияние этой среды. Для эффективной работы атмосферной системы АО необходимо обеспечить достаточное быстродействие, связанное с выполнением условия квазистационарности. Для этого временной отклик системы и время распространения сигнала не должны превышать время «замороженности» тур-

булентной среды. Отметим, что проблема достижения необходимого быстродействия систем АО остается нерешенной.

Кратко напомним этапы развития АО для астрономических приложений. Первые системы АО наземных астрономических телескопов включали один датчик и один корректор волнового фронта, используя естественную звезду в качестве опорного источника. Главная проблема таких систем – это частое отсутствие в изопланарной области с наблюдаемым астрономическим объектом подходящей по яркости звезды, которая может выступать в качестве опорной. Для решения этой проблемы телескопы стали оснащаться системами формирования искусственного опорного источника – лазерной опорной звезды (ЛОЗ). Основным ограничением таких систем является невозможность компенсации наклонов волнового фронта излучения по сигналу от ЛОЗ. В результате система АО первого поколения имеет два контура для коррекции высших аберраций волнового фронта по сигналу ЛОЗ и контур для коррекции наклонов волнового фронта с естественной звездой в качестве опорной (требования в части изопланатизма в этом случае значительно снижаются). Для разработки таких систем достаточно знания параметра Фрида, т.е. интегрального по высоте значения оптической турбулентности атмосферы, а не его профиля. Главные недостатки систем АО первого поколения – фокусный неизопланатизм и ограниченное поле зрения системы.

Поэтому следующее, современное поколение систем АО – это мультисопряженные системы, которые включают несколько датчиков и корректоров волнового фронта, а также используют несколько ЛОЗ. В этих системах адаптивные зеркала оптически сопряжены с разными высотами в атмосфере, а именно с высотами наиболее сильных турбулентных слоев, или с одной высотой в приземном слое, турбулентность в котором наиболее сильная, но в этом случае они пространственно разнесены, что позволяет увеличить поле зрения системы – такие системы получили название АО приземного слоя (GL (ground-layer) АО). Для создания и работы подобных систем требуются детальные знания о высотном распределении оптической турбулентности атмосферы.

Все многообразие систем АО для атмосферных приложений можно разделить на два класса: системы активного и пассивного типов. К первому типу относятся системы АО, работающие на горизонтальных трассах; в первую очередь это системы для лазерных комплексов. В процессе их работы доступны и пункт приема, и пункт излучения, поэтому измерения на горизонтальных трассах не вызывают особых сложностей, а в предположении однородности трассы возможна интерполяция точечных атмосферных измерений.

Ко второму типу следует отнести системы АО, работающие на вертикальных трассах. Это АО для астрономических телескопов или систем слежения за воздушно-космическим пространством,

определяющих параметры движения самосветящегося объекта. В настоящем обзоре рассмотрены в основном системы второго типа.

Требования к элементам и системе АО в целом определяются атмосферными условиями места расположения системы. Лучше всего системы АО работают в условиях хорошего астроклимата, а в определенных атмосферных условиях могут не работать совсем. В ИК-диапазоне требования к АО снижаются. Как следствие, системы АО проектируются индивидуально, и при кажущейся простоте принципа функционирования таких систем для атмосферных задач их разработка довольно трудна из-за массы деталей и тонкостей, которые необходимо учитывать. Поэтому системы АО до сих пор остаются довольно сложными и эксклюзивными в каждом конкретном случае, а над созданием уникальных систем АО, например для крупных астрономических телескопов, работают международные коллективы.

В настоящее время в связи с задачей создания систем АО следующего поколения активно развиваются технологии профилирования оптической турбулентности атмосферы для определения наиболее сильных турбулентных слоев и оптимизации высот сопряжения в атмосфере. Высотные профили параметров оптической турбулентности могут иметь различный вид в зависимости от географических координат, типа рельефа и времени года, а также существенно различаться в течение суток.

2. Атмосферные параметры для АО систем

Основной параметр, характеризующий интенсивность оптической турбулентности атмосферы и влияние атмосферной турбулентности на все статистические характеристики распространяющегося оптического излучения, — это структурная характеристика показателя преломления атмосферы C_n^2 .

Под термином «оптическая турбулентность атмосферы», являющимся стандартным в литературе по АО, понимают оптические свойства турбулентной атмосферы. Физически процесс распространения электромагнитных волн определяет среда распространения, свойства которой характеризуются в оптическом диапазоне ее показателем преломления. Атмосфера Земли, находящаяся в турбулентном состоянии, обуславливает турбулентные неоднородности (флуктуации) показателя преломления, которые, в свою очередь, вызывают флуктуации фазы и амплитуды распространяющегося сквозь атмосферу оптического излучения, скомпенсировать которые предназначены системы АО.

В соответствии с гипотезами Колмогорова–Обухова структурная функция показателя преломления атмосферы [6] может быть записана как

$$D_n(\rho) = \langle [n(\mathbf{r}) - n(\mathbf{r} + \rho)]^2 \rangle, \quad (1)$$

где $n(\mathbf{r})$ — показатель преломления в точке \mathbf{r} ; ρ — расстояние между точками, в которых определяется показатель преломления. В инерционном интервале

$$D_n(\rho) = C_n^2 \rho^{2/3}, \quad (2)$$

где C_n^2 — структурная характеристика (в зарубежной литературе постоянная) показателя преломления атмосферы. Со стороны высоких пространственных частот граница инерционного интервала определяется величиной внутреннего масштаба турбулентности; со стороны низких частот — величиной внешнего масштаба.

В инерционном интервале для локально-однородной и изотропной среды трехмерная спектральная плотность поля показателя преломления

$$\Phi_n(\kappa) = 0,033 C_n^2 \kappa^{-11/3}. \quad (3)$$

Таким образом, в широком интервале пространственных частот (κ) единственным параметром, характеризующим интенсивность турбулентных пульсаций показателя преломления в атмосфере, является C_n^2 .

Общепринятая характеристика искажений волнового фронта в АО — параметр Фрида, или радиус когерентности плоской волны, определяющий интегральное значение оптической турбулентности атмосферы. Именно этот параметр используется в расчетах элементов систем АО [7]. Для вертикальной атмосферной трассы радиус когерентности плоской волны

$$r_0^{\text{пл}} = \left(0,423 k^2 \int_h^\infty d\xi C_n^2(\xi) \right)^{-3/5}, \quad (4)$$

сферической волны —

$$r_0^{\text{сп}} = \left(0,423 k^2 \int_h^x \left(1 - \frac{\xi}{x} \right)^{5/3} d\xi C_n^2(\xi) \right)^{-3/5}, \quad (5)$$

где $C_n^2(\xi)$ — высотная зависимость структурной характеристики показателя преломления; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, λ — длина волны; h — высота расположения системы в метрах; x — высота формирования искусственного опорного источника.

Отметим, что с точки зрения влияния атмосферы на качество формируемого телескопом изображения определяющим является отношение диаметра апертуры телескопа к параметру Фрида D/r_0 . В зависимости от величины этого параметра в АО классифицируется размер телескопа: если $D/r_0 = 10$, то телескоп среднего размера, при $D/r_0 < 10$ телескоп можно считать малым, при $D/r_0 > 10$ — большим.

Радиус когерентности плоской и сферической волн при работе на горизонтальной атмосферной трассе определяется как

$$r_0^{\text{пл}} = (1,45 C_n^2 k^2 L)^{-3/5}; \quad (6)$$

$$r_0^{\text{sp}} = (0,55C_n^2 k^2 L)^{-3/5} \quad (7)$$

(L – длина атмосферной трассы).

Применительно к системам АО, работающим на горизонтальных трассах, часто используют параметр Рытова

$$\beta_0 = 1,23C_n^2 k^{7/6} L^{1/6}, \quad (8)$$

$\beta_0 < 1$ соответствует режиму слабых флуктуаций, $\beta_0 \geq 1$ – режиму сильных флуктуаций.

Область изопланатизма в АО традиционно вычисляют через угол изопланатизма атмосферы

$$\theta_0 = \left(2,91 k^2 (\sec \vartheta)^{8/3} \int_0^\infty d\xi \xi^{5/3} C_n^2(\xi) \right)^{-3/5}. \quad (9)$$

Этот угол определяет размер области, где волновой фронт излучения от опорного и наблюдаемого объектов по мере распространения в турбулентной атмосфере приобретает одинаковые фазовые искажения. Его можно определить через радиус когерентности как

$$\theta_0 \approx \frac{0,31 r_0}{h_\xi}, \quad (10)$$

где $h_\xi = \left(\int d\xi \xi^{5/3} C_n^2(\xi) / \int d\xi C_n^2(\xi) \right)^{3/5}$ – толщина эффективного турбулентного слоя.

Высотный профиль оптической турбулентности совместно с профилем скорости ветра определяет требования к быстродействию системы АО наземного телескопа через частоту Гринвуда

$$f_G \approx \frac{1}{\tau_0} \quad (11)$$

или время когерентности атмосферы

$$\tau_0 = \left(2,91 k^2 \sec \vartheta \int_0^\infty d\xi C_n^2(\xi) V_{\text{wind}}^{5/3}(\xi) \right)^{-3/5},$$

где ϑ – зенитный угол; $V_{\text{wind}}(\xi)$ – высотный профиль скорости ветра, или через радиус когерентности из соотношения

$$\tau_0 \approx \frac{0,3 r_0}{\bar{V}}, \quad (12)$$

где $\bar{V} = \left(\int d\xi V_{\text{wind}}^{5/3}(\xi) C_n^2(\xi) / \int d\xi C_n^2(\xi) \right)^{3/5}$.

Ветер определяет временную частоту флуктуаций волнового фронта, а также влияет на интенсивность оптической турбулентности атмосферы, поскольку градиент скорости ветра способствует

формированию турбулентности атмосферы. Приземный ветер приводит к вибрациям конструкции телескопа и, как следствие, к дрожанию изображения, формируемого телескопом. Требуемая частота системы АО линейно возрастает с увеличением скорости ветра. Поэтому скорость ветра – это атмосферный параметр, знание которого также важно для систем АО. Отметим, что методы измерения скорости ветра хорошо известны в метеорологии. Применительно к системам АО речь идет не просто о скорости ветра, а о временных масштабах флуктуаций волнового фронта, поэтому практически все описанные ниже оптические методы определения $C_n^2(\xi)$ позволяют оценивать скорость перемещения турбулентных слоев.

Таким образом, для задач АО необходимо знать значения следующих параметров, определяемых через структурную постоянную показателя преломления атмосферы: параметр Фрида r_0 и/или профиль $C_n^2(\xi)$, угол изопланатизма θ_0 , время когерентности τ_0 или скорость ветра V_{wind} . Эти параметры определяют пространственно-временные характеристики системы АО, а также конструктивные требования к ее элементам – датчикам и корректорам волнового фронта (количество элементов и фокусное расстояние матрицы микролинз, число каналов управления адаптивным зеркалом и др.).

3. Обзор методов и средств измерений оптической турбулентности атмосферы

Методы определения $C_n^2(\xi)$ можно разделить на *оптические* и *акустические* по физическому принципу, лежащему в основе измерений. Другой принцип классификации введен в [8] – по области измерений: в приземной и в свободной атмосфере. Именно турбулентность нижнего слоя атмосферы дает наибольший вклад (от 40 до 80%) в деградацию оптического изображения, формируемого наземным телескопом.

3.1. Оптические методы

Оптические методы, в свою очередь, можно разделить по физическому принципу, лежащему в их основе, на измерения фазовых флуктуаций и флуктуаций интенсивности оптического излучения.

Подчеркнем, что наш обзор не является исчерпывающим, поскольку методы АО активно разрабатываются в настоящее время. Как следствие, предложено большое количество подходов к измерению оптической турбулентности атмосферы и скорости ветра, но все они в той или иной степени являются модификацией рассмотренных здесь оптических методов, показавших свою работоспособность в длительных атмосферных измерениях.

В 1960-е гг. J. Stock, G. Keller [9] предложили концепцию дифференциального метода измерения

качества изображения. Идея метода состоит в измерении дисперсии случайных смещений энергетического центра тяжести двух изображений одной и той же звезды, построенных разными участками объектива. Главное преимущество дифференциального метода — возможность фильтрации механических дрожаний самого инструмента от измеряемых дрожаний, обусловленных атмосферной турбулентностью.

С появлением координатно-чувствительных приемников эта идея была воплощена специалистами Европейской Южной Обсерватории [10], которые использовали ПЗС матрицу для объективной оценки смещений двух изображений звезды относительно друг друга. Созданный прибор назвали DIMM (Differential Image Motion Monitor) — монитор дифференциальных дрожаний изображений.

Дисперсия разностного сигнала связана с радиусом когерентности оптической волны (r_0) как величины, характеризующей оптическую турбулентность, интегральную по трассе распространения оптического излучения:

$$\sigma_{l,t}^2 = K_{l,t} \lambda^2 D_{\text{sub}}^{-1/3} r_0^{-5/3}, \quad (13)$$

$$\sigma_{\phi}^2 = \frac{1}{2} (\sigma_l^2 + \sigma_t^2), \quad (14)$$

где $\sigma_{l,t}^2$ — дисперсия дрожания излучения в продольном и поперечном направлениях; D_{sub} — диаметр субапертуры; $K_{l,t}$ — коэффициенты типа измеряемого наклона волнового фронта, зависящие от размера субапертур и расстояния между ними. Выражения для коэффициентов в зависимости от типа измеряемых наклонов (G - и Z -наклонов) представлены в [11].

Для практической реализации этого метода на приемную апертуру малого телескопа (25–50 см) устанавливается маска с двумя субапертурами, а излучение разделяется обычно с помощью оптического клина. Точность вычисления σ^2 зависит от точности определения мгновенных координат каждого из двух смещающихся изображений и, следовательно, влияет на точность оценки r_0 . Присутствие шумов измерителя приводит к ошибке определения координат. Масштаб пикселя, длительность экспозиции камеры и количество кадров — важные параметры; их влияния изучалось в [12].

Отметим особенность приборов DIMM для астрономических приложений. В практике астрономических наблюдений для оценки качества изображения традиционно используется ширина функции размытия точки (ФРТ) на половине максимума (FWHM), называемая также seeing или качеством изображения (ϵ_0). В приборе DIMM ϵ_0 оценивается обычно на $\lambda = 0,5$ мкм с помощью приближенной формулы

$$\epsilon_0 \approx 0,98 \frac{\lambda}{r_0}. \quad (15)$$

Заметим, что прибор DIMM измеряет не ФРТ телескопа, а r_0 , который характеризует атмосферные условия, т.е. астрономический климат обсерватории, и затем производится расчет ϵ_0 программным обеспечением DIMM. Следовательно, seeing здесь — это не качество изображения, а характеристика атмосферы. А ФРТ — характеристика изображения, а не атмосферы или астроклимата. Атмосфера вносит главный, но не единственный вклад в ухудшение качества изображения, формируемого астрономическим телескопом. Форма и ширина ФРТ телескопа, работающего сквозь земную атмосферу, определяются инструментальной ФРТ и ФРТ, обусловленной турбулентностью атмосферы и подкупольного пространства.

В 1998 г. прибор, аналогичный DIMM и работающий на тех же физических принципах, но по лазерному излучению на горизонтальных атмосферных трассах, был создан в ИОА СО РАН. Его название — дифференциальный измеритель турбулентности (ДИТ) [13] (рис. 1).

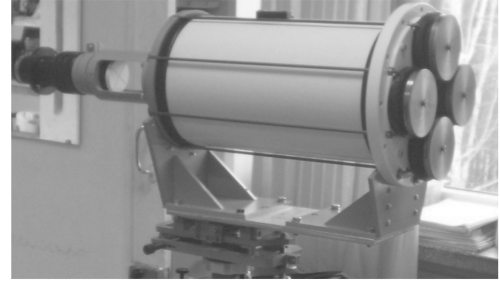


Рис. 1. Дифференциальный измеритель турбулентности

В первой версии ДИТ использовался зеркально-линзовый телескоп системы Максутова типа АЗТ-7, затем прибор был модернизирован: стал использоваться телескоп ТАЛ с апертурой 0,2 м и 4 субапертурами [14]. В нем C_n^2 оценивается с учетом формулы для радиуса когерентности лазерного пучка как

$$C_n^2 = \frac{\sigma_{l,t}^2}{1,411\pi^2 L (0,157 D_{\text{sub}}^{-1/3} - 0,145 d^{-1/3})} \quad (16)$$

(d — расстояние между субапертурами раstra).

Прибор для дневных измерений, работающий по дифференциальной методике измерения дрожания изображения, получил название SDIMM. В качестве источника излучения используется Солнце, модификация заключается в применении соответствующих фильтров [15].

V. Kornilov, A. Tokovin усовершенствовали прибор DIMM, дополнив его измерителем вертикального распределения турбулентности, основанным на статистическом анализе мерцаний одиночной звезды, измеренных на четырех concentрических кольцевых апертурах MASS (в оригинале Multi Aperture Scintillation Sensor) [16]. Идея использования флуктуаций интенсивности излуче-

ния для измерений оптической турбулентности атмосферы была высказана еще в работе S.F. Clifford [17]. Метод получил развитие для астрономических приложений в работах А. Tokovin [18].

Дифференциальный индекс мерцания изображения в области слабых флуктуаций определяется как

$$\sigma_I^2 = \int W_x(h) C_n^2(h) dh, \quad (17)$$

где $W_x(h)$ — весовые функции, зависящие от геометрии распространения излучения: размера приемной апертуры, углового размера излучающего объекта и длины волны излучения.

В MASS наименьшая апертура диаметром 2 см чувствительна к турбулентности на малых высотах, порядка 0,5 км, наибольшая апертура с внешним диаметром 13 см — главным образом к турбулентности в высоких слоях атмосферы. Статистический анализ мерцаний — флуктуаций амплитуды излучения — во всех четырех апертурах позволяет разграничить турбулентные слои и измерить интенсивность турбулентности каждого из них, откуда, инвертируя соотношение (17), можно восстановить C_n^2 отдельных слоев. Метод имеет низкое разрешение и нечувствителен к турбулентному слою вблизи земли, но прост и устойчив к ошибкам. Инструментальные и другие факторы, влияющие на точность измерений, рассмотрены в [19].

Отметим, что практически все существующие астрономические обсерватории используют DIMM на разнообразных серийно выпускаемых малых телескопах, в основном схемы Кассегрена. При этом MASS-DIMM-приборы активно использовались для выбора места установки новых телескопов и используются сейчас в местах расположения телескопов для поддержки работы систем АО.

Для измерения высотного профиля $C_n^2(\xi)$ широко применяются два метода — SLODAR и SCIDAR. Это методы триангуляции, в которых профиль оптической турбулентности атмосферы восстанавливается из корреляции либо наклонов волнового фронта (SLODAR), либо характеристик интенсивности мерцаний (SCIDAR) двух звезд с известным угловым расстоянием между ними.

Метод SCIDAR (в оригинале SCIntillation Detection and Ranging) был предложен Vernin & Roddier в 1973 г.; он основан на анализе автокорреляций мерцаний каждой из звезд двойной звезды. Метод позволяет восстанавливать не только профиль турбулентности $C_n^2(\xi)$, но и скорость перемещения $V(\xi)$ турбулентного слоя как функции высоты из короткоэкспозиционных изображений мерцаний двойной звезды [20]. В приближении слабых флуктуаций существует связь между трехмерным спектром мощности флуктуаций показателя преломления атмосферы и двумерным спектром мерцаний излучения в плоскости наблюдений. Излучение от двух звезд, разнесенных на угол θ , проходит

сквозь турбулентный слой на высоте H , мерцание одной звезды на приемнике сдвинуто относительно другой на расстояние $H\theta$ (рис. 2). Пространственная автоковариация мерцаний имеет пик на $r = \pm \theta H$, пропорциональный значению C_n^2 этого слоя:

$$C(r - \theta H) = \int dh C_n^2(h) \delta HK(r - \theta H), \quad (19)$$

где δH — разрешение по высоте, $K(r - \theta H)$ — теоретическая ковариационная функция мерцаний. Измерив ковариационную функцию мерцаний в плоскости зрачка телескопа и вычислив теоретическую ковариационную функцию мерцаний, можно восстановить $C_n^2(\xi)$.

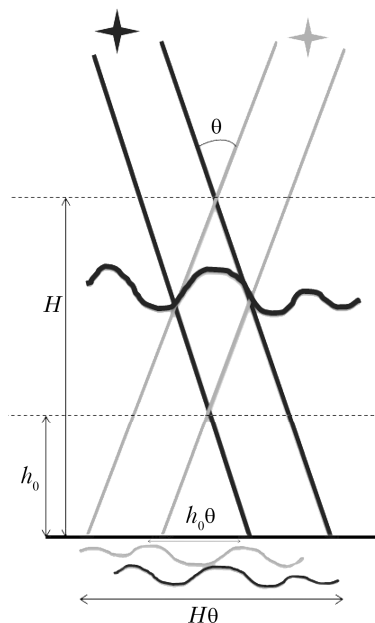


Рис. 2. Геометрия метода SCIDAR

Метод ограничен тем, что нечувствителен к турбулентности приземного слоя h_0 , поскольку ее вклад на каждой высоте пропорционален $5/6$. Можно преодолеть это ограничение, оптически сдвигая плоскость измерений ниже плоскости зрачка телескопа.

Теоретическое разрешение SCIDAR определяется размером зоны Френеля для заданной высоты турбулентного слоя. Подчеркнем, что SCIDAR и его модификации требуют большого телескопа (не менее 2 м) для достижения высокого разрешения в приземном слое [21]. Кроме того, на практике нахождение двойных звезд с большим угловым разносом часто затруднительно, особенно с требуемой яркостью в звездных величинах.

Модифицированный подход стерео-SCIDAR использует стереоскопическую систему, в которой мерцания от каждой звезды из двойной детектируются отдельным детектором [22]. В предыдущих

реализациях SCIDAR мерцания двух звезд обычно накладывались друг на друга в одном и том же детекторе. Разделение изображений звезд имеет несколько преимуществ. Визуализация мерцаний от каждой звезды по отдельности увеличивает возможную разницу в величине звезд, что увеличивает количество доступных источников, которые может использовать прибор. Кроме того, по сравнению с одиночной камерой SCIDAR отношение сигнал/шум восстановленного профиля турбулентности в зависимости от яркости звезд улучшается с увеличением разницы в звездных величинах между парой звезд: в 2 раза для звезд одинаковой величины; в 6,3 раза для звезд, яркости которых отличаются на две звездные величины. Использование звезд с разницей в яркости в 2,7 звездной величины приводит к увеличению чувствительности стерео-SCIDAR в 12 раз по сравнению с SCIDAR с одной камерой. Методы реализованы в приборах, которые установлены в крупнейших астрономических обсерваториях Мауна-Кеа и Параналь [21, 22].

В методе SLODAR (в оригинале SLOpe Detection And Ranging) высотный профиль турбулентности восстанавливается из усредненной по времени пространственно-угловой кросс-корреляционной функции локальных наклонов волнового фронта, измеренных в плоскости объектива телескопа с помощью ДВФ Шэка–Гартмана по наблюдениям двойной звезды [23].

Полный нормированный профиль $C_n^2(h)$ восстанавливается из взаимной корреляционной функции через обращение свертки, где автокорреляция наклонов волнового фронта для каждой из звезд двойной звезды используется как мера импульсного отклика системы на одиночный турбулентный слой.

Оценка турбулентного профиля из данных датчика Шэка–Гартмана происходит следующим образом. Короткоэкспозиционные гартманогаммы записываются одновременно для каждой звезды. Наклоны волнового фронта рассчитываются для каждой субапертуры датчика в двух структурах пятен для каждого из ортогональных направлений i, j . Средний наклон по всем освещенным субапертурам вычитается из индивидуальных наклонов для каждой звезды, что устраняет влияние ошибки наведения телескопа, общей для всех субапертур. Если $s_{i,j}$ – наклон волнового фронта излучения от 1-й звезды на субапертуре (i, j) в момент времени t , s'_{ij} – наклон волнового фронта излучения от 2-й звезды на соответствующей субапертуре, то пространственная кросс-корреляционная функция измеренных наклонов

$$C(\delta_i, \delta_j) = \left\langle \sum_{i,j} s_{i,j}(t) s'_{i+\delta_i, j+\delta_j}(t) / O(\delta_i, \delta_j) \right\rangle. \quad (20)$$

Здесь угловые скобки – усреднение по совокупности независимых кадров ДВФ; $O(\delta_i, \delta_j)$ – чис-

ло перекрывающихся субапертур (для которых доступны данные о наклоне) для сдвига (δ_i, δ_j) .

Таким же образом оценивается автокорреляция для отдельной звезды:

$$A(\delta_i, \delta_j) = \left\langle \sum_{i,j} s_{i,j}(t) s_{i+\delta_i, j+\delta_j}(t) / O(\delta_i, \delta_j) \right\rangle. \quad (21)$$

$A(\delta_i, \delta_j)$ – оценка влияния одиночного турбулентного слоя, которая используется для восстановления профиля оптической турбулентности через обращение свертки. Нормированный профиль $C_n^2(h)$ получают с помощью одномерного преобразования Фурье:

$$C_n^2 \propto F^{-1}[F[C] / F[A]]. \quad (22)$$

Преимущества метода заключаются в том, что он чувствителен к турбулентности на всех высотах, включая уровень земли, с функцией отклика, которая слабо зависит от высоты. Скорости ветра индивидуальных турбулентных слоев могут быть определены из взаимной корреляционной функции наклонов волновых фронтов, рассчитанной с ненулевым временем задержки между получением центров двух звезд на ДВФ. Каждый пик в двумерных функциях автокорреляции в этом случае смещен относительно его положения для нулевого времени задержки на величину, пропорциональную соответствующей скорости ветра в слое. Геометрия метода SLODAR показана на рис. 3.

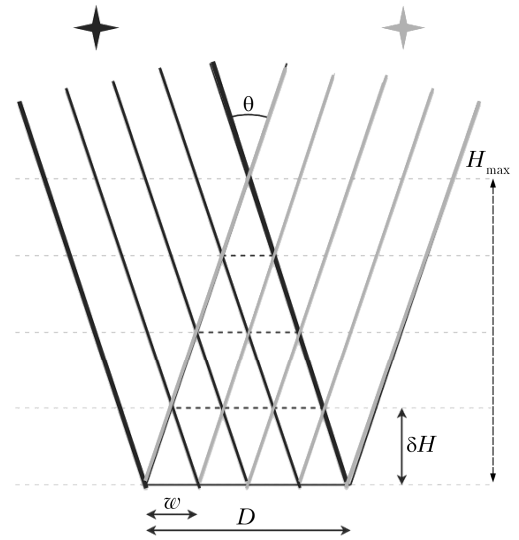


Рис. 3. Геометрия метода SLODAR

Вертикальное разрешение δH метода связано с углом θ разноса двойной звезды:

$$\delta H = \frac{D / n_{\text{sub}}}{\theta}, \quad (23)$$

где n_{sub} – число субапертур в проекции на зрачок телескопа w .

Максимальная высота определяется как

$$H_{\max} = n_{\text{sub}} \delta H. \quad (24)$$

Чем больше диаметр апертуры телескопа, тем больше высота зондирования. При использовании телескопа с размером апертуры 0,4 м максимальная высота — ~ 1 км, разрешение 1 угл. с. Поэтому для достижения приемлемых характеристик метод должен использоваться на больших телескопах.

Модификация SL (surface layer)-SLODAR для поддержки систем АО типа GLAO ограничена высотой зондирования 500 м, но позволяет достичь разрешения по высоте 10 м при работе с малым телескопом с апертурой порядка 0,5 м [24].

Отметим, что требование использования двойных звезд с большим угловым разномом часто трудновыполнимо, особенно при разумной разнице звездных величин. Для устранения этой проблемы был разработан и в настоящее время регулярно эксплуатируется в обсерватории Калерн и в Южноафриканской астрономической обсерватории прибор, который позволяет восстанавливать $C_n^2(h)$ из наблюдений за лимбом Луны, а также краем Солнца в ночных и дневных условиях. Части лимба Луны рассматриваются как двойная звезда. Для восстановления профиля оптической турбулентности и связанных параметров используются пространственная и временная кросс-корреляционные функции углов прихода волнового фронта [25, 26].

Отдельно отметим возможность использования датчика Шэка–Гартмана в контуре системы АО для измерения оптической турбулентности. ДВФ может применяться для восстановления профиля турбулентности по методу SLODAR и для восстановления r_0 (13) дифференциальным методом из измерений дрожания изображения на двух субапертурах датчика. Такие измерения параметра Фрида были реализованы на крупных солнечных телескопах, в том числе на БСВТ Байкальской астрофизической обсерватории, где корреляционный ДВФ Шэка–Гартмана используется как дифференциальный измеритель турбулентности непосредственно в контуре коррекции системы АО [27, 28]. Отметим, что корреляционный ДВФ Шэка–Гартмана в системах АО солнечных телескопов измеряет Z -наклоны. ДВФ используется для измерения профиля $C_n^2(\xi)$ в системе АО солнечного телескопа обсерватории «Большой Медведь», США [29]. Четыре ДВФ работают в контуре системы АО одного из крупнейших телескопов VLT (Very Large Telescope) по сигналам от четырех ЛОЗ [30]; они также применяются для профилирования оптической турбулентности. Подчеркнем, что измерения в контуре АО позволяют получать результаты непосредственно в точке стояние телескопа в необходимое время, что важно для эффективной работы систем АО телескопа.

Важное место в исследованиях атмосферы занимают **лидары**. У них есть ряд преимуществ,

включая высокое временное разрешение и широкий вертикальный пространственный охват. Лидарные методы восстановления профилей скорости ветра активно разрабатываются с 1980-х гг., в том числе в ИОА СО РАН. На сегодня предложено и разработано несколько подходов для диагностики и изучения атмосферного пограничного слоя с помощью лидаров [31].

Перспективно использование лидаров и для оценки C_n^2 [32]. В настоящее время такой метод активно развивает И. Разенков (см., например, [33]). В нем используется эффект усиления обратного рассеяния средней мощности эхосигнала. Для оценки профиля C_n^2 используется приближение Воробьева [34]:

$$\tilde{C}_n^2(x) = \frac{q(x, R, C_n^2)[1 + 0,4R^2 / r_F^2(x)]^{7/6}}{0,49k^{7/6}x^{11/6}}, \quad (25)$$

где \tilde{C}_n^2 — лидарная оценка структурной постоянной показателя преломления атмосферы; $r_F(x) = \sqrt{x/k_0}$ — масштаб Френеля, x — расстояние до лидача; q — фактор влияния турбулентности на среднюю мощность рассеянного излучения на приемнике; R — радиус приемной апертуры лидача.

Можно предположить, что метод позволяет обнаруживать масштабные вихревые и волновые структуры и поэтому может стать альтернативой содарам. Ограничением метода является работа при небольших углах наклона трассы относительно горизоннта.

Отметим, что лидары и ранее предлагалось использовать для зондирования атмосферной турбулентности, но по сути лидарный метод тогда представлял собой комбинацию дифференциального метода DIMM с использованием ЛОЗ [35].

В табл. 1 суммируются возможности рассмотренных в данном разделе методов измерения оптической турбулентности атмосферы. Кратко сформулируем результаты их сравнения.

SLODAR и SCIDAR требуют телескопа с размером апертуры не менее 1,5 м. Поэтому приборы на их основе не могут использоваться в качестве мобильного оборудования для атмосферных измерений, но позволяют получить профиль $C_n^2(\xi)$, что необходимо для современных систем АО.

DIMM требует модификации телескопа, но, как и MASS, собран из коммерчески доступного оборудования (монтажная, малый телескоп и т.д.), поэтому эти приборы могут легко транспортироваться. Кроме того, они могут устанавливаться в небольшом куполе (диаметром < 3 м) и их работа может быть полностью автоматизирована. Измерители, основанные на измерениях мерцания, часто не чувствительны к турбулентности у земли (0,5 км).

ДВФ Шэка–Гартмана в контуре системы АО не требует дополнительного телескопа; измерениями проводятся непосредственно в точке расположения телескопа, что особенно важно для эффективной эксплуатации системы АО.

Оптические средства измерения оптической турбулентности атмосферы

Прибор	$C_n^2(h)$	Диаметр апертуры приемного телескопа	Примечания	Метод
DIMM	r_0	20–50 см; коммерчески доступные малый телескоп и монтировка	требуется модификация телескопа	фазовые флуктуации
SLODAR	+	1–2 м	требуется двойная звезда	фазовые флуктуации
MASS	+	25–50 см; коммерчески доступные телескоп и монтировка	низкое разрешение, не измеряет приземную турбулентность	флуктуации интенсивности
SCIDAR	+	2 м	требуется двойная звезда	флуктуации интенсивности
Датчик волнового фронта Шэка–Гартмана	+, r_0	любой	в контуре АО системы	фазовые флуктуации
Турбулентный лидар	+	малый телескоп	горизонтальные трассы	флуктуации интенсивности

3.2. Акустические методы

Обзор был бы неполным без рассмотрения акустических средств измерений – содаров и ультразвуковых термоанемометров. При акустическом зондировании звуковые волны, распространяясь в атмосфере, рассеиваются на неоднородностях поля ветра и температуры воздуха, которые связаны, прежде всего, с турбулентными движениями.

Содар – это система дистанционного зондирования, с помощью которой информация как об интенсивности турбулентности, так и о градиенте температуры и ветра может быть получена из измерений профиля интенсивности обратного рассеяния звука. По времени задержки отраженного сигнала определяют расстояние до рассеивателей, по мощности отраженного сигнала можно судить об интенсивности турбулентности, а по доплеровскому сдвигу частоты определяют проекцию ветра на направление зондирования. Достоинством содаров являются их относительная простота, не очень высокая стоимость и надежность измерений при относительно высоком вертикальном разрешении (порядка 5–50 м). Основные недостатки содаров – ограниченная вертикальная дальность обнаружения (от нескольких сотен метров до 1 км) и снижение доступности данных в определенных погодных условиях. Кроме того, излучаемый сигнал (обычно в диапазоне 1–10 кГц) уловим для человеческого уха.

В ИОА СО РАН в разное время были разработаны акустические системы зондирования атмосферы: содары «Звук-1», «Звук-2», «Волна-3», «Волна-4». Они представляют собой передвижные буксируемые комплексы, состоящие из одной или трех акустических антенн и аппаратной кабины [36]. Эти системы обеспечивают измерения вертикальных профилей скорости ветра, температуры и характеристик турбулентности в диапазоне высот от 40 до 1000 м.

Практическое применение метода акустического зондирования для систематических наблюдений интенсивности оптически активной турбулентности

в пограничном слое атмосферы было реализовано еще в конце 1980-х гг. [37]. Объединенные эксперименты были проведены на нескольких горных астрономических обсерваториях бывшего СССР для объяснения разницы в качестве астрономических изображений на разных площадках. В [38] оптические измерения сопровождались наблюдениями турбулентности с помощью содара высокого разрешения, разработанного специально для этой цели в астрономической обсерватории «Конкордия» (Антарктида). Содар использовался при поиске места установки телескопа ТМТ [39].

Наиболее простой акустический прибор – ультразвуковой термоанемометр, обеспечивающий измерения структурной постоянной температуры и ряда турбулентных параметров приземного слоя. Портативные термоанемометры, ультразвуковые метеостанции «Метео-2», созданные ИОА СО РАН, и акустический метеорологический комплекс (АМК) ИМКЭС СО РАН позволяют оценить структурную функцию показателя преломления атмосферы [40]:

$$C_n^2(h) = C_T^2(h) \left[\frac{80 \cdot 10^{-6} P(h)}{T(h)} \right]^2, \quad (26)$$

где C_T^2 – структурная постоянная температуры; P – давление; T – температура.

Это недорогие мобильные приборы, которые могут устанавливаться на метеомачте и использоваться в условиях холодного климата [41]. Основной их недостаток в том, что измерения точечные, но они могут быть аппроксимированы в условиях однородности трассы. Альтернативой является использование нескольких ультразвуковых термоанемометров.

В [42, 43] выполнены сравнительные измерения АМК и оптическими методами (ДИТ, ДВФ Шэка–Гартмана). Результаты показывают высокую корреляцию, но отличаются по абсолютным значениям. В целом измерения с помощью термоанемометров в интересах АО представляются полезными как для лазерных систем, работающих на горизонтальных трассах, так и для изучения физики про-

цессов формирования атмосферной турбулентности в пограничном слое над площадками обсерваторий.

4. Современные задачи исследования атмосферы для АО

К настоящему моменту практически все крупные зарубежные телескопы оснащены системами АО, которые непрерывно совершенствуются, в том числе мультисопряженными системами [44–49]. Данные о телескопах РФ будут представлены в разд. 5. При создании новых телескопов системы АО разрабатываются уже на стадии проектирования [50, 51].

В зарубежных обсерваториях накоплены большие объемы статистической информации об оптической турбулентности [52, 53]. Это позволило разработать модели не только высотного профиля C_n^2 , но и профиля скорости ветра на основе модели Бафтона [54]. При этом атмосферные измерения продолжают в режиме мониторинга, часто несколькими методами одновременно. Например, в недавнем исследовании [55] сравниваются данные измерителей, установленных в Паранальской обсерватории: стерео-SLODAR, MASS-DIMM, ДВФ Шэка–Гартмана АО системы VLT. Подчеркнем, что данные согласуются между собой, что свидетельствует об эффективности всех используемых методов и о достоверности результатов.

Актуальная задача исследования атмосферы для АО – прогноз атмосферных условий, в том числе оптической турбулентности и других астроклиматических параметров. Она имеет фундаментальное значение для всех типов систем АО, а также для гибкого планирования астрономических наблюдений и эффективности эксплуатации телескопов. Об этом свидетельствует анонсированная в 2020 г. крупнейшей астрономической ассоциацией – Европейской Южной Обсерваторией – программа по поиску надежного метода прогноза оптической турбулентности атмосферы и метеорологических условий. Опубликован запрос [49] для выявления институтов, способных разработать систему прогнозирования турбулентности и метеорологических условий в Паранальской обсерватории. Эта система должна прогнозировать атмосферные условия на ближайшие три ночи и с более высокой точностью – на предстоящую ночь [56, 57].

Выделяют несколько видов прогноза атмосферных условий в астрономических обсерваториях – на 14 ч и на короткие промежутки 1–4 ч. Прогноз на 15–20 мин тоже представляет интерес для эффективной эксплуатации систем АО [58]. Сюда же можно отнести нахождение временных интервалов с высоким значением угла изопланатизма и времени когерентности в масштабе от 20 мин до 2 ч для быстрого выбора инструмента (например, типа спектрографа), а также прогноз достижимого качества изображений телескопа (ϵ_0), т.е. $C_n^2(\xi)$, на нескольких сутках.

Задача прогноза оптической турбулентности и связанных с ней параметров в основном решается с помощью численных моделей прогноза погоды. Группа под руководством E. Masciadri развивает негидростатическую модель Astro-Meso-Nh для прогноза астроклиматических параметров, в том числе и турбулентных характеристик [58, 59]. В этой модели для оценки C_n^2 используются значения температуры воздуха, атмосферного давления, кинетической энергии турбулентности:

$$C_n^2(h) = 0,58\varphi_3(h) \left[\frac{80 \cdot 10^{-6} P(h)}{T(h)\theta(h)} \right]^2 L(h)^{4/3} \left[\frac{\partial\theta(h)}{\partial h} \right]^2, \quad (27)$$

где θ – потенциальная температура; φ_3 – функция, пропорциональная числу Прандтля; $L(h)$ – функция, связанная с кинетической энергией. Эта модель применялась для прогноза в обсерватории Чили.

Модель European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) использовалась в [60]. Для прогноза оптической турбулентности в обсерватории Мауна-Кеа (Гавайи) применяется модель Mauna Kea Weather Center (MKWC) [61]. Модель Weather Research and Forecasting (WRF) была апробирована авторами [62] для прогноза в обсерваториях, расположенных на Тибетском плато.

Однако получить удовлетворительные результаты прогнозирования оптической турбулентности пока не удается. Поэтому используются сезонные калибровки на основе долговременных измерений наземными инструментами, такими как MASS-DIMM, но и это решение не всегда приводит к удовлетворительному прогнозу [59]. Авторы [63] дополнительно привлекают авторегрессионные модели, что действительно улучшает результаты прогноза в условиях хорошего астроклимата и на короткие промежутки времени, поскольку метод является, по сути, методом прогноза по последнему значению. Авторы этих исследований предлагают использовать другие математические методы прогноза временных рядов, такие как фильтр Калмана совместно с Astro-Meso-Nh.

Задача прогноза атмосферных условий связана с точностью параметризации оптической турбулентности в нижних слоях атмосферы. Поэтому возможное решение – использование модели прогноза погоды совместно с моделью приземного слоя на основе теории подобия Монина–Обухова [64]. Свойства и динамика слоя в значительной мере определяются его взаимодействием с подстилающей поверхностью, которое можно характеризовать турбулентными потоками импульса, тепла и влаги. Теория подобия Монина–Обухова хорошо предсказывает физику турбулентности при неустойчивой и нейтральной стратификации атмосферы, но неприменима в условиях устойчивой стратификации. Другими словами, результаты теории Монина–Обухова относятся к случаю плоской однородной подстилающей поверхности в предположении стационарности и однородности метеорологических полей. Спектр флуктуаций показателя преломления

в инерционном интервале волновых чисел подчиняется степенной зависимости $-5/3$, что часто не соответствует условиям горных обсерваторий, поэтому для них необходимо модифицировать теорию или применять совершенно иные подходы. Исследование оптических характеристик турбулентной атмосферы в этих условиях представляет собой отдельную задачу.

К другим современным подходам прогнозирования C_n^2 в нижнем слое атмосферы можно отнести методы машинного обучения, которые в последние годы становятся популярными в различных областях. В 2016 г. впервые было предложено использовать искусственные нейронные сети (ИНС) – многослойный перцептрон – для определения C_n^2 через градиенты скорости ветра и потенциальной температуры, а также температуру воздуха, давление и относительную влажность приземного слоя в обсерватории Мауна-Лоа [65]. Авторами получен высокий коэффициент корреляции (0,8) между измеренными значениями и результатами оценки ИНС для нейтральной и неустойчивой стратификации атмосферы, где применима теория Монина–Обухова, и коэффициент корреляции, равный 0,6, для стабильно стратифицированной атмосферы. Для работы указанной ИНС необходимо знание вида функциональной связи между параметрами и подбор веса связей в процессе обучения, что затрудняет ее использование с другими данными, а сама ИНС представляет собой модель черного ящика.

В недавней работе [66] используется метод машинного обучения «случайный лес» для прогноза приземного значения структурной постоянной показателя преломления атмосферы вблизи экватории моря и изучения вклада метеорологических величин в формирование оптической турбулентности. Однако авторы не приводят тип стратификации атмосферы и статистические ошибки, указывая только на полезность метода.

В [67] успешно применена нейронная сеть обратного распространения, оптимизированная адаптивным генетическим алгоритмом, для прогноза C_n^2 по метеорологическим величинам; достигнут коэффициент корреляции 0,93 в условиях Антарктиды, т.е. низкой оптической турбулентности атмосферы.

Отметим, что все эти прогнозы с использованием методов машинного обучения основаны на измерениях атмосферных характеристик воздуха ультразвуковыми термоанемометрами.

5. Исследования атмосферы в российских астрономических обсерваториях

На сегодня в России системой АО оснащена единственный телескоп – БСВТ, расположенный в Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ

СО РАН [68–70]. Система была разработана сотрудниками ИОА СО РАН.

В табл. 2 перечислены обсерватории РФ, телескопы которых оснащены или потенциально могут быть оснащены системами АО.

Таблица 2
Крупные телескопы обсерваторий РФ

Обсерватория	Телескоп	Диаметр апертуры телескопа, мм
Специальная астрофизическая обсерватория (САО) РАН	БТА	6050
Крымская астрофизическая обсерватория (КрАО) РАН	ЗТШ	2640
	БСТ-1	1200
	АЗТ-11	1250
	Цейсс-122	1220
Терскольская обсерватория ИНАСАН РАН	АСТ-1200	1200
Терскольская обсерватория ИНАСАН РАН	Цейсс-2000	2000
Байкальская астрофизическая обсерватория (БАО) ИСЗФ СО РАН	БСВТ	1000
Саянская солнечная обсерватория (ССО) ИСЗФ СО РАН	АЗТ-ЗЗИК	1600
	АЗТ-ЗЗВМ	1500
Кавказская горная обсерватория ГАИШ МГУ	Зеркальный 2,5 м телескоп	2500

Изучение астроклимата в мире началось в связи с поиском мест с наименьшими атмосферными оптическими помехами для установки астрономических телескопов. Здесь уместно отметить эквивалентность терминов «оптическое состояние атмосферы» (традиционного в атмосферной оптике) и «астрономический климат», обозначающих совокупность атмосферных условий, влияющих на распространяющееся оптическое излучение. Кроме турбулентности на качество астрономических наблюдений влияют и другие характеристики атмосферы (облачность, аэрозоль и др.), определяющие ее оптическое состояние.

Исследования астроклимата активно развивались в СССР до 1990-х гг., были выполнены многочисленные акустические и оптические измерения [37, 71]. Обобщение результатов астроклиматических исследований, в том числе турбулентных характеристик, можно найти в монографиях [72, 73]. Но затем эти работы были практически прекращены в главных обсерваториях РФ, о чем свидетельствует отсутствие публикаций.

В это время атмосферные (астроклиматические) исследования продолжались в зарубежных обсерваториях, где имелись или планировались к установке большие телескопы, в интересах создания систем АО. Основное внимание уделялось параметрам, связанным с оптической турбулентностью атмосферы и скоростью ветра. В этот период был введен новый астроклиматический параметр – скорость ветра на уровне 200 ГПа (V200) – для оценки применимости систем АО. Корреляция этой

величины с астрономическим качеством изображения была установлена для ряда крупных астрономических обсерваторий [74–79], и совсем недавно – для БАО ИСЗФ СО РАН [80]. Этот параметр связан с требуемой частотой АО систем соотношением $\bar{V} = bV200$, где b – некоторый коэффициент. Кроме того, вертикальные градиенты $V200$ могут быть источником турбулентности ясно неба.

Одним из подходов к исследованию астроклимата является использование метеорологического реанализа. Таким способом изучалось высотное распределение скорости ветра во всех крупных зарубежных астрономических обсерваториях [72–80]. Метеорологические реанализы включают данные различных атмосферных измерений, радиозондовых наблюдений, самолетные, спутниковые и другие данные и представляют собой результаты ассимиляции этих данных в узлах регулярной сетки по Земле. Отметим, что использование данных реанализа и отдельно спутниковых измерений может быть полезным для изучения текущих и многолетних вариаций и других астроклиматических параметров, таких как облачность, влагосодержание [81, 82].

На рис. 4 (цв. вкладка) представлено распределение скорости ветра на уровне 200 ГПа для двух регионов – юга Сибири и Северного Кавказа по данным реанализа [83, 84]. С точки зрения частотных характеристик системы АО БАО находится в лучших условиях, чем ССО. Вопрос о лучшем месте для строительства БТА до сих пор остается дискуссионным. В горах Кавказа нет точек с низким значением параметра $V200$. КрАО находится в лучшем месте по этому параметру.

На рис. 5 приведены гистограммы распределения значений скорости ветра на уровне 200 ГПа за период с 1948 по 2018 г. по данным реанализа NCEP/NCAR для БАО ИСЗФ СО РАН и САО РАН. Они свидетельствуют о различных атмосферных условиях в астрономических обсерваториях РФ.

Сезонные вариации $V200$ для этих двух обсерваторий приведены на рис. 6 в сравнении с данными зарубежных обсерваторий из [79]. На рис. 7 (цв. вкладка) показан сезонный ход $V200$ по данным ERA40 для трех обсерваторий РФ из табл. 2 и зарубежных астрономических обсерваторий из [81].

В [80] на основе данных измерений радиуса когерентности установлено, что для БАО чем выше скорость ветра на уровне 200 ГПа, тем хуже астрономическое качество дневных изображений (больше дневной ϵ_0). Экспериментальные данные о типе зависимости между этими параметрами для места расположения БТА отсутствуют. В предположении подобной связи можно выделить лучшее время для работы системы АО на БТА – с октября по май, в противоположность БАО, где наилучшее время астрономических наблюдений – с июня по сентябрь (рис. 6). В недавней работе [81] показано, что параметр $V200$ в последние годы ме-

няется в связи с изменением климата, уменьшаясь или возрастая для разных обсерваторий.

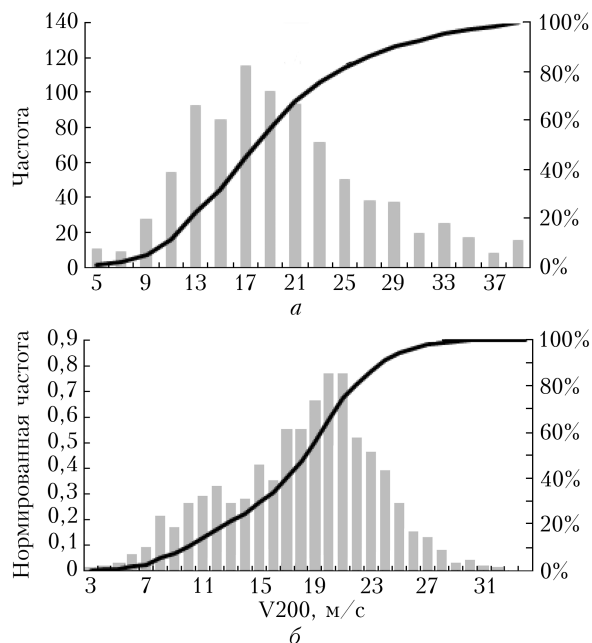


Рис. 5. Гистограмма распределения значений скорости ветра на уровне 200 ГПа с 1948 по 2018 г. по данным реанализа NCEP/NCAR для САО РАН [84] (а) и БАО ИСЗФ СО РАН [80] (б)

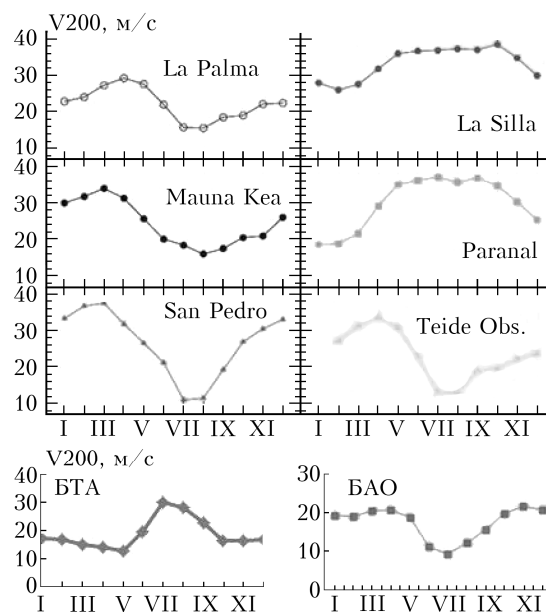


Рис. 6. Годовые вариации скорости ветра на уровне 200 ГПа для зарубежных [79] и российских обсерваторий

Как уже было сказано в разд. 4, современные исследования в области астроклимата направлены на прогноз атмосферных условий, в том числе для эффективной эксплуатации систем АО. В зарубежных обсерваториях осуществляется мониторинг атмосферных параметров, часто несколькими приборами одновременно, накоплены статистические данные. В РФ в настоящее время астроклиматический

пост есть в Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ, где с 2007 г. с помощью прибора MASS-DIMM проводится мониторинг всех параметров, необходимых для разработки системы АО [85, 86]. В результате известны сезонные особенности значения угла изопланатизма и времени когерентности (медианное значение $\tau = 6,57$ мс). Измерения прибором DIMM осуществляет ИСЗФ СО РАН в ССО [87]. Результаты исследования атмосферных условий БАО ИСЗФ СО РАН, включая сезонную статистику параметра Фрида, измеренного корреляционным ДВФ Шэка–Гартмана системы АО БСВТ, представлены в [28, 80, 88]. Гистограммы распределения структурной постоянной показателя преломления атмосферы в различные сезоны в приземном слое, измеренные с помощью ультразвуковой станции «Метео-2», приведены в [89].

Ряд важных результатов исследований турбулентного режима в нижних слоях атмосферы обсерваторий юга Сибири был получен в [90–94, 96]. Измерения проводились с помощью ультразвуковых метеостанций (комплексов) АМК, «Метео-2». Интересным результатом стало обнаружение когерентной неколмогоровской турбулентности, которая ослабляет флуктуации оптического излучения. В практическом отношении этот эффект означает наличие временных окон с высоким качеством изображения. Присутствие таких когерентных структур уменьшает дрожание изображения на телескопах в ССО более чем в 2 раза. Подобные, но не такие долговременные исследования были выполнены в САО РАН: показано, что при определенной метеорологической ситуации происходит образование вихревой когерентной структуры [95]. Результаты исследования процессов формирования оптической турбулентности нижнего слоя атмосферы в обсерваториях юга Сибири обобщены в монографии [96], а затем в [97].

В табл. 3 суммируются доступные данные о величине структурной характеристики показателя преломления атмосферы приземного слоя и интегральном значении $C_n^2(\xi)$ (параметре Фрида) астрономических обсерваторий РФ. Отметим, что значения C_n^2 могут изменяться в зависимости от метеорологических условий в пределах трех и более порядков величины. Подобно параметру Фрида они демонстрируют сезонную и суточную зависимости. В табл. 3 представлены средние и медианные значения летних измерений по литературным данным.

К настоящему моменту отсутствуют данные измерений параметра Фрида (профиля оптической турбулентности атмосферы) и других параметров, необходимых для проектирования систем АО для самого крупного в РФ телескопа БТА, за последние 10 лет. Не выполняются исследования турбулентных характеристик на постоянной основе для КраО РАН – одной из крупнейших обсерваторий бывшего СССР. В литературе отсутствуют статистические данные для Терскольской обсерватории, кроме измерений 1980-х гг. [37, 98]. Другими словами, в настоящее время в российских астрономи-

ческих обсерваториях не проводятся систематические измерения оптической турбулентности и связанных параметров, не ведутся полномасштабные атмосферные исследования, что не позволяет решить задачу оснащения системами АО телескопов РФ. Исключение составляет обсерватория ГАИШ МГУ, где атмосферных измерения ведутся и накопленные результаты позволяют приступить к разработке системы АО.

Таблица 3

Значения структурной постоянной показателя преломления атмосферы для астрономических обсерваторий РФ

Обсерватория	Среднее приземное значение C_n^2 , $\text{см}^{-2/3}$	Интегральное значение $C_n^2(\xi)$
САО РАН	$3,7 \cdot 10^{-17}$ [88] $1 \cdot 10^{-14}$ $\text{м}^{-2/3}$ [30]	медианное $\int d\xi C_n^2(\xi) =$ $= 11 \cdot 10^{-13}$ $\text{м}^{-2/3}$ [30]
Терскольская обсерватория ИНАСАН РАН	$5 \cdot 10^{-14}$ [30]	ночное медианное $r_0 = 8,4$ см [91]
БАО ИСЗФ СО РАН	дневные $2,3 \cdot 10^{-15}$ [89] ночные $1,5 \cdot 10^{-15}$ [89]	дневное среднее $r_0 = 5,22$ см [73]
ССО ИСЗФ СО РАН	дневные $1,2 \cdot 10^{-14}$ [89] ночные $5,6 \cdot 10^{-16}$ [89]	ночное медианное $r_0 = 6,3$ см [80]

Отметим, что использование данных измерений оптической турбулентности, выполненных в 1980–90-х гг. в обсерваториях РФ (см. табл. 3, [37, 98]), для разработки систем АО представляется некорректным в связи с климатическими изменениями, которые, как было показано на примере обсерваторий Чили на основе данных реанализа и натурных измерений, меняют астроклимат начиная с 2000-х гг. [99].

Кроме параметров, характеризующих оптическую турбулентность, на астрономические наблюдения влияют такие метеорологические величины, как влагосодержание, аэрозоль, облачность. В целом астрономический климат места установки телескопа является важной составляющей качества его работы. Прогноз атмосферных условий в обсерваториях поможет увеличить эффективность работы астрономических телескопов.

Заключение

Главным направлением развития атмосферных исследований для задач АО в настоящее время становится прогноз атмосферных условий. Безусловно, мониторинг, статистические данные и создание моделей структурной постоянной показателя преломления атмосферы не утратили своей актуальности. Поиск мест с минимальным уровнем C_n^2

оастается важной задачей. Но возможность прогнозировать временные интервалы с высокими или пониженными значениями основных атмосферных параметров (радиус и время когерентности, угол изопланатизма) важна для повышения эффективности работы систем АО и телескопов в целом.

Основной тренд в этом направлении сегодня – применение методов машинного обучения. Прогресс, достигнутый с помощью математических методов, наталкивается на ряд нерешенных задач, которые ограничивают качество прогноза. Это задачи оптики атмосферы, связанные с возможными ограничениями, налагаемыми земной атмосферой на распространение оптического излучения. В первую очередь это оптические свойства турбулентности нижнего слоя атмосферы в случае отклонений от классических теорий: неколмогоровская, когерентная турбулентность, устойчивая стратификация (стабильная атмосфера).

Отметим, что разработке теории приземного слоя атмосферы в случае устойчивой стратификации, когда градиентное число Ричардсона положительно и теория Монина–Обухова неприменима, посвящена обширная литература, но эта задача физики атмосферы еще не решена. Оптические свойства атмосферной турбулентности в таком режиме представляют особый интерес, поскольку в основном этот режим реализуется в ночное время в горных регионах и именно приземный слой дает наибольший вклад в искажение оптического изображения, формируемого наземным телескопом. Также предметом дискуссий является турбулентность ясного неба, которая наиболее часто возникает именно в горных регионах.

Множество работ посвящено изучению распространения оптического излучения при отклонении показателя степени в моделях плотности мощности флуктуаций показателя преломления атмосферы от классического в условиях так называемой неколмогоровской турбулентности, но в основном эти исследования касаются лазерных пучков. Атмосферные измерения с помощью современной лидарной техники, акустических методов представляются полезными для решения указанных выше задач.

В развитии приборной базы отчетливо наблюдаются тенденции к разработке профилометров, связанная с развитием систем АО следующего поколения. Но наиболее распространенным и востребованным для систематических атмосферных измерений остается прибор DIMM. Это обусловлено возможностью использования небольших коммерчески доступных телескопов, в отличие от методов профилирования, требующих телескопов с размером апертуры не менее 1,5 м. Перспективным представляется использование датчиков волнового фронта в контуре системы АО телескопа, в том числе для восстановления профиля структурной постоянной показателя преломления атмосферы.

Еще раз отметим необходимость атмосферных измерений в обсерваториях РФ в связи с важностью оснащения системами АО действующих теле-

скопов для их эффективной эксплуатации. Конечно, такие астроклиматические параметры, как облачность, влагосодержание, аэрозоль оказывают влияние на эффективность астрономических наблюдений, но случайные неоднородности показателя преломления, возникающие при турбулентном движении в атмосфере, снижают разрешающую способность оптического телескопа. Радикальным решением этой проблемы является оснащение телескопов системами АО, разработанными с учетом данных атмосферных измерений. Понимание влияния атмосферы на формирование изображений – отправная точка для разработки АО систем.

Помимо решения задачи разработки систем АО исследования астроклимата необходимы для лучшего понимания возможных ограничений, налагаемых земной атмосферой. Эти знания и статистика астроклиматических параметров служат основой для построения моделей, прогноза, выработки стратегии использования телескопа, планирования астрономических наблюдений. Создание систем прогноза атмосферных условий, не только турбулентных, является одним из средств повышения эффективности астрономических наблюдений на действующих телескопах РФ.

Отметим, что за рамками настоящего обзора остались измерения внешнего масштаба турбулентности атмосферы и турбулентности подкупольного пространства телескопа, исследования параметров слоя натрия и других металлов для создания ЛОЗ систем АО телескопов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-12-50249.

1. *Babcock H.W.* The possibility of compensating astronomical seeing // *Publ. Astronom. Soc. Pacific.* 1953. V. 65, N 386. P. 229–236.
2. *Линник В.П.* О принципиальной возможности уменьшения влияния атмосферы на изображение звезды // *Опт. и спектроскоп.* 1957. Т. 25, № 4. P. 401–402.
3. *Kubby J.A.* Adaptive Optics for Biological Imaging. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2013. 359 p.
4. *Dreher A.W., Bille J. F., Weinreb R. N.* Active optical depth resolution improvement of the laser tomographic scanner // *Appl. Opt.* 1989. V. 28. P. 804–808.
5. *Лукин В.П.* Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск: Наука, 1986. 248 с.
6. *Татарский В.И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
7. *Hardy J. W.* Adaptive Optics for Astronomical Telescopes. England: Oxford University Press, 1998. 438 p.
8. *Lombardi G., Navarrete J., Sarazin M.* Review on atmospheric turbulence monitoring // *Proc. SPIE.* 2014. V. 9148. P. 91481W-1–12.
9. *Stock J., Keller G.* Astronomical Seeing // *Stars Stellar Systems.* 1960. V. 1. P. 138–153.
10. *Sarazin M., Roddier F.* The ESO differential image motion monitor // *Astron. Astrophys.* 1990. V. 227, N 1. P. 294–300.
11. *Tokovinin A.* From differential image motion to seeing // *Publ. Astronom. Soc. Pac.* 2002. V. 114. P. 1156–1166.
12. *Tokovinin A., Kornilov V.* Accurate seeing measurements with MASS and DIMM // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2007. V. 381. P. 1179–1189.

13. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лавринова Л.Н., Лукин В.П. Дифференциальный оптический измеритель параметров атмосферной турбулентности // Оптика атмосфер. и океана. 1998. Т. 11, № 11. С. 1219–1223.
14. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Коряев П.А., Лукин В.П. Трассовый дифференциальный измеритель параметров атмосферной турбулентности // Опт. и спектроскоп. 2010. Т. 109, № 4. С. 689–695.
15. Beckers J.M. A Seeing monitor for solar and other extended object observations // Exp. Astron. 2001. V. 12. P. 1–20.
16. Kornilov V., Tokovinin A., Vozyakova O., Zaitsev A., Shatsky N., Potanin S., Sarazin M. MASS: a monitor of the vertical turbulence distribution // Proc. SPIE. 2003. V. 4839. P. 837–845.
17. Ochs G.R., Wang T.-I., Lawrence R.S., Clifford S.F. Refractive-turbulence profiles measured by one-dimensional spatial filtering of scintillations // Appl. Opt. 1976. V. 15. P. 2504–2510.
18. Tokovinin A.A. Measurement of seeing and atmospheric time constant by differential scintillations // Appl. Opt. 2002. V. 41. P. 957–964.
19. Kornilov V., Tokovinin A., Shatsky N., Voziakova O., Potanin S., Safonov B. Combined MASS-DIMM instrument for atmospheric turbulence studies // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2007. V. 383. P. 1268–1278.
20. Vernin J., Roddier F. Experimental determination of two-dimensional spatiotemporal power spectra of stellar light scintillation Evidence for a multilayer structure of the air turbulence in the upper troposphere // J. Opt. Soc. Am. 1973. V. 63. P. 270–273.
21. Tokovinin A., Vernin J., Ziad A., Chun M. Optical turbulence profiles at Mauna Kea measured by MASS and SCIDAR // Publ. Astron. Soc. Pac. 2005. V. 117, N 830. P. 395–400.
22. Osborn J., Wilson R.W., Sarazin M., Butterley T., Chacyn A., Derie F., Farley O.J.D., Haubois X, Laidlaw D., LeLouarn M., Masciadri E., Milli J., Navarrete J., Townson M. J. Optical turbulence profiling with Stereo-SCIDAR for VLT and ELT // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2018. V. 478, iss. 1. P. 825–834.
23. Wilson R.W. SLODAR: measuring optical turbulence altitude with a Shack–Hartmann wavefront sensor // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2002. V. 337, iss. 1. P. 103–108.
24. Butterley T., Wilson R.W., Sarazin M., Dubbedam C.M., Osborn J., Clark P. Characterization of the ground layer of turbulence at Paranal using a robotic SLODAR system // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2020. V. 492, iss. 1. P. 934–949.
25. Catala L., Ziad A., Fanten-Caujolle Y., Crawford S.M., Buckley D.A.H., Borgnino J., Blary F., Nickola M., Pickering T. High-resolution altitude profiles of the atmospheric turbulence with PML at the Sutherland Observatory // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2017. V. 467, iss. 3. P. 3699–3711.
26. Chabé J., Aristidi E., Ziad A., Lanteri H., Fanten-Caujolle Y., Giordano C., Borgnino J., Marjani M., Renaud C. PML: a generalized monitor of atmospheric turbulence profile with high vertical resolution // Appl. Opt. 2020. V. 59. P. 7574–7584.
27. Scharmer G.B., van Werkhoven T.I.M. S-DIMM+ height characterization of day-time seeing using solar granulation // Astron. Astrophys. 2010. V. 513. P. A25 1–12.
28. Ботыгина Н.Н., Ковадло П.Г., Копылов Е.А., Лукин В.П., Туев М.В., Шиховцев А.Ю. Оценка качества астрономического видения в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа по данным оптических и метеорологических измерений // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 11. С. 942–947; Botygina N.N., Kovadlo P.G., Kopylov E.A., Lukin V.P., Tuev M.V., Shikhovtsev A.Yu. Estimation of the astronomical seeing at the Large solar vacuum telescope site from optical and meteorological measurements // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 2. P. 142–146.
29. Kellerer A., Gorceix N., Marino J., Cao W., Goode P.R. Profiles of the daytime atmospheric turbulence above Big Bear solar observatory // Astron. Astrophys. 2012. V. 542. P. A2 1–10.
30. Guesalaga A., Kolb J., Donaldson R., Valenzuela J., Oberti S., Neichel B., Paufigue J., Madec P.-Y. An on-line turbulence profiler for the AOF: on-sky results // Proc. SPIE. 2018. V. 10703. P. 795–802.
31. Dang R., Yang Y., Hu X.-M., Wang Z., Zhang S. A review of techniques for diagnosing the atmospheric boundary layer height (ABLH) using aerosol lidar data // Remote Sens. 2019. V. 11, N 13. P. 1590.
32. Гурвич А.С. Лидарное зондирование турбулентности на основе усиления обратного рассеяния // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2012. Т. 48, № 6. С. 655–664.
33. Разенков И.А. Перспективы применения турбулентного УОР-лидара для исследования пограничного слоя атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2021. Т. 34, № 1. С. 26–35.
34. Воробьев В.В. О применимости асимптотических формул восстановления параметров «оптической» турбулентности из данных импульсного лидарного зондирования. I. Уравнения // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 10. С. 862–869; Vorob'ev V.V. On the Applicability of Asymptotic Formulas of Retrieving “Optical” Turbulence Parameters from Pulse Lidar Sounding Data: I – Equations // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 2. P. 156–161.
35. Gimmestad G.G., Roberts D.W., Stewart J.M., Wood J.W. Development of a lidar technique for profiling optical turbulence // Opt. Engin. 2012. V. 51, N 10. P. 101713–101713-18.
36. Одинцов С.Л. Развитие и применение акустических средств диагностики атмосферного пограничного слоя // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 32, № 9. С. 786–791; Odintsov S.L. Development and use of acoustic tools for diagnostics of the atmospheric boundary layer // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 1. P. 104–108.
37. Гурьянов А.Э., Иркаев Б.Н., Каллистратова М.А., Пекур М.С., Петенко И.В., Рывьков В.П., Семенкин А.А., Тиме Н.С., Шурыгин Е.А., Щеглов П.В. Комплексное исследование оптической активной атмосферной турбулентности в двух горных обсерваториях // Астрон. журн. 1988. Т. 65, № 3. С. 637–644.
38. Petenko I., Argentini S., Pietroni I., Viola A., Mastantonio G., Casasanta G., Aristidi E., Bouchez G., Agabi A., Bondoux E. Observations of optically active turbulence in the planetary boundary layer by sodar at the Concordia astronomical observatory, Dome C, Antarctica // Astron. Astrophys. 2014. V. 568. P. A44.
39. Schöck M., Els S., Riddle R., Skidmore W., Travouillon T., Blum R., Bustos E., Chanan G., Djorgovski S.G., Gillett P., Gregory B., Nelson J., Otárola A., Seguel J., Vasquez J., Walker A., Walker D., Wang L. Thirty meter telescope site testing I: Overview // Publ. Astron. Soc. Pac. 2009. V. 121, N 878. P. 384–395.
40. Тихомиров А.А. Ультразвуковые анемометры и термометры для измерения пульсаций скорости и температуры воздушных потоков. Обзор // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 7. С. 585–600.
41. Aristidi E., Vernin J., Fossat E., Schmider F.-X., Travouillon T., Pouzenc C., Traullé O., Genthon C., Agabi A., Bondoux E., Challita Z., Mékarnia D.,

- Jeanneaux F., Bouchez G.* Monitoring the optical turbulence in the surface layer at Dome C, Antarctica, with sonic anemometers // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2015. V. 454, iss. 4. P. 4304–4315.
42. *Лукин В.П., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Антошкин Л.В., Коняев П.А., Гладких В.А., Мамышев В.П., Одинцов С.Л.* Одновременные измерения структурной характеристики показателя преломления атмосферы оптическим и акустическим методами // *Оптика атмосф. и океана.* 2011. Т. 24, № 10. С. 852–857; *Lukin V.P., Botygina N.N., Emaleev O.N., Antoshkin L.V., Konyaev P.A., Gladkikh V.A., Mamyshv V.P., Odintsov S.L.* Simultaneous measurements of structure characteristics of atmospheric refraction by optical and acoustic methods // *Atmos. Ocean. Opt.* 2012. V. 25, N 1. P. 6–11.
 43. *Лукин В.П., Ботыгина Н.Н., Гладких В.А., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Одинцов С.Л., Торзаев А.В.* Сравнительные измерения уровня турбулентности атмосферы с помощью оптических и акустических измерителей // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 2. С. 163–166; *Lukin V.P., Botygina N.N., Gladkikh V.A., Emaleev O.N., Konyaev P.A., Odintsov S.L., Torgaev A.V.* Joint measurements of atmospheric turbulence level with optical and acoustic meters // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 3. P. 254–257.
 44. *Ono Y.H., Minowa Y., Guyon O., Clergeon C.S., Mieda E., Lozi J., Hattori T., Akiyama M.* Overview of AO activities at Subaru Telescope // *Proc. SPIE.* 2020. V. 11448. P. 114480K.
 45. *Christou J.C., Veillet C., Miller D., Brusa G., Cavallo A., Taylor G., Funk L., Conrad A., Rahmer G., Zhang X., Walsh S., Ertel S., Pinna E., Esposito S.* Adaptive optics all the time at the LBTO // *Proc. SPIE.* 2020. V. 11448. P. 1144824.
 46. *Hippler S., Brandner W., Scheithauer S., Kulas M., Panduro J., Bizenberger P., Bonnet H., Deen C., Delplancke-Ströbele F., Eisenhauer F., Finger G., Hubert Z., Kolb J., Müller E., Pallanca L., Woillez J., Zins G.* Infrared wavefront sensing for adaptive optics assisted galactic center observations with GRAVITY // *Proc. SPIE.* 2020. V. 11448. P. 114484K.
 47. *Patru F., Millour F., Lai O., Carillet M., Eisenhauer F., Gillessen S., Haase M., Hart M., Haussmann F., Le Bouquin J.-B., Lutz D., Mandla C., More N., Ott T., Paumard T., Rau C., Schubert J., Wiegrecht E., Woillez J., Yazici S.* Dimensioning adaptive optics for future VLTI projects // *Proc. SPIE.* 2020. V. 11448. P. 1144871.
 48. *Chapman S.C., Conod U., Turri P., Jackson K., Lardiére O., Sivanandam S., Andersen D., Correia C., Lamb M., Ross C., Sivo G., Véran J.-P.* The multi-object adaptive optics system for the Gemini infra-red multi-object spectrograph // *Proc. SPIE.* 2020. V. 11448. P. 1144872.
 49. *Conod U., Jackson K., Lardiére O., Chapman S., Turri P., Lamb M., Sivanandam S., Sivo G., Véran J.-P.* Developing the prototype adaptive optics system for the Gemini infra-red multi-object spectrograph // *Proc. SPIE.* 2020. V. 11448. P. 1144876.
 50. *Cilieggi P., Agapito G., Aliverti M., Arcidiacono C.* MAORY: The adaptive optics module for the Extremely Large Telescope (ELT) // *Proc. SPIE.* 2020. V. 11448. P. 114480Y.
 51. *Hedglen A.D., Close L.M., Bouchez A.H., Males J.R., Demers R., Kautz M., Basant R., Parkinson M., Gasho V., Quirys-Pacheco F., Sitarski B.N.* The Giant Magellan Telescope high contrast phasing testbed // *Proc. SPIE.* 2020. V. 11448. P. 114482X.
 52. *Tokovinin A., Baumont S., Vasquez J.* Statistics of turbulence profile at Cerro Tololo // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2003. V. 340, iss. 1. P. 52–58.
 53. *Sánchez L.J., Cruz-González I., Echevarría J., Ruelas-Mayorga A., García A.M., Avila R., Carrasco E., Carramicana A., Nigoche-Netro A.* Astroclimate at san pedro Mártir – I. Seeing statistics between 2004 and 2008 from the thirty meter telescope site-testing data // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2012. V. 426. P. 635–646.
 54. *Roberts L.C., Bradford L.W.* Improved models of upper-level wind for several astronomical observatories // *Opt. Express* 2011. V. 19. P. 820–837.
 55. *Haguenauer P., Guesalaga A., Butterley T.* Comparison of atmosphere profilers at Paranal and atmosphere parameters statistics: AOF-profiler, STEREO-SCIDAR, MASS-DIMM, LGS-WFS // *Proc. SPIE.* 2020. V. 11448. P. 114481K.
 56. *URL:* <https://www.eso.org/public/industry/cp/docs/CFT-advance.html> (last access: 28.01.2021).
 57. *Milli J., Rojas T., Courtney-Barrar B., Bian F., Navarrete J., Kerber F., Otarola A.* Turbulence nowcast for the Cerro Paranal and Cerro Armazones observatory sites // *Proc. SPIE.* 2020. V. 11448. P. 114481J.
 58. *Turchi A., Masciadri E., Fini L.* Forecasting surface-layer atmospheric parameters at the Large Binocular Telescope site // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2017. V. 466, N 2. P. 1925–1943.
 59. *Masciadri E., Fini L.* Forecast of surface layer meteorological parameters at Cerro Paranal with a mesoscale atmospheric model // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2015. V. 449. P. 1664–1678.
 60. *Osborn J., Sarazin M.* Atmospheric turbulence forecasting with a general circulation model for Cerro Paranal // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2018. V. 480, N 1. P. 1278–1299.
 61. *Lyman R., Cherubini T., Businger S.* Forecasting seeing for the Maunakea Observatories // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2020. V. 496, iss. 4. P. 4734–4748.
 62. *Qing C., Wu X., Li X., Luo T., Su C., Zhu W.* Mesoscale optical turbulence simulations above Tibetan Plateau: first attempt // *Opt. Express.* 2020. V. 28. P. 4571–4586.
 63. *Masciadri E., Martelloni G., Turchi A.* Filtering techniques to enhance optical turbulence forecast performances at short time-scales // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2020. V. 492. P. 140–152.
 64. *Qing C., Wu X., Huang H., Tian Q., Zhu W., Rao R., Li X.* Estimating the surface layer refractive index structure constant over snow and sea ice using Monin–Obukhov similarity theory with a mesoscale atmospheric model // *Opt. Express.* 2016. V. 24. P. 20424–20436.
 65. *Wang Y., Basu S.* Using an artificial neural network approach to estimate surface-layer optical turbulence at Mauna Loa, Hawaii // *Opt. Lett.* 2016. V. 41. P. 2334–2337.
 66. *Jellen C., Burkhardt J., Brownell C., Nelson C.* Machine learning informed predictor importance measures of environmental parameters in maritime optical turbulence // *Appl. Opt.* 2020. V. 59. P. 6379–6389.
 67. *Su C., Wu X., Luo T., Wu S., Qing C.* Adaptive niche-genetic algorithm based on backpropagation neural network for atmospheric turbulence forecasting // *Appl. Opt.* 2020. V. 59. P. 3699–3705.
 68. *Лукин В.П., Фортес Б.В., Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лавринова Л.Н., Петров А.И., Янков А.П., Булатов А.В., Ковадло П.Г., Фирстова Н.М.* Экспериментальная адаптивная оптическая система для Большого солнечного вакуумного телескопа. I. Результаты тестирования и перспективы развития // *Оптика атмосф. и океана.* 1999. Т. 12, № 12. С. 1161–1164.

69. Лукин В.П., Григорьев В.М., Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Копылов Е.А., Лавринов В.В., Ковадло П.Г., Скоморовский В.И. Результаты испытания адаптивной оптической системы с модифицированным корреляционным датчиком на Большом солнечном вакуумном телескопе // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 5. С. 419–427.
70. Лукин В.П., Ботыгина Н.Н., Антошкин Л.В., Борзилов А.Г., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Ковадло П.Г., Колобов Д.Ю., Селин А.А., Соин Е.Л., Шуховцев А.Ю., Чупраков С.А. Многокаскадная система коррекции изображения для Большого солнечного вакуумного телескопа // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 5. С. 404–413; Lukin V.P., Botygina N.N., Antoshkin L.V., Borzilov A.G., Emaleev O.N., Konyayev P.A., Kovadlo P.G., Kolobov D.Yu., Selin A.A., Soin E.L., Shikhovtsev A.Yu., Chuprakov S.A. Multi-cascade image correction system for the Large solar vacuum telescope // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 5. P. 597–606.
71. Щеглов П.В., Гурьянов А.Э. Об атмосферном качестве астрономического изображения в некоторых пунктах СССР // Астрон. журн. 1991. Т. 68, № 3. С. 632–638.
72. Щеглов П.В. Проблемы оптической астрономии. М.: Наука, 1980. 272 с.
73. Дарчия Ш.П. Об астрономическом климате СССР. М.: Наука, 1985. 176 с.
74. García-Lorenzo B., Fuensalida J.J., Muñoz-Tuñón C., Mendizabal E. Astronomical site ranking based on tropospheric wind statistics // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2005. V. 356. P. 849–858.
75. Chueca S., García-Lorenzo B., Muñoz-Tuñón C., Fuensalida J.J. Statistics and analysis of high-altitude wind above the Canary Islands observatories // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2004. V. 349. P. 627–631.
76. Carrasco E., Avila R., Carramic A. High-altitude wind velocity at Sierra Negra and San Pedro Mártir // Publ. Astron. Soc. Pac. 2005. V. 117. P. 104–110.
77. García-Lorenzo B., Eff-Darwich A., Fuensalida J.J., Castro-Almazán J. Adaptive optics parameters connection to wind speed at the Teide Observatory // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2009. V. 397. P. 1633–1646.
78. Hach Y., Jabiri A., Ziad A., Bounhir A., Sabil M., Abahamid A., Benkhalidoun Z. Meteorological profiles and optical turbulence in the free atmosphere with NCEP/NCAR data at Oukammeden – I. Meteorological parameters analysis and tropospheric wind regimes // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2012. V. 420, N 1. P. 637–650.
79. Varela A.M., Muñoz-Tuñón C., García Lorenzo B., Fuensalida J., Castro-Almazán J. On the use of remotely sensed data for astronomical site characterization // 2012. P. 1–18. [Electronic resource]. URL: http://iac.es/proyecto/site-testing/images/stories/pdf/varela_et_al_2012.pdf (last access: 28.01.2021).
80. Bolbasova L.A., Shikhovtsev A.Yu., Kopylov E.A., Selin A.A., Lukin V.P., Kovadlo P.G. Daytime optical turbulence and wind speed distributions at the Baikal Astrophysical Observatory // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2019. V. 482, iss. 2. P. 2619–2626.
81. Hellemeier J.A., Yang R., Sarazin M., Hickson P. Weather at selected astronomical sites – an overview of five atmospheric parameters // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2019. V. 482, iss. 4. P. 4941–4950.
82. Marin J.C., Pozo D., Curé M. Estimating and forecasting the precipitable water vapor from GOES satellite data at high altitude sites // Astron. Astrophys. 2015. V. 573. P. A41.
83. Shikhovtsev A.Yu., Kovadlo P.G., Kiselev A.V. Astroclimatic statistics at the Sayan solar observatory // Sol.-Terr. Phys. 2020. V. 6, iss. 1. P. 102–107.
84. Shikhovtsev A.Yu., Bolbasova L.A., Kovadlo P.G., Kiselev A.V. Atmospheric parameters at the 6-m Big Telescope Alt-azimuthal site // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2020. V. 493, iss. 1. P. 723–729.
85. Kornilov V., Shatsky N., Voziakova O., Safonov B., Potanin S., Kornilov M. First results of a site-testing programme at Mount Shatdzhataz during 2007–2009 // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2010. V. 408, iss. 2. P. 1233–1248.
86. Kornilov V., Safonov B., Kornilov M., Shatsky N., Voziakova O., Potanin S., Gorbunov I., Senik V., Cheryasov D. Study on atmospheric optical turbulence above Mount Shatdzhataz in 2007–2013 // Publ. Astron. Soc. Pac. 2014. V. 126, N 939. P. 482–495.
87. Шуховцев А.Ю. Исследование оптической неустойчивости земной атмосферы и условий коррекции солнечных изображений: Автореф. дис... канд. физ.-мат. наук. Иркутск: Ин-т солнечно-земной физики СО РАН. Иркутск, 2016. 23 с.
88. Ковадло П.Г., Лукин В.П., Шуховцев А.Ю. Развитие модели турбулентной атмосферы на астроплощадке Большого солнечного вакуумного телескопа в приложении к адаптации изображений // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 11. С. 906–910; Kovadlo P.G., Lukin V.P., Shikhovtsev A.Yu. Development of the model of turbulent atmosphere at the Large solar vacuum telescope site as applied to image adaptation // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 2. P. 202–206.
89. Shikhovtsev A., Kovadlo P., Lukin V., Nosov V., Kiselev A., Kolobov D., Kopylov E., Shikhovtsev M., Azdeev F. Statistics of the optical turbulence from the micrometeorological measurements at the Baykal astrophysical observatory site // Atmosphere. 2019. V. 10. P. 661–9.
90. Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V. Turbulence scales of the Monin–Obukhov similarity theory in the anisotropic mountain boundary layer // Rus. Phys. J. 2020. V. 63, N 2. P. 244–249.
91. Nosov V., Lukin V., Nosov E., Torgaev A., Bogushevich A. Measurement of atmospheric turbulence characteristics by the ultrasonic anemometers and the calibration processes // Atmos. 2019. V. 10, N 8. P. 460–1–16.
92. Носов В.В., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Торгаев А.В. Атмосферная когерентная турбулентность // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 9. С. 753–759; Nosov V.V., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Torgaev A.V. Atmospheric coherent turbulence // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 3. P. 201–206.
93. Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Рекомендации по выбору мест размещения наземных астрономических телескопов // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 12. С. 1099–1110.
94. Lukin V.P., Nosov E.V., Nosov V.V., Torgaev A.V. Causes of non-Kolmogorov turbulence in the atmosphere // Appl. Opt. 2016. V. 55. P. B163–B168.
95. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В., Афанасьев В.Л., Балега Ю.Ю., Власюк В.В., Панчук В.Е., Якопов Г.В. Исследования астроклимата в Специальной астрофизической обсерватории РАН // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 8. С. 616–627; Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V., Afanas'ev V.L., Balega Yu.U., Vlasjuk V.V., Panchuk V.E., Yakopov G.V. Astroclimate

studies in the Special astrophysical observatory of the Russian Academy of Sciences // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 1. P. 8–18.

96. Носов В.В., Лукин В.П., Ковадло П.Г., Носов Е.В., Торгаев А.В. Оптические свойства турбулентности в горном пограничном слое атмосферы. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 149 с.
97. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Формирование турбулентности в астрономических обсерваториях юга Сибири и Северного Кавказа // *Оптика атмосф. и океана*. 2019. Т. 32, № 3. С. 228–246;

Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V. Formation of turbulence at astronomical observatories in Southern Siberia and North Caucasus // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 4. P. 464–482.

98. Перетятко Н.Н. Исследование астроклимата на Пике Терскол // *Кинемат. и физ. небесных тел*. 2000. Т. 16, № 5. С. 470–476.
99. *Cantalloube F., Milli J., Böhm C., Crewell S., Navarrete J., Rehfeld K., Sarazin M., Sommani A.* The impact of climate change on astronomical observations // *Nature Astron.* 2020. V. 4. P. 826–829.

L.A. Bolbasova, V.P. Lukin. Atmospheric research for adaptive optics problems.

Adaptive optics (AO) systems are an essential part of large astronomical telescopes and laser complex operating through the atmosphere. Each AO system is individually designed; the requirements for the elements and the capabilities of an AO system are determined by the intensity and distribution of turbulent fluctuations of the air refractive index over the radiation propagation path.

In this paper, we overview the techniques and means for measuring and forecasting atmospheric conditions for AO problems, including those developed at IAO SB RAS. The basic principles of atmospheric adaptive optics and the atmospheric parameters used are briefly described. Particular attention is paid to the parameter introduced for estimating usability of AO systems, i.e., the wind speed at a level of 200 hPa; the comparison with the data from foreign astronomical observatories is carried out. The need in atmospheric research for large Russian astronomical observatories is discussed.

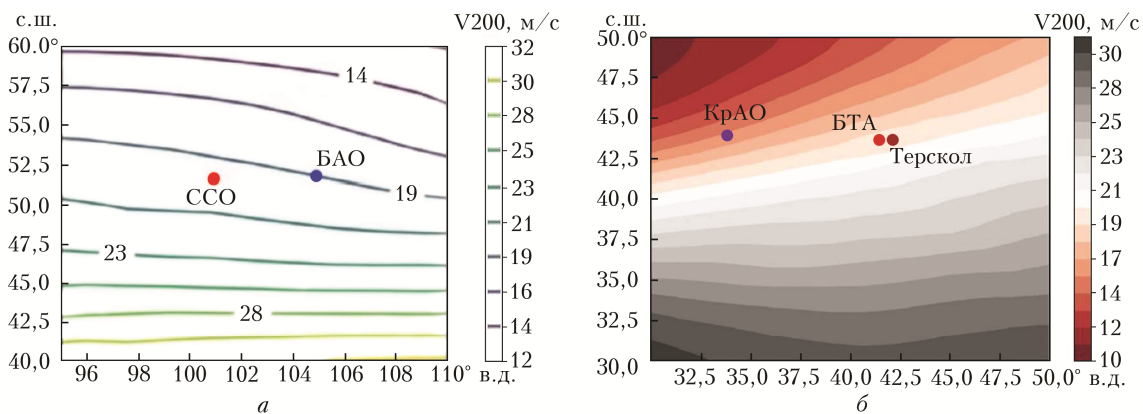


Рис. 4. Усредненное распределение V200 по данным реанализа ERA Interim для обсерваторий юга Сибири [76] (а); Северного Кавказа (адаптировано из работы [77]) (б)

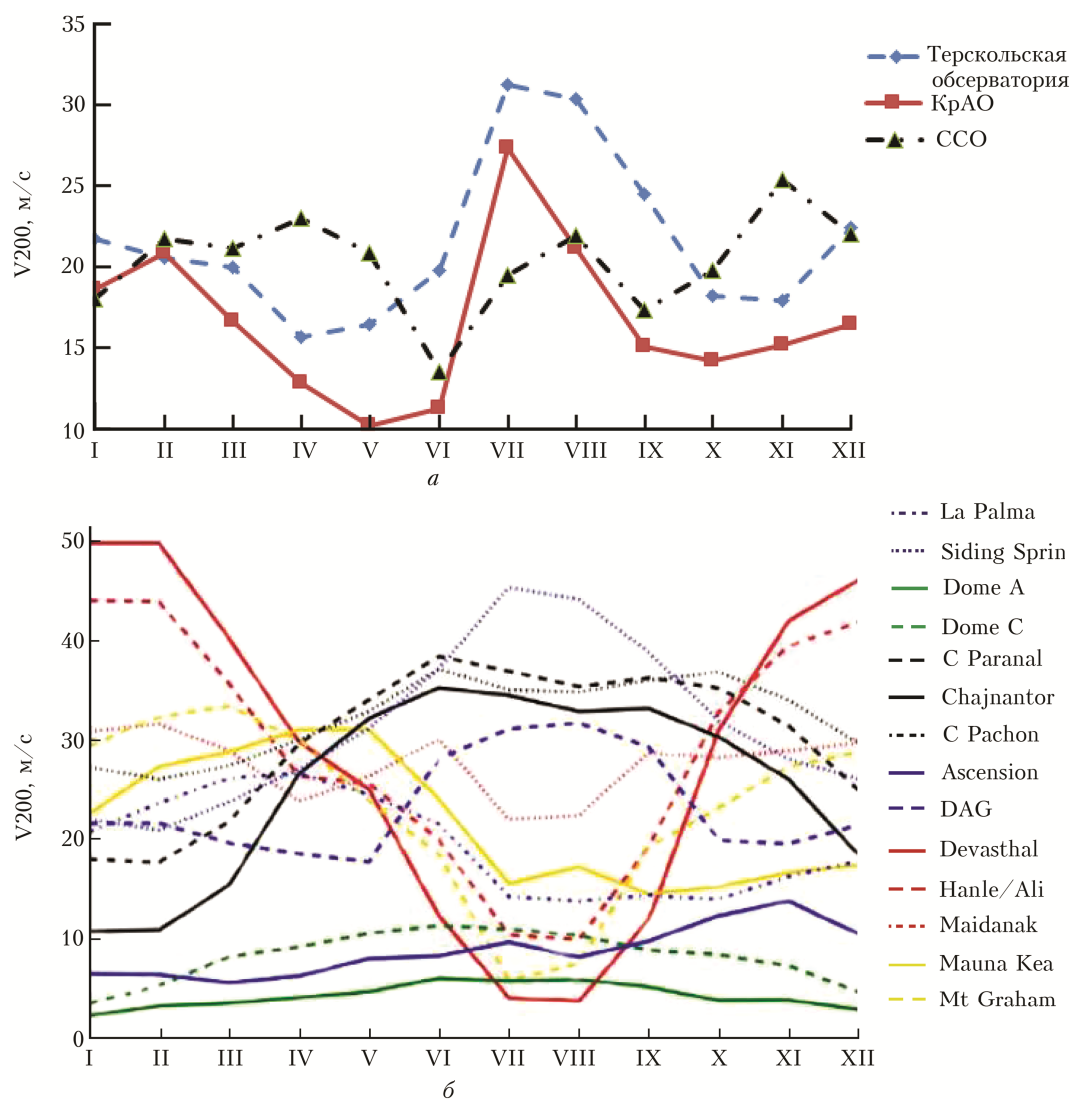


Рис. 7. Годовые вариации скорости ветра на уровне 200 ГПа по данным реанализа ERA40 для зарубежных [81] и российских обсерваторий