

СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АСТРОКЛИМАТА ДЛЯ ОБСЕРВАТОРИИ ТЕРСКОЛ

© 2023 г. Л. А. Больбасова¹, Е. А. Копылов^{2,*}

¹ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения РАН, Томск, Россия

² Институт астрономии РАН, Москва, Россия

*E-mail: kopylov@inasan.ru

Поступила в редакцию 02.02.2023 г.

После доработки 04.04.2023 г.

Принята к публикации 18.05.2023 г.

Представлены результаты исследования сезонных изменений параметров астроклимата для обсерватории Терскол: скорости ветра на уровне 200 мбар, как параметра применимости адаптивной оптики (АО), высотного распределения скорости ветра — определяющего требования к быстродействию АО, влагосодержания для оценки возможности работы АО в ИК-диапазоне, параметров мезосферного слоя натрия, определяющих яркость лазерной опорной звезды для АО системы, в связи с задачей разработки адаптивной оптики для телескопа “Цейсс-2000”. Также анализируются данные скорости приземного ветра и общей облачности для оценки доступного времени наблюдений. Используются данные атмосферных реанализов, с помощью которых рассматриваемые параметры изучались в крупных астрономических обсерваториях, а также спутниковые данные измерений мезосферного натрия и натурные изменения скорости приземного ветра.

Ключевые слова: астроклимат, обсерватория, адаптивная оптика

DOI: 10.31857/S0004629923070034, **EDN:** DTWEPW

1. ВВЕДЕНИЕ

Земная атмосфера является основной проблемой при астрономических наблюдениях. Случайные неоднородности показателя преломления, возникающие при турбулентном движении в атмосфере, обуславливают существенное снижение теоретической разрешающей силы, приводят к потерям в проникающей способности оптического телескопа, а как следствие, вызывают такие хорошо известные эффекты, как размытие, дрожание, мерцание оптического изображения. Скомпенсировать эти негативные эффекты в реальном масштабе времени предназначены системы адаптивной оптики (АО), которые проектируются под конкретные атмосферные условия места расположения телескопа. Для работы такой системы необходима информация о распределении флуктуаций в канале распространения излучения, получить которую можно от опорного источника. Нахождение подходящего источника на практике наблюдений часто невозможно, поэтому наиболее распространение получил подход формирования искусственного опорного источника на основе обратного рассеяния лазерного излучения в атмосфере, получившего название лазерной опорной звезды (ЛОЗ). Наиболее ин-

формативным является формирование ЛОЗ в мезосферном слое натрия на высотах 90–100 км.

К атмосферным факторам, определяющим требования при разработке и функционировании АО с ЛОЗ наземного телескопа, относится уровень атмосферной турбулентности, во многом определяющий параметры АО системы, а вместе со скоростью ветра — требования к быстродействию системы [1]. Следует отметить используемый в астрономических обсерваториях параметр применимости адаптивной оптики — скорость ветра на уровне 200 мбар. При этом для создания ЛОЗ необходимо обеспечить приемлемый уровень сигнала для работы датчика волнового фронта АО системы. Одним из влияющих параметров атмосферы является пропускание атмосферы, во многом обусловленное поглощением молекулами водяного пара. Эта величина также определяет возможности работы в ИК-диапазоне, где требования к параметрам АО системы, связанные с турбулентностью атмосферы, становятся менее жесткими. Однако первостепенными при создании натриевой ЛОЗ остаются параметры мезосферного слоя натрия, а именно высота слоя и концентрация натрия, определяющие высоту формирования ЛОЗ и достижимую яркость. Подчеркнем, что все вышеперечисленные атмо-

сферные величины зависят от географических координат и высоты расположения обсерватории, изменяясь в зависимости от времени года.

Инициированная Институтом астрономии РАН программа развития адаптивной оптики для 2-метрового телескопа требует исследований астроклимата места расположения телескопа – обсерватории Терскол. При этом необходимо отметить отсутствие статистически значимых данных атмосферных измерений в данной обсерватории в последние годы. Альтернативой наземным измерениям является использование спутниковых данных, но их ограничением является доступность данных в строго определенный временной промежуток. Другим общепризнанным подходом к атмосферным исследованиям является использование архивных данных метеорологических реанализов. Этим методом в крупных зарубежных астрономических обсерваториях изучались высотное распределения скорости ветра, облачность, число Ридхарсона, содержание водяного пара [2–6]. Для исследования астроклимата впервые данные атмосферных реанализов 3-го поколения были применены для поиска места установки телескопа в рамках проекта FriOWL [7]. В настоящей работе используются данные реанализа 5-го поколения ERA5 с более высоким пространственным разрешением и числом уровней по высоте [8]. Использование реанализов является современным методом климатических исследований, погоды, применяется для моделирования различных явлений в атмосфере с высоким разрешением, позволяет оценить изменения атмосферы, определить тренды, аномалии.

Нужно подчеркнуть, что использование реанализа не отменяет необходимости локальных атмосферных измерений, а является дополнительным для оценки атмосферных условий в обсерваториях, при поиске мест установки телескопов. Измерения локального уровня турбулентности и ее сезонных вариаций в месте расположения телескопа требуются для создания АО. Кроме этого, прогноз оптической турбулентности, влагосодержания, других параметров как на короткие временные интервалы от десятков минут, так и на следующую ночь не может быть построен без натуральных измерений. При этом именно прогноз атмосферных условий для планирования наблюдений на телескопах, эффективной эксплуатации АО и других приборов становится современной задачей исследования астроклимата.

Целью статьи является изучение сезонных изменений параметров астроклимата по данным атмосферных реанализов для оценки требований к АО системе с ЛОЗ. Это первая статья из цикла исследований астроклимата для задач АО на пике Терскол. В настоящее время в обсерватории про-

водятся измерения параметров приземной атмосферы, включая турбулентные характеристики, результаты которых будут представлены в последующих публикациях.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБСЕРВАТОРИИ И ИНСТРУМЕНТОВ

Международная высокогорная Обсерватория Пик Терскол ($43^{\circ}16'35.0''N$ $42^{\circ}29'59.0''E$) основана в 1980 г. на пике Терскол. Обсерватория находится на высоте 3150 м н.у.м. в 4 км от вершины горы Эльбрус (5642 м) в сторону юго-восточного направления хребта. Обсерватория оснащена следующими телескопами: Цейсс-2000, Цейсс-600, солнечный телескоп АЦУ-26, Астросиб-500, Meade LX200. Основным инструментом обсерватории является оптический телескоп “Цейсс-2000” – один из крупнейших по величине действующих на территории РФ телескоп с диаметром зеркала, равным 2 м, производства фирмы “Carl Zeiss Jena”. Большую часть времени наблюдений на телескопе занимают исследования методами спектроскопии высокого и сверхвысокого разрешения в видимом диапазоне длин волн. В ближайшее время в фокусе Кассегрена Цейсс-2000 планируется разместить новый волоконный спектрограф высокого разрешения. Спектрограф предназначен для получения спектров высокого разрешения ($R = 50000$) звездобразных объектов в диапазоне длин волн 3900–10000 Å.

3. МЕТОД: РЕАНАЛИЗ

Для проведения наших исследований использовались среднемесячные значения из базы данных реанализа ECMWF ERA5. База данных представляет собой ассимиляцию в узлах регулярной сетки большого количества метеорологических данных, со спутников, наземных, самолетных, радиозондовых наблюдений [8]. Среднемесячные значения атмосферных параметров для Терскольской обсерватории получены биполярной интерполяцией на основе четырех ближайших узлов сетки. Разрешение реанализа ERA5 составляет $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$. Оценка параметров слоя натрия основана на спутниковых измерениях.

3.1. Высотный профиль ветра – требования к быстрдействию АО системы

Знание вертикального распределения скорости ветра важно для создания эффективных адаптивных оптических систем астрономических телескопов. Градиент скорости ветра способствует формированию турбулентности атмосферы, а приземный ветер может приводить к вибрациям конструкции телескопа, и, как следствие, – к

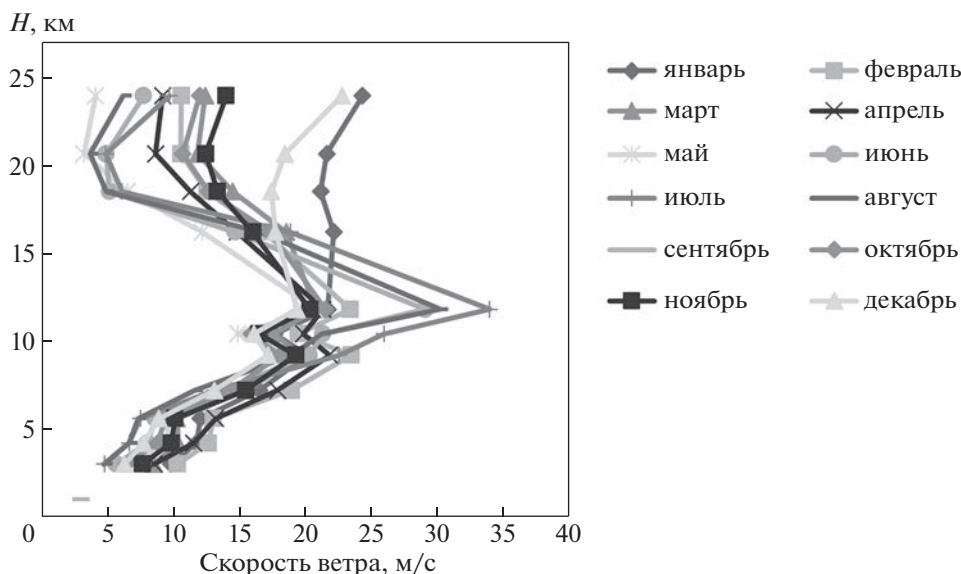


Рис. 1. Высотный профиль скорости ветра, усредненный за 3 года (2020–2022) для обсерватории Терскол для каждого месяца года по данным реанализа ERA5.

дрожанию изображения. Высотный профиль скорости ветра определяет требования к рабочей полосе частот адаптивных оптических систем через такие параметры, как частота Гринвуда или время когерентности [1]:

$$f_G = \frac{1}{\tau_0},$$

$$\tau_0 = \left(2.91k^2 \sec \vartheta \int_0^\infty d\xi C_n^2(\xi) V_{\text{wind}}(\xi)^{5/3} \right)^{-3/5}, \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны, ϑ – зенитный угол, $C_n^2(\xi)$ – высотный профиль структурного параметра показателя преломления, $V_{\text{wind}}(\xi)$ – высотный профиль скорости ветра.

Ветер имеет два эффекта, контролируя интенсивность и временную частоту флуктуаций волнового фронта. Интенсивность турбулентности зависит от энергии процесса и увеличивается со скоростью ветра. Временная полоса пропускания волнового фронта линейно возрастает с увеличением скорости ветра.

На рис. 1 представлены высотные профили скорости ветра для каждого месяца, усредненные за 3 года по данным реанализа ERA5.

Полученные результаты указывают на выраженную сезонность вертикального распределения скорости ветра над Терскольской обсерваторией. Приведенные выше данные сезонных вариаций высотного распределения скорости ветра свидетельствуют, что существенное увеличение

полосы частот адаптивной оптической системы телескопа может потребоваться в летний период. А значит, требования к быстродействию элементов адаптивной оптики и системы в целом могут стать труднодостижимыми. В то же время май можно назвать лучшим периодом для работы АО системы с точки зрения временных характеристик.

3.2. Параметр применимости АО – ветер на уровне 200 мбар

В работах [9, 10] был введен параметр для оценки применимости адаптивной оптики в астрономических обсерваториях V200 – скорость ветра на уровне 200 мбар, что соответствует высотам порядка 10–12 км. Корреляция этой величины с астрономическим качеством изображения была установлена в том числе с использованием данных архивов реанализов для ряда крупных астрономических обсерваторий и для Байкальской астрофизической обсерватории в нашей работе [5].

На рис. 2 представлены медианные значения V200 и рассчитанные 1 и 3 квартиль за последние 3 года для каждого месяца года для обсерватории Терскол по данным реанализа ERA5. Это рассчитанные медианные значения (второй квартиль), нижний квартиль соответствует 25-му процентилю, и верхний соответствует 75-му. Интерквартильный размах является характеристикой разброса распределения величины и аналогом дисперсии. Вместе медиана и интерквартильный размах могут быть использованы вместо матема-

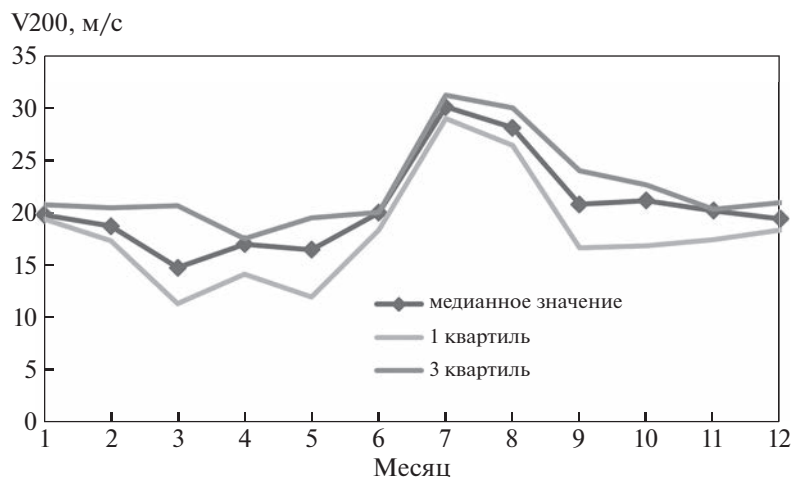


Рис. 2. Сезонное изменение параметра применимости адаптивной оптики V200 медианное значение, 1 и 3 квартиль, усредненные за последние 3 года (2020–2022 гг.), над обсерваторией Терскол по данным реанализа ERA5.

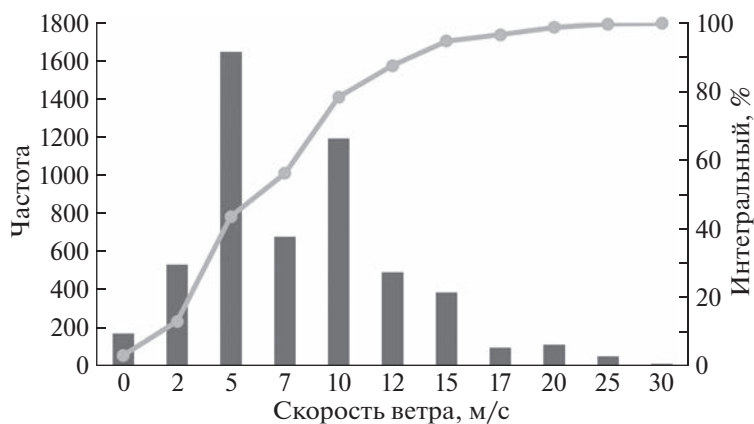


Рис. 3. Гистограмма распределения скорости ветра в приземном слое атмосферы за 3 года (2019–2021 гг.) обсерватории Терскол по данным метеостанции Davis.

тического ожидания и дисперсии в случае распределений с большими выбросами, либо при невозможности вычисления последних.

Наиболее неблагоприятным временем для работы АО с точки зрения частотных характеристик является лето. Анализ данных показывает, что месяц с наименьшими значениями V200 — март (14.7 м/с), а самая большая скорость ветра наблюдается в июле (30 м/с). При этом отметим преимущество Терскольской обсерватории по сравнению с обсерваторией Параналь, где эта величина достигает 40–50 м/с, что накладывает ограничения даже на наиболее совершенные АО системы [11].

3.3. Ветер в приземном слое атмосферы

Немаловажным фактором астроклимата является определение доли доступного наблюдательного времени в целом, в том числе потерь за счет ограничений, связанных с высокими значениями скорости ветра, когда запрещается открывать купол телескопа. Нами проанализированы данные с метеостанции Davis Vantage Pro2, расположенной на пике Терскол. Измерения проводились с интервалом 2 ч, круглосуточно. Выборка данных производилась для временного интервала потенциальных наблюдений с 22:00 до 06:00. Были проанализированы данные за 3 года (2018–2021 гг.). На рис. 3 представлена гистограмма распределе-

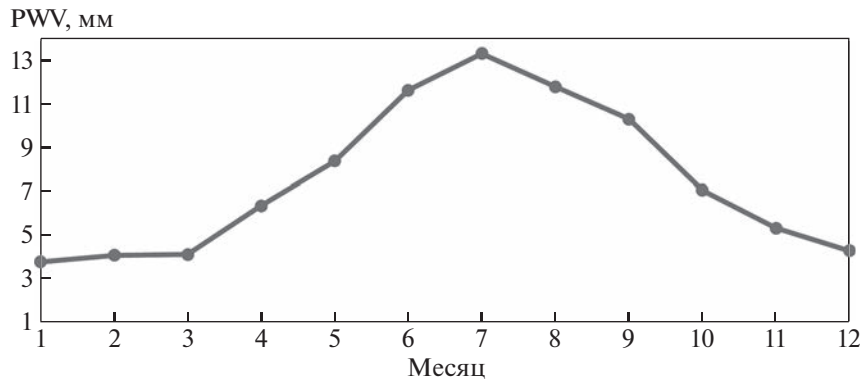


Рис. 4. Сезонное изменение интегрального содержания водяного пара PWV, среднемесячные значения, усредненные за последние 3 года (2020–2022 гг.), над обсерваторией Терскол по данным реанализа ERA5.

ния скорости ветра в приземном слое атмосферы за 3 года (2019–2021 гг.).

Отметим, что открывать купол телескопа Цейсс-2000 запрещено при скорости ветра 15 м/с и выше. Небольшое превышение этого критерия возможно при условиях наблюдений, когда направление ветра совпадает с направлением открытого купола (когда ветер дует с противоположной стороны открытого купола и при условии отсутствия снегового покрова), но как правило, при этом качество получаемых изображений будет гораздо хуже. Анализ данных рисунка показывает, что 90% скорость приземного ветра меньше 12 м/с, таким образом, потери наблюдательного времени на телескопе Цейсс-2000 из-за скорости ветра малы, при этом 50% скорость приземного ветра меньше 7 м/с.

3.4. Интегральное содержание водяного пара – работа в ИК-диапазоне

Следуя работе [12], классификация условий ИК-наблюдений в астрономии в терминах взвешенного водяного пара в атмосфере PWV (Precipitable Water Vapour) определяется следующим образом:

Лучшие условия $PWV \leq 3$ мм;

Средние условия $3 < PWV \leq 6$ мм;

Плохие условия $6 < PWV \leq 10$ мм;

Экстремально плохие $PWV \geq 10$ мм.

Необходимо отметить, что в переход в ИК-диапазон представляет интерес для АО, поскольку требования к элементам АО системы снижаются с точки зрения турбулентных характеристик.

На рис. 4 представлен сезонный ход PWV по данным реанализа ERA5 для Терскольской обсерватории.

Зависимость характерна для средних широт [13] с максимальными значениями летом и минимальными зимой. Можно видеть, что в летний период обсерватория характеризуется плохими условиями для ИК-наблюдений и средними условиями в другие сезоны, что также было показано в работе [14] по данным за 2019 г. Подчеркнем, что представленные усредненные за месяц данные не показывают кратковременные низкие значения взвешенного водяного пара в столбе атмосферы. В результате работа АО системы в ИК-диапазоне в летний период не целесообразна. Отметим, что данный параметр PWV ответственен на поглощение излучения молекулами воды во всех диапазонах длин волн от радио до видимого.

3.5. Параметры мезосферного слоя натрия – яркость и высота ЛОЗ

Высота слоя натрия определяет высоту формирования натриевой ЛОЗ, при этом чем выше формируемся ЛОЗ, тем больше информации о флуктуациях в канале распространения можно получить. Вместе с концентрацией натрия мезосферы и пропусканием атмосферы определяет обратный поток фотонов натриевой ЛОЗ, как [15]

$$\Phi_{\lambda} = \frac{TNS}{H_{Na}^2} P, \tag{2}$$

где Φ_{λ} – обратный поток фотонов от ЛОЗ, N – концентрация натрия в мезосфере; H_{Na} – высота натриевого слоя; T – пропускание атмосферы, P – мощность лазерного излучения, S – параметр, отвечающий за флуоресценцию атомов натрия.

На рис. 5–6 представлены сезонные изменения мезосферного высоты слоя натрия и концентрации. Для получения результатов использовались эмпирические формулы из работы [16], по-

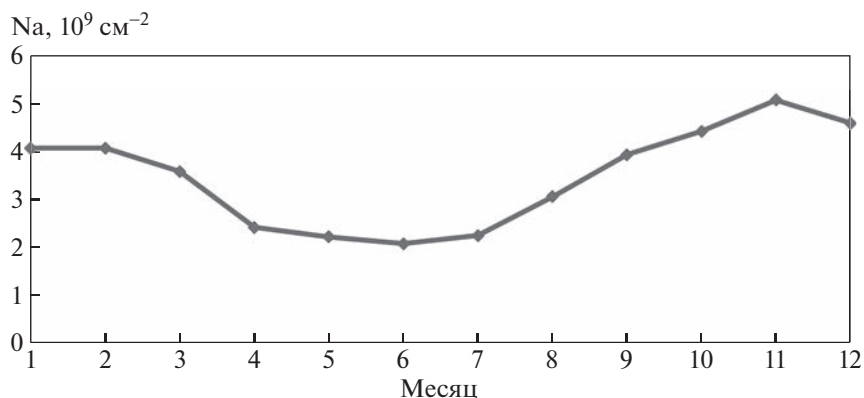


Рис. 5. Сезонное изменение высоты мезосферного слоя натрия над Терскольской обсерваторией, усредненные данные за 7 лет.

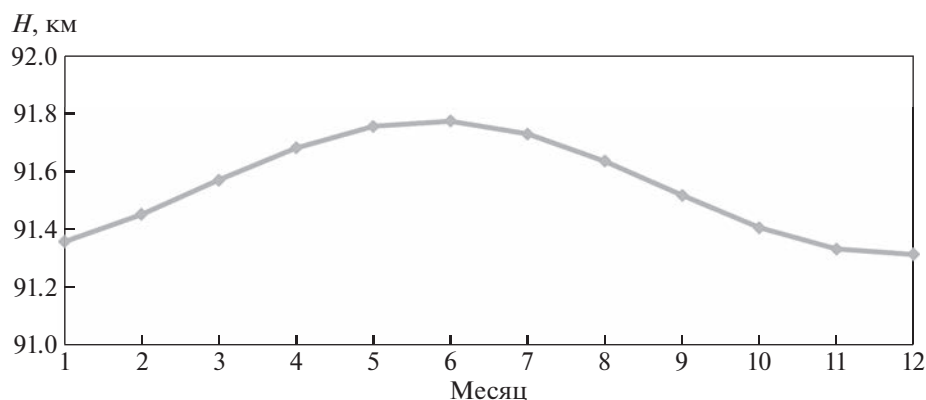


Рис. 6. Сезонное изменение содержания мезосферного натрия над Терскольской обсерваторией, усредненные данные за 7 лет.

лученные на основе многолетних спутниковых измерений мезосферного натрия.

Можно видеть выраженное сезонное изменение высоты слоя и концентрации мезосферного натрия в два раза между летними и зимними месяцами. Отметим, что уменьшение натрия в летний период в сочетании с уменьшением пропускания атмосферы (параметр T) будет уменьшать предельно достижимую яркость ЛОЗ в этот период (формула 2).

3.6. Облачность

Облачность является важным астроклиматическим параметром, хотя и не связана напрямую с АО, но определяет доступное наблюдательное время на телескопе, в том числе с АО системой. На рис. 7 представлено сезонное изменение облачности ТСС (Total Cover Cloud) над Терскольской обсерваторией по данным реанализа ERA5.

Первые три месяца года — худший период с точки зрения доступного времени наблюдений. Наибольшее доступное время наблюдений в Терскольской обсерватории имеют место в летний период. Отметим, что представленные среднемесячные значения включают не только ночные, но и дневные данные, и не учитывают кратковременные низкие значения.

3.7. Эффективность применения адаптивной оптики с натриевой ЛОЗ

Любая оптическая система астрономического телескопа формирует не дифракционное изображение различного качества с точки зрения передачи структуры объекта наблюдения из-за ряда факторов, вносящих в эту структуру свои изменения, оценка которых и есть оценка качества изображения. Основной характеристикой, описывающей передачу структуры изображения оптической

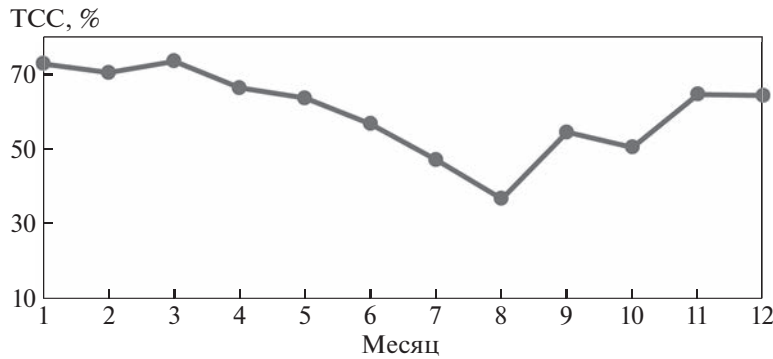


Рис. 7. Сезонное изменение облачности ТСС, среднемесячные значения, усредненные за последние 3 года (2020–2022 гг.), над обсерваторией Терскол.

ской системой, является функция рассеяния точки (ФРТ), которая описывает зависимость распределения освещенности от координат в плоскости изображения. ФРТ определяется абберациями, а также формой и размерами входного зрачка, последние остаются постоянными [17]. Одним из критериев качества оптической системы является отношение или параметр Штреля ($0 < SR < 1$), определяемого как отношение средней интенсивности на оси системы к интенсивности в вакууме, т.е. дифракционного изображения без aberrаций (формула 3):

$$SR = \frac{I(0)}{I_{vac}(0)}. \tag{3}$$

Дифракционным изображение можно считать, если $SR = 0.8$. Для астрономического телескопа, работающего сквозь земную атмосферу, форма и ширина ФРТ определяются наибольшим из двух значений (формула 4):

$$PSF_{tel} = PSF_{inst} + PSF_{turb}, \tag{4}$$

инструментальной ФРТ PSF_{inst} , которая в идеальном варианте должна быть дифракционной, и турбулентной ФРТ PSF_{turb} , обусловленной турбулентностью атмосферы и подкупольного пространства. Если инструментальную ФРТ можно отнести к детерминированным факторам, то турбулентная ФРТ является случайной величиной. Турбулентная ФРТ связана с турбулентностью атмосферы и турбулентностью подкупольного пространства. При этом для оценок влияния павильонных эффектов турбулентности необходимы экспериментальные исследования.

Основным параметром, определяющим влияние атмосферной турбулентности на распространяющееся оптическое излучение, является структурная постоянная показателя преломления ат-

мосферы. В случае астрономического телескопа — ее изменение с высотой $C_n^2(\xi)$. В качестве основной характеристики турбулентной атмосферы и астроклимата принято использовать радиус когерентности плоской волны, называемый еще параметром Фрида (формула 5):

$$r_0 = \left\{ 0.423k^2 \sec \alpha \int_0^\infty d\xi C_n^2(\xi) \right\}^{-3/5}, \tag{5}$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число излучения, λ — длина волны, α — зенитный угол. Основываясь на результатах наших измерений приземного значения структурной постоянной показателя преломления атмосферы и измерений параметра Фрида из работы [18], можно оценить эффект от примененной адаптивной оптики через отношение Штреля при коррекции с натриевой ЛОЗ и без [19]. Полагая величину параметра Фрида r_0 равной 13 см ($\lambda = 0.5$ мкм), мы оценили отношения Штреля для телескопа с диаметром апертуры 2 м после адаптивной коррекции с натриевой ЛОЗ и без. Результаты представлены в табл. 1.

Таким образом, достижимая величина отношения Штреля без адаптивной оптики менее 0.01. Эффект от применения адаптивной оптики на телескопе “Цейсс-2000” обсерватории Терскол с

Таблица 1. Параметр Штреля для различных спектральных диапазонов

	B	V	R	I
SR без АО	0.003	0.005	0.007	0.01
SR АО с натриевой ЛОЗ	0.69	0.77	0.8	0.88

натриевой ЛОЗ позволит получать близкое к дифракционному качеству изображение. Однако на практике наблюдений достижимое качество изображения при адаптивной коррекции будет несколько ниже, чем в табл. 1, поскольку оценки сделаны без учета павильонной турбулентности, инструментальных ошибок, в том числе ошибок элементной адаптивной оптической системы. А при увеличении уровня атмосферной турбулентности до некоего критического АО система может вообще не работать. Поэтому прогноз атмосферных условий, включая уровень оптической турбулентности атмосферы, становится главной задачей изучения астроклимата в действующих обсерваториях для выбора оптимального метода и программы наблюдений на телескопе. При этом эффект от применения АО увеличивается при уменьшении уровня атмосферной турбулентности, в том числе при переходе в ИК-диапазон, где r_0 увеличивается.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен анализ сезонных вариаций астроклиматических параметров над обсерваторией Пик Терскол ИНАСАН по данным реанализа ERA5 за период 2020–2022 гг. и спутниковых измерений мезосферного натрия. Полученные результаты свидетельствуют, что уменьшение концентрации мезосферного натрия совместно с увеличением взвешенного водяного пара и с повышенной скоростью ветра на уровне 200 мбар в летний период в обсерватории сделают работу АО с ЛОЗ в это время наиболее сложной, уменьшив яркость ЛОЗ и увеличив требования к быстродействию АО, что, безусловно, должно учитываться при разработке АО с ЛОЗ. При этом с точки зрения облачности именно летний период является наиболее благоприятным для астрономических наблюдений в данной обсерватории. При этом эффект от применения адаптивной оптики на телескопе “Цейсс-2000” обсерватории Терскол с натриевой ЛОЗ позволит получать близкое к дифракционному качеству изображение.

Так же стоит отметить, что с осени 2022 г. на обсерватории организован постоянный мониторинг уровня приземной турбулентности с помощью акустического метеорологической станции “Метео-2Н” [20]. О результатах данных исследований будет сообщено в следующих материалах авторов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН и ИНАСАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *J. W. Hardy Adaptive Optics for Astronomical Telescopes* (Oxford: Oxford University Press, 1998), 448 p.

2. *B. García-Lorenzo, J. J. Fuensalida, C. Muñoz-Tuñón, and E. Mendizabal*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **356**, 849–858 (2005).
3. *B. García-Lorenzo, A. Eff-Darwich, J. J. Fuensalida, and J. Castro-Almazán*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **397**, 1633–1646 (2009).
4. *Y. Hach, A. Jabiri, A. Ziad, A. Bounhir, M. Sabil, A. Abahamid, and Z. Benkhaldoun*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **420**, 1, 637–650 (2012).
5. *L. A. Bolbasova, A. Yu. Shikhovtsev, E. A. Kopylov, A. A. Selin, V. P. Lukin, and P. G. Kovadlo*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **482**, 2, 2619–2626 (2019).
6. *Y. Han, Q. Yang, N. Liu, K. Zhang, C. Qing, X. Li, X. Wu, and T. Luo*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **501**, 4692–4702 (2021).
7. *M. Sarazin, E. Graham, and H. Kurlandczyk*, Messenger **125**, 44 (2006).
8. The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950 // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society **147**, 741, 4186–4227 (2021).
9. *M. Sarazin and A. Tokovinin*, Proc. ESO Workshop Beyond conventional Adaptive Optics, 321–328 (2002).
10. *J. Vernin*, Astronomical Site Selection Proc. SPIE **0628**, 626–628 (1986).
11. *F. Cantalloube, O. J. D. Farley, J. Milli, N. Bharmal, et al.*, Astron. and Astrophys. **638**, A98 (2020).
12. *M. R. Kidger, J. M. Rodríguez-Espinosa, J. C. del Rosario, and G. Tranco*, New Astron. Rev. **42**, 537 (1998).
13. *B. E. Зуев, В. С. Комаров* *Современные проблемы атмосферной оптики* (Л. Гидрометеиздат, Т. 1, 1986).
14. *А. Ю. Шиховцев, В. Б. Хайкин, П. Г. Ковadlo, P. Varon*, Оптика атмосферы и океана **35**, 11, 956–962. <https://doi.org/10.15372/AOO20221112> (2022)
15. *R. Holzlohner, S. M. Rochester, D. Bonaccini Calia, D. Budker, J. M. Highbie, and W. Hackenberg*, Astron. and Astrophys. **510**, A20 (2010).
16. *M. P. Langowski, C. von Savigny, J. P. Burrows, D. Fusen, E. C. M. Dawkins, W. Feng, J. M. C. Plane, and D. R. Marsh*, Atmos. Meas. Tech. **10**, 2989–3006 (2017).
17. *А. Марешаль, М. Франсон*, Структура оптического изображения (М.: Мир, 295, 1964).
18. *А. В. Андриенко*, Сборник трудов конференции “Астрономия в Приэльбрусье”, 55–58 (2003).
19. *L. A. Bol'basova and V. P. Lukin*, Atmospheric and Oceanic Optics **23**, 01, 65–72 (2010).
20. *В. А. Гладких, А. Э. Макиенко*, Приборы **7**, 109, 21–25 (2009).

SEASON VARIATIONS OF ASTROCLIMATE PARAMETERS FOR THE TERSKOL OBSERVATORY

L. A. Bolbasova^a and E. A. Kopylov^b

^a *V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Tomsk, Russia*

^b *Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

We present results of the study of seasonal variations of the astroclimate parameters for the Terskol Observatory: wind speed at the level of 200 mbar as a measure of the adaptive optics (AO) applicability, the wind speed altitude distribution, determining the requirements for the AO performance, moisture content to assess the possibility of AO operation in the IR range, the parameters of the mesospheric sodium layer, determining the brightness of the laser reference star for AO systems, in connection with the task of designing adaptive optics for the Zeiss-2000 telescope. Data on surface wind speed and total cloud cover are also analyzed to assess the available observation time. The data of atmospheric reanalysis were used, with the help of which the parameters under consideration have been studied in large astronomical observatories, as well as satellite data of measurements of mesospheric sodium and full-scale changes in surface wind velocity.

Keywords: astroclimate, observatory, adaptive optics